



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

REVISTA
DE DIFUSIÓN

Nº 18
VOL. 1 (2021)
ISSN: 1390-7395



ENERGÍA MECÁNICA

| INNOVACIÓN Y FUTURO |

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

• CUERPO EDITORIAL

CRNL. DE C.S.M. VÍCTOR VILLAVICENCIO A. PhD.
Rector.

TCRN. DE E.M. DIELO IVANOVISH JIMÉNEZ C.
Director Sede Latacunga

ING. JOSÉ BUCHELI A. MSc.
Jefe de Investigación (I+D+i) y Vinculación

ING. EURO MENA M. MSc.
Director General de la revista
Director del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

ING. GERMÁN ERAZO LAVERDE MSc.
Docente Tiempo Completo, Universidad de las Fuerzas Armadas
ESPE/ Editor General, Miembro Grupo SAEM R&D

**ENERGÍA MECÁNICA ,
INNOVACIÓN Y FUTURO**
Revista de Difusión No.10
ISSN : 1390 - 7395
Publicación Anual
500 EJEMPLARES

• RESPONSABLE LEGAL:

Universidad de Fuerzas Armadas - ESPE Sede Latacunga
Quijano y Ordóñez y Hnas. Páez.
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica
emecanica@espe.edu.ec
einnovacion-el@espe.edu.ec
wgerazo@espe.edu.ec
032810206 Ext. 4301
Diciembre 2021
500 ejemplares.

• EQUIPO TÉCNICO:

Gestión técnica
Ing. Sonia Chacón Claudio

Diseño de la revista:
Ing. Ruth Pullopaxi Gutiérrez.



• COMITÉ CIENTÍFICO EDITORIAL

PhD. ENDER CARRASQUERO C.
Director Académico del Centro Venezolano de Estudios del
Trabajo y Ergonomía

PhD. MARÍA ELENA VILLAPOLO
CYA.
Docente Auckland
Universty of Technology

PhD. GUSTAVO RODRÍGUEZ
CIYA - UTC
Universidad Técnica de Cotopaxi.

PhD. RICARDO URRUTIA
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga

ING. ÓSCAR ARTEAGA LÓPEZ MSc.
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga,
SAEM R&D

ING. NÉSTOR ROMERO G. MSc.
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga,



ÍNDICE

CONFIGURACIÓN DE PROPULSIÓN DE LOS VEHÍCULOS CONVENCIONALES, HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS.

PROPULSION CONFIGURATION OF CONVENTIONAL, HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES.

10 - 18 ■

Brian Daniel Vélez Salazar¹

DESARROLLO DE LOS MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA EN EL CAMPO AERONÁUTICO

DEVELOPMENT OF MATERIALS AND MANUFACTURING PROCESSES IN THE AERONAUTICAL FIELD

19 -30 ■

José Trujillo Jaramillo¹, Edison Acurio Armas², Rodrigo Bautista Zurita³

ANÁLISIS MECÁNICO EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL INYECTOR DE SISTEMAS CRDI BOSCH

MECHANICAL ANALYSIS IN THE CALIBRATION PROCESS OF BOSCH CRDI SYSTEM INJECTORS

31 - 40 ■

Carlos Andrés Almendáriz Maisincho¹, José Lizandro Quiroz Erazo², Luis Aníbal Naranjo Pullupaxi³

ESTUDIO ANALÍTICO DEL FENÓMENO DE IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD SOBRE LAMINADOS DE TEJIDOS EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA DE LA AUTOMOCIÓN

ANALYTICAL STUDY OF THE IMPACT PHENOMENON OF HIGH-VELOCITY ON WOVEN LAMINATES USED BY THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

41 - 47 ■

Shirley García Castillo¹, Inés Iváñez², Sonia Sánchez Sáez³, Enrique Barbero⁴, Carlos Navarro⁵

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE ELEMENTOS TUBULARES DE FIBRA DE CARBONO DE SECCIÓN CUADRADA SOMETIDOS A IMPACTOS TRANSVERSALES

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ENERGY ABSORPTION OF SQUARE CARBON FIBER TUBULAR ELEMENTS SUBJECTED TO TRANSVERSE IMPACTS

48 - 53 ■

Henry Iza Tobar¹, Shirley K. García Castillo², Inés Iváñez³

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN EN EL CONTROL DIMENSIONAL DE PIEZAS CÓNICAS.

■ 54 - 62

ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF MEASUREMENT IN THE DIMENSIONAL CONTROL OF CONICAL PARTS.

Mauricio D. Chiliquinga M.¹, Edison D. Mañay Ch.²

EFECTO DE AVANCE AL ENCENDIDO Y TIEMPO DE INYECCIÓN DE UN SWAP DE MOTOR SERIE B A 2800 MSNM UTILIZANDO ELECTRÓNICA PROGRAMABLE PARA MEJORAR LA POTENCIA.

■ 63 - 71

EFFECT OF THE IGNITION TIMING ADVANCE AND INJECTION TIMING OF A SERIE B SWAP ENGINE AT 2800 MSNM USING PROGRAMMABLE ELECTRONICS TO IMPROVE THE POWER.

David Arturo Del Castillo Freire¹, Jorge Fernando Suárez Aimacaña²

ANÁLISIS MECÁNICO ESTRUCTURAL DE PROTOTIPO PARA REHABILITACIÓN EN ADULTOS MAYORES CON PROBLEMAS DE TENDINITIS.

■ 71 - 77

STRUCTURAL MECHANICAL ANALYSIS OF PROTOTYPE FOR REHABILITATION IN OLDER ADULTS WITH TENDINITIS PROBLEMS

Luis V. Gallo¹, Willam W. Tumbaco², Luis. E. Toapaxi³, Marco A. Pilatasig⁴, Pablo O. Mena⁵

DECAIMIENTO ALFA: UNA REVISIÓN A LA TEORÍA DE GEORGE GAMOW

■ 78 - 87

ALPHA DECAY: A REVIEW OF GEORGE GAMOW'S THEORY

José Guillermo Trujillo Jaramillo¹, Edison Ramiro Acurio Armas², José Ignacio Trujillo Galarza³



PRESENTACIÓN

REVISTA ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO

Es una publicación de difusión científica de periodicidad anual con ISSN 1390 – 7395, que relaciona el área de Ciencias de la Ingeniería y Profesiones afines. Pertenece a la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE , Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, El Grupo de Investigación SAEM R&D, que permite difundir trabajos de investigación de profesionales internos y externos con temáticas relacionadas a: Diseño y mecánica computacional, procesos de manufactura, mecánica de sólidos, energía y termofluidos, sistemas automotrices, petroquímica y mecatrónica, a través de temas de interés, relevancia y actualidad tecnológica. Dispone de un comité editorial conformado por personal interno y externo, así como de un amplio grupo de profesionales que realizan la función de revisores que permiten seleccionar la información a ser difundida a través de la revisión por pares.





“La tecnología no es nada. Lo importante es que tengas fe en la gente, que sean básicamente buenas e inteligentes, y si les das herramientas, harán cosas maravillosas con ellas” .-Steve Jobs.

La virtud que conduce para alcanzar metas es la constancia, es este concepto que se evidencia en la décima edición de la revista de difusión científica ENERGÍA MECÁNICA, INNOVACIÓN Y FUTURO, que a través del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, se presenta a la comunidad universitaria y científica.

Se observa la participación activa de docentes y la de articulistas invitados que contribuyen a fortalecer esta publicación, la cual comparte trabajos de investigación en diversas áreas del conocimiento relacionados con la ciencias de la ingeniería y profesiones afines, buscando permanentemente la mejora continua en este interesante proceso de enseñanza aprendizaje que contribuyan al desarrollo del país, dar a conocer las experiencias adquiridas sobre diversos asuntos como: materiales usados en la industria, energías alternativas, sistemas automotrices, mecatrónicos, diseño de materiales así como la implementación de normas técnicas implementadas en la industria.

Quiero dejar constancia del reconocimiento por el trabajo tesonero, esfuerzo y perseverancia de todas las personas que han permitido materializar la decima edición de esta revista científica.

Ing. Dielo Ivanovich Jiménez C. MGS.

TCRN. de E.M.

Director





La X edición de la Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, realiza la difusión de trabajos de investigación con el aporte de profesionales de la academia con temas relevantes a las áreas de ciencias de la ingeniería y profesiones afines.

Las publicaciones son seleccionadas en base al procedimiento establecido los mismos que tienen calidad científica y tecnológica generada en la comunidad académica y el Grupo de Investigación SAEM R&D, lo que da como resultado la producción de material de interés y consulta para profesionales, estudiantes de las carreras de ingeniería automotriz, mecánica, mecatrónica, petroquímica y relacionadas a estos campos del saber.

A través de un proceso riguroso de revisión y selección se han considerado temas relevantes como procesos de fabricación, energías alternativas, análisis mecánico computacional, materiales en la industria automotriz, sistemas automotrices, procesos mecatrónicos así como trabajos de investigación de innovación en las áreas de ingeniería y profesiones afines.

La motivación permanente a la colectividad y a la comunidad académica nacional e internacional para contribuir con publicaciones y su difusión a través de esta publicación de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, al Grupo de Investigación SAEM R&D para continuar innovando con excelencia.

Ing. Germán Erazo Laverde MSc.

Editor



***NÓMINA DE PROFESIONALES QUE COLABORARON COMO PARES DE REVISIÓN
EN LA V EDICIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO***

Ing. Celin Abad Padilla Padilla Msc.	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Ing. Juan Carlos Rocha Hoyos MSc.	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
MSc. Luis Tipanluisa PhD (c)	Escuela Superior Politécnica de Chimborazo
Ing. Pedro Moreno MSc.	Instituto Superior Tecnológico Central Técnico
MSc. Sebastián Puma PhD (c)	Instituto Tecnológico de Monterrey, México
Ing. Abel Remache MSc.	Universidad Central del Ecuador
Ing. Flavio Arroyo Morocho MSc.	Universidad Central del Ecuador
Ing. Alex Santiago Cevallos Carvajal	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Ing. Alexandra Corral Díaz MSc.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Ing. Leonidas Antonio Quiroz MSc.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Ing. Luis Antonio Mena Navarrete MSc.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Ing. Marco Adolfo Singaña Amaguaña MSc.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Ing. Mario Polibio Jiménez León	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Ing. Víctor Danilo Zambrano León MSc.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
Ing. Wilson Marcelo Román Vargas Mg.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
PhD. Julio César Pino Tarragó	Universidad Estatal del Sur de Manabí
Ing. Daniela Alexandra Jerez Mayorga MSc.	Universidad Internacional del Ecuador
Ing. Juan José Castro Mediavilla MSc.	Universidad Internacional del Ecuador
Ing. Julio César Leguísamo MSc.	Universidad Internacional SEK del Ecuador
Ing. Edwin Homero Moreano Martínez MgC.	Universidad Técnica de Cotopaxi
PhD. Héctor Luis Laurencio Alfonso	Universidad Técnica de Cotopaxi
Ing. Fredy Rosero Obando MSc.	Universidad Técnica del Norte
Ing. Ramiro Rosero MSc.	Universidad Técnica del Norte
Cristian Laverde Albarracín MSc.	Universidad Técnica Estatal de Quevedo



CONFIGURACIÓN DE PROPULSIÓN DE LOS VEHÍCULOS CONVENCIONALES, HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS.

PROPULSION CONFIGURATION OF CONVENTIONAL, HYBRID AND ELECTRIC VEHICLES.

Brian Daniel Vélez Salazar¹

¹Instituto Superior Universitario Central Técnico

e-mail : bvelez@istct.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 1 (09)

Resumen

El crecimiento de la conciencia medioambiental a nivel mundial ha influenciado a los diferentes aspectos del ser humano, siendo uno de ellos la movilidad; esperando así, que los vehículos utilizados sean lo más eficiente posibles en el uso de la energía, por lo cual, el presente trabajo se concentra en uno de los componentes principales de los vehículos como lo es el tren de propulsión, el cual varía en función del tipo de vehículo, y de las características que requiere cada una de las tecnologías implementadas para el aprovechamiento de la energía. El desarrollo muestra las características principales de los distintos sistemas de propulsión existentes, lo cual permitirá al lector obtener un conocimiento especializado sobre las variaciones que pueden tener los vehículos y en un determinado momento constituirse en información relevante para optar por un tipo específico de vehículo acorde a las necesidades pudiendo ser del tipo ICV, BEV, HEV, PHEV o FCEV.

Palabras Clave: Propulsión, engranajes, eficiencia, híbrido, energía.

Abstract

The growth of environmental awareness worldwide has influenced the different aspects of the human being, one of them being mobility; Thus, hoping that the vehicles used are as efficient as possible in the use of energy, therefore, the present work focuses on one of the main components of the vehicles, such as the propulsion train, which varies depending on the type of vehicle, and the characteristics required by each of the technologies implemented for the use of energy. The development shows the main characteristics of the different existing propulsion systems, which will allow the reader to obtain specialized knowledge about the variations that vehicles can have and at a certain moment become relevant information to choose a specific type of vehicle according to the needs can be of the ICV, BEV, HEV, PHEV or FCEV type.

Keywords: Propulsion, gears, efficiency, hybrid, energy.

1. Introducción

A nivel mundial, el sector transporte es considerado como uno de los mayores consumidores de energía, sin ser la excepción el Ecuador, que según [1] en el año 2020, el 45,4% de la energía total consumida en el país se debe a este rubro, que a su vez, constituyeron 37.744 kBEP (Miles de barriles equivalentes de petróleo), concentrada en combustibles como son las gasolinas y el diesel, que tras la combustión en los motores de los vehículos se aprovecha un 30% de la energía convertida en movimiento en el mejor de los casos y el resto de la energía no aprovechada, se disipada en forma de calor y en forma de gases combustionados que son expulsados al ambiente.

La producción de gases nocivos para el medio ambiente y para la salud de las personas se ha convertido en un tema central de discusión de muchos gobiernos, y de la industria automotriz que con la finalidad de mejorar el aprovechamiento de la energía y reducir la contaminación que los vehículos producen, se ha ido creando varios tipos de vehículos con diferentes elementos que buscan ser más amigables con el medio ambiente, teniendo así:

- BEV → Vehículo eléctrico de baterías
- HEV → Vehículo híbrido eléctrico.
- PHEV → Vehículo híbrido eléctrico enchufable.
- FCEV → Vehículo eléctrico de celdas de energía.
- ICV → Vehículo de combustión interna.

El desarrollo del presente trabajo se centrará en la revisión de los diferentes tipos de trenes de propulsión o tren motriz de los vehículos, con la finalidad de conocer sus elementos constitutivos, la forma de operación y las diferentes características de estos incluida la eficiencia de cada uno.

2. Desarrollo

A. Vehículo eléctrico de baterías BEV (Battery Electric Vehicle)

Vehículo propulsado por uno o varios motores eléctricos que transforman la energía química almacenada en bloques de baterías a energía mecánica que se puede distribuir a las ruedas por un sistema de transmisión o engranajes para el movimiento del vehículo. Consta de tres subsistemas para su adecuado funcionamiento, primero el almacenamiento de

energía consta de fuente de energía, unidad de gestión de energía y unidad de carga [2], segundo la propulsión que se compone de motor eléctrico, el convertidor electrónico de potencia, el controlador, la transmisión y las ruedas, y el de auxiliares se compone de controlador de temperatura, de dirección asistida y una fuente de energía auxiliar, en la fig. 1 se puede observar el flujo de interacción de los subsistemas, y si se considera flujo inverso de energía ayuda al frenado regenerativo para recuperarla [3].

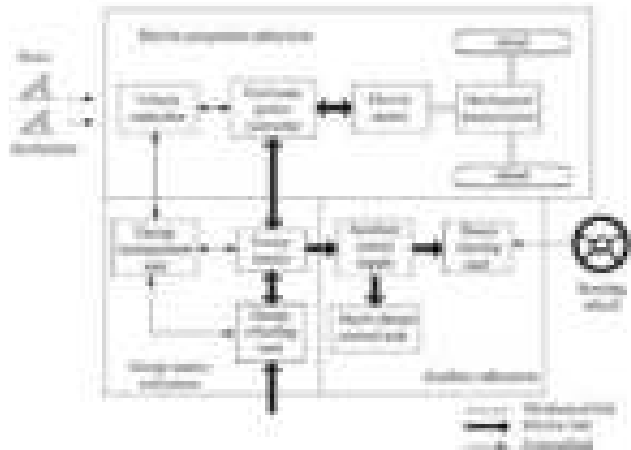


Figura 1. Subsistemas de un BEV [4]

Para los vehículos eléctricos de batería su autonomía se ve afectada por la manera de conducir, las condiciones climáticas y geográficas, su longevidad y el tipo de batería, el principal problema es el almacenamiento ya que el tiempo de carga de las baterías continúa siendo considerable nada comparable a completar combustible a un tanque.

B. Vehículos híbridos eléctricos HEV (Hybrid Electric Vehicles)

Se considera como un vehículo híbrido eléctrico aquel que funciona a partir de dos o más fuentes de energía diferentes, sin embargo, en la gran mayoría de vehículos se disponen de únicamente dos fuentes de energía, siendo por un lado la proveniente de combustibles fósiles y transformada por un motor de combustión interna y por otro lado energía eléctrica almacenada y transformada por medio de un motor eléctrico. Entre los objetivos principales de un vehículo eléctrico se encuentra el ser más eficiente con respecto al consumo de combustible fósil y menos contaminante que un vehículo que únicamente tiene un motor de combustión interna.

Con la finalidad de mejorar la eficiencia del vehículo híbrido [7] se debe procurar tener un buen

diseño y operación de sus diferentes componentes y uno de los más importantes constituye el tren de propulsión híbrida-eléctrica que según [4] debe tener características destacadas en:

- Potencia suficiente para mover el vehículo.
- Energía suficiente acorde a distancias determinadas de desplazamiento.
- Alta eficiencia.
- Baja emisión de gases contaminantes.

Se considera existen 4 tipos principales de trenes de propulsión asociados a estos vehículos acorde a la literatura mostrada por [4] - [6].

1) *Tren de propulsión híbrido serie*: El tren de propulsión tipo híbrido serie se podría considerar como el más simple de todos, el cual consiste en la conexión directa del motor de combustión interna a un generador eléctrico, el mismo que provee energía para cargar las baterías y para alimentar al motor eléctrico, que, a su vez, es el que realiza el movimiento de las ruedas a través de una transmisión mecánica; como se puede apreciar en el fig. 2.

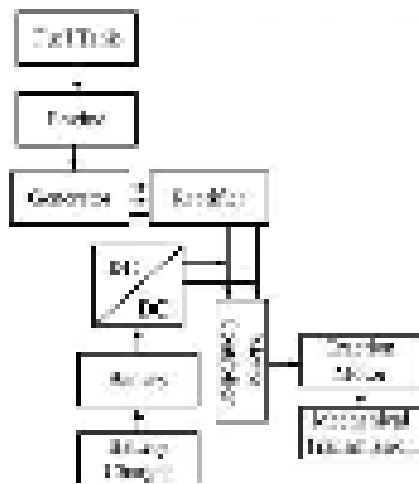


Figura 2. Propulsión serie del HEV

2) *Tren de propulsión híbrido paralelo*: Esta configuración acopla el motor eléctrico y el motor de combustión a transmisión para transmitir el movimiento a las ruedas, por medio del funcionamiento de cualquiera de ellos o los dos al mismo tiempo, dependiendo del requerimiento de vehículo. La fig. 2. muestra gráficamente lo descrito en el presente párrafo.

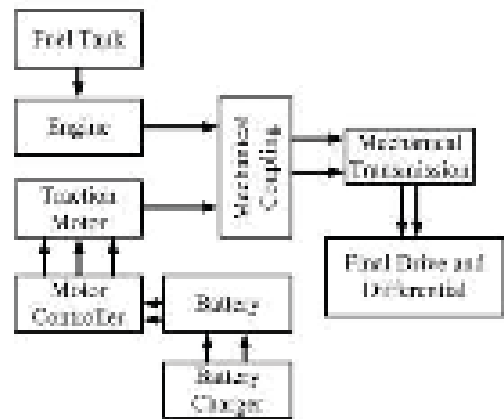


Figura 3. Propulsión paralela del HEV

3) *Tren de propulsión híbrido serie-paralelo*: Este sistema surge a partir de la unión de los sistemas serie y paralelo como su nombre lo indica y se logra tras incluir un enlace mecánico adicional que combina las fuentes de movimiento mecánica por medio de un conjunto de engranajes planetarios en un primer sistema como se aprecia en la fig.4, el cual fue simplificado mediante un motor de estator flotante llamado transmotor o transeje, cuyo diagrama se puede apreciar en la fig. 5.

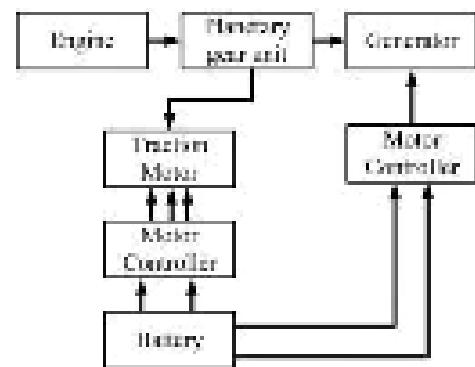


Figura 4. Sistema con engranajes planetarios

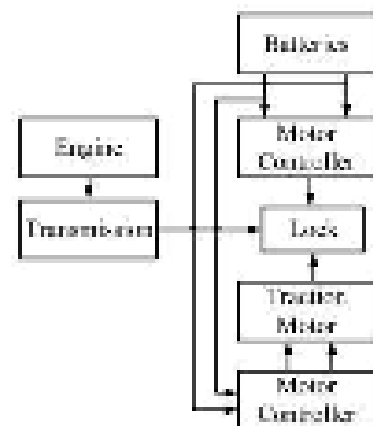


Figura 5. Sistema con transmotor o transeje

4) *Tren de propulsión híbrido complejo:* Se considera como un sistema con grandes diferencias con respecto al tren de propulsión híbrido serie-paralelo, debido a que permite el flujo de potencia mecánica de forma bidireccional.

Debido a la complejidad del acoplamiento mecánico se podría usar una transmisión continua variable o CVT (Constantly variable transmission), la cual, puede ser controlada a través de mecanismos hidráulicos, mecánicos, hidro-mecánicos o electromecánicos. Este sistema también se lo conoce como e-CVT, cuyo diagrama se muestra en la fig. 6. La fig. 7. muestra la estructura del sistema complejo usado en un vehículo 4x4.

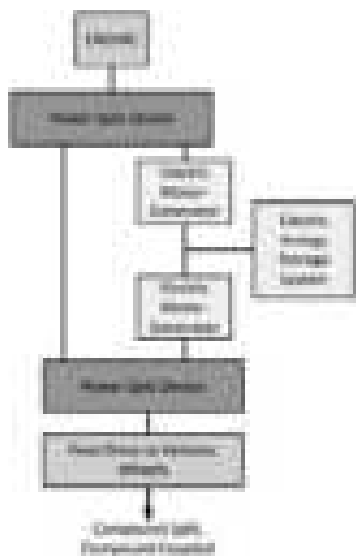


Figura 6. Sistema híbrido complejo

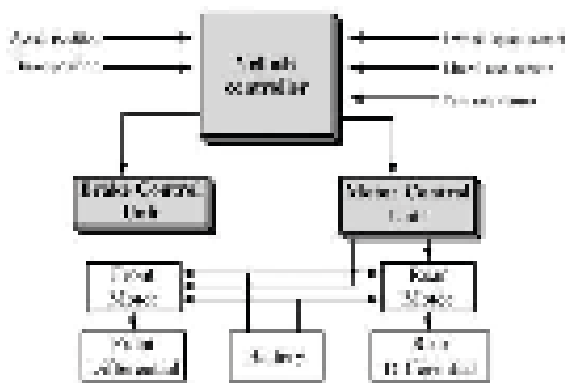


Figura 7. Sistema híbrido complejo 4x4

C. Vehículo híbrido eléctrico enchufable PHEV (Plug-in Hybrid Vehicle)

El vehículo híbrido eléctrico enchufable por sus siglas en inglés (Plug-in Hybrid eléctrico Vehicle) es la combinación de un motor de combustión interna

(MCI) alimentado por combustibles fósiles y un motor eléctrico que lleva como fuente de alimentación una batería de alto voltaje. Los encargados de dar la propulsión al vehículo son el motor de combustión interna y/o el motor eléctrico de acuerdo con el modo en el que se encuentre el vehículo. Se alimentan de dos fuentes exteriores de energías, provenientes de los combustibles derivados del petróleo como la gasolina y el diésel que permiten mover el motor térmico y, de la electricidad que es proporcionada por la red que permite recargar la batería. Es básicamente un vehículo híbrido con una la capacidad de enchufarlo a la red eléctrica, lo que elimina la dependencia del motor de combustión interna para la carga de las baterías como ocurre en los vehículos híbridos convencionales. [7]

Desde el punto de vista del cuidado del medio ambiente y sostenibilidad, se añade la gran ventaja del vehículo híbrido enchufable de que se puede cargar con electricidad proveniente de fuentes renovables como son fuentes eólicas o solares, facilitando la inserción de estas fuentes en el sector transporte y ayudando de esta manera a incrementar la eficiencia energética y en consecuencia a disminuir las emisiones que contaminan el medio. Además, que su carga habitual será a horas de descanso del usuario, es decir por lo general en las noches, hora en que la electricidad en la mayoría de los países disminuye su costo [8].

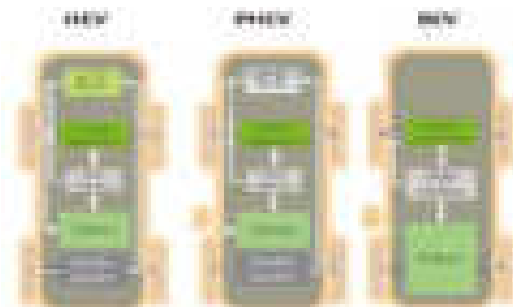


Figura 8. Diferencias entre los tipos de vehículos eléctricos [9]

Los vehículos híbridos enchufable cuentan con la gran ventaja que, al tener los dos motores como propulsores de estos, se equilibra la dependencia de combustibles fósiles y de electricidad, aumentando su autonomía. En la Fig. 8 se puede observar cómo aumentando la parte eléctrica también aumentamos el porcentaje de hibridación, y mientras aumenta la tasa de hibridación el golpe al medio ambiente disminuye, y a su vez la complejidad de los sistemas como son los conosces, acoplamientos, repartición de energía, entre otros caen aumento hasta eliminar por completo la presencia de un motor térmico [9].

D. Vehículo eléctrico de celdas de energía FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle)

1) *Pila de combustible:* Para comprender de mejor manera este tipo de propulsión eléctrica es necesario conceptualizar lo que es una pila de combustible, por lo que podemos decir que la misma es la encargada de transformar mediante un proceso electroquímico la energía que produce un combustible como puede ser la gasolina o en ciertos casos hidrogeno en una energía eléctrica. [13] Existen aproximadamente 6 tipos de pila de combustible, sin embargo, la más utilizada es la de membrana de intercambio protónico (PEMFC) en donde el combustible utilizado es el hidrogeno como se puede observar en la Fig. 20 en donde se puede apreciar que para que esta pila funcione es necesario que se suministre a la misma hidrogeno (H₂) y oxígeno (O₂), y se obtiene como salida una fuente de energía eléctrica y agua (H₂O), esta última es también es utilizada para mantener la membrana humectada [14].

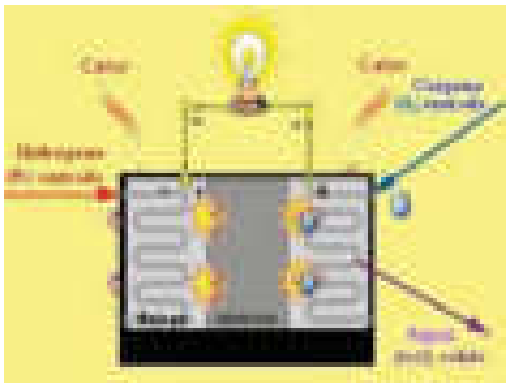


Figura 9. Esquema de la pila de membrana de intercambio protónico.

Las pilas PEMFC son ideales para ser utilizadas en vehículos de transporte eléctrico y marcas como BMW, Ford, Honda las han utilizado para la construcción de los mismos, ya que trabajan a temperaturas que oscilan entre los 60-120°C los cual son relativamente bajas en comparación con otro tipo de pilas, además de que su rendimiento energético puede llegar a alcanzar hasta un 50%, otra de las ventajas de este tipo de pilas es que no solo pueden ser utilizadas con hidrogeno como combustible principal, sino que también pueden ser alimentadas con metanol, aunque con este componente la eficiencia se ve mermada [15].

Además, es necesario tomar en cuenta que las pilas de hidrógeno son muy superiores a otros generadores de energía ya que pueden llegar a producir hasta 33kwh por kg consumido, a diferencia del gas natural

o el petróleo que únicamente generan 13.9kwh y 12.4kwh respectivamente, además del hecho de que reduce drásticamente las emisiones de CO₂ ya que como se analizó anteriormente el único compuesto que va a producir a la salida sería agua [16].

2) *Tren de propulsión:* Tal y como se puede apreciar en la Fig. 10. la pila de combustible genera un pequeño voltaje el cual es aprovechado por medio de dos convertidores DC/DC. El primer convertidor es utilizado para suministrar el voltaje necesario a los sistemas auxiliares del vehículo mientras que el segundo convertidor transfiere el voltaje de corriente continua a la entrada del inversor AC/DC [17]. El inversor es el encargado de convertir la corriente continua en corriente alterna, esta corriente es la que posteriormente será utilizada por el motor eléctrico.

Adicionalmente el sistema cuenta con una batería externa la cual de igual manera es cargada con la ayuda de los dos convertidores DC/DC y además la misma también se recarga cuando los motores eléctricos se transforman en generadores y producen corriente alterna, la cual es transformada a corriente continua con ayuda del inversor.

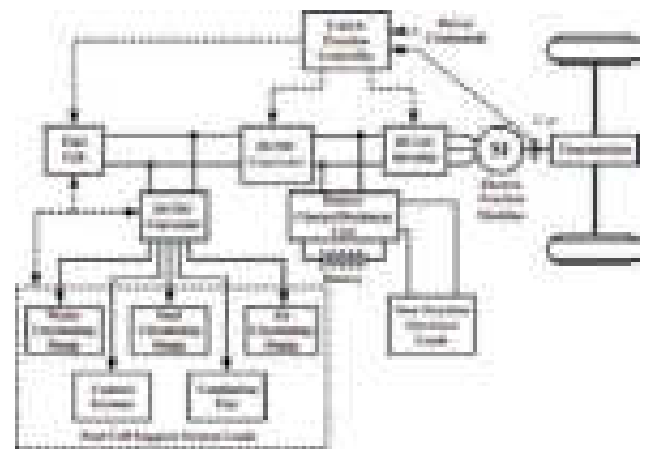


Figura 10. Tren de potencia de un vehículo eléctrico con pila de combustible.

Existe otro tipo de conexión para el tren de potencia utilizado en vehículos eléctricos, el cual se muestra en la Fig. 11, este esquema posee una conexión más simple con respecto a la anterior ya que el mismo no posee ningún tipo de convertidor DC/DC, sino que por el contrario la corriente generada tanto por la pila de hidrógeno como por la batería ingresa directamente al inversor, cabe recalcar que en esta configuración los dos generadores de corriente se encuentran conectados en paralelo [18].

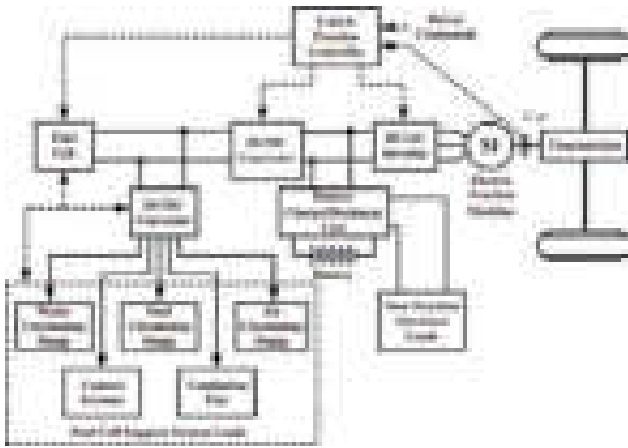


Figura 11. Tren de potencia simple de un vehículo eléctrico con pila de combustible.

E. Vehículo de combustión interna ICV (Internal Combustion Vehicle)

1) *Tipos de motores de combustión interna:* Los motores de combustión interna utilizados en vehículos de pasajeros son generalmente de cuatro tiempos y existen principalmente de dos tipos: los de encendido provocado y los de encendido por compresión.

- Motores de encendido provocado

A este tipo también se le conoce como motor Otto o de encendido por chispa, y toman este nombre debido a la forma en la que se produce la combustión dentro del cilindro, ya que en el interior del mismo ingresa una mezcla de aire-combustible, dicha mezcla en el proceso de compresión incrementa su presión y temperatura a volumen constante, tal y como se indica en la Fig. 12 y por medio de un salto de chispa provocado por un componente denominado como bujía esta mezcla se combustiona, iniciando así su proceso de trabajo [19].

- Motores de encendido por compresión

A este tipo más popularmente se le conoce como motores Diésel, y es que el tipo de combustible que utiliza es una de las principales diferencias con respecto a la de encendido provocado, además de que aquí al cilindro únicamente ingresa aire el cual se calienta a presión constante en el ciclo de compresión como se puede ver en la Fig. 13, es por este motivo que este tipo de motores ya no poseen bujía ya que la explosión en el cilindro se produce únicamente al inyectar cierta cantidad de Diésel pulverizado dentro de la cámara de combustión donde ya se encuentra el aire a una alta presión y temperatura [19].

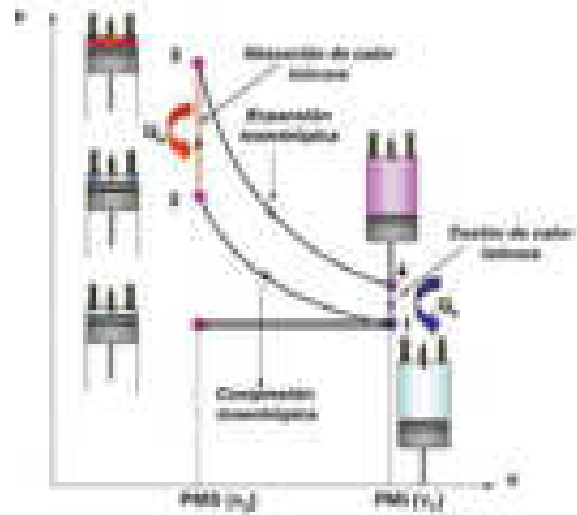


Figura 12. Diagrama de un motor de encendido provocado.

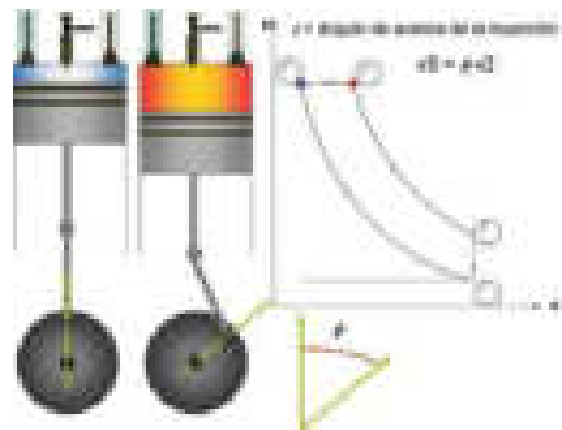


Figura 13. Diagrama de un motor de encendido por compresión.

2) *Tren de propulsión de los vehículos convencionales:* El tren de propulsión de un motor de combustión interna posee 7 componentes principales los cuales como se puede observar en la Fig. 14 son: motor, embrague, transmisión, eje de transmisión, diferencial, camisas de ejes y ejes [20].

- Motor

Es el encargado de transformar la energía química de la mezcla de aire-combustible en energía mecánica la cual se expresa a través de la potencia y el torque.

- Embrague

Es el elemento que se encuentra entre el motor y la transmisión, consta de dos componentes que son el disco y el plato de embrague los cuales cuando se unen entre ellos para permitir trasladar hacia el sistema de transmisión la potencia y el torque generado por el motor de combustión interna.

- Transmisión

Es la encargada mediante las diferentes relaciones de engranajes que podemos encontrar dentro de una transmisión, regular e incluso invertir las revoluciones por minuto generada por el motor de combustión de esta manera podemos obtener ya sea mayor torque o mayor velocidad del vehículo según las necesidades encontradas. [21]

- Eje de transmisión

Es el que se encarga de trasladar la potencia de salida desde la transmisión hacia el diferencial, se puede decir que este elemento es de conexión y está constituido por más elementos como son las denominadas juntas cardan.

- Diferencial

Es un elemento mecánico muy importante ya que el mismo permite que en una curva las ruedas giren a distintas velocidades en una curva según el vehículo lo necesite. Esto lo debe realizar debido a que en una curva la rueda más alejada a la curva debe realizar un mayor recorrido en comparación a la que se encuentra más cercana a la curva, para realizar esta acción de una manera adecuada el diferencial cuenta con una serie de componentes como son: cono, corona, satélites y planetarios [22].

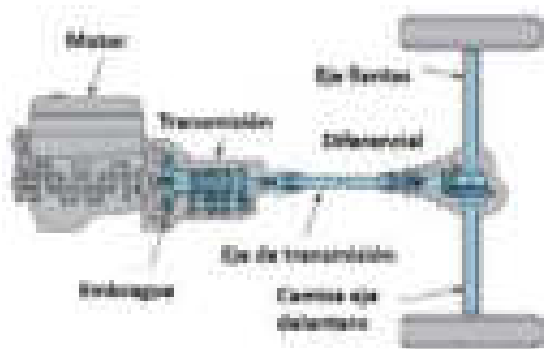


Figura 14. Componentes del tren de potencia de un vehículo convencional.

3. Conclusiones

El tren de propulsión de un vehículo constituye un pilar fundamental dentro de la búsqueda de alcanzar altas eficiencias de funcionamiento, no siendo la excepción el caso de los vehículos eléctricos.

Las investigaciones realizadas por algunas marcas han permitido el desarrollo de diferentes trenes de propulsión con mejores características operativas, conduciendo a que el vehículo tenga una menor huella de carbono.

La literatura muestra que debido al peso adicional que tiene los vehículos híbridos se incrementa su huella de carbono, ya que sigue utilizando un motor de combustión interna como fuente de energía.

Se evidencio que actualmente el tipo de propulsión más sencillo constituye el sistema más eficiente, siendo este, el utilizado por los vehículos eléctricos a baterías y que poseen el motor, el inversor y la transmisión.

Los vehículos que generan energía a través de las celdas de hidrógeno se podría considerar poseen alta eficiencia de funcionamiento, y podrían llegar a complementar en un futuro a los vehículos de baterías BEV, en el caso de poder reducir los costos de los convertidores de energía, pudiendo así, extender los rangos de autonomía.

Los vehículos con pila de combustible por membrana de intercambio protónico son ideales para el uso en vehículos de transporte ya que trabajan a relativamente bajas temperaturas y generan una alta eficiencia energética que puede llegar a ser hasta del 50%.

4. Referencias

- [1] I. de Investigación Geológico y Energético IIGE, "Balance energético nacional 2020," Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, Informe 2020, agosto 2021.
- [2] J. M. L. Martínez, Vehículos híbridos y eléctricos: diseño del tren propulsor. Dextra Editorial, 2015. [Online]. Available: <https://elibro.net/es/lc/uta/titulos/131530>
- [3] C. Chan, "The state of the art of electric and hybrid vehicles," Proceedings of the IEEE, vol. 90, no. 2, pp. 247–275, 2002.
- [4] M. Ehsani, Y. Gao, S. Longo, and K. M. Ebrahimi, Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles. CRC press, 2018.
- [5] M. Sato, G. Yamamoto, D. Gunji, T. Imura, and H. Fujimoto, "Development of wireless in-wheel motor using magnetic resonance coupling," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 31, no. 7, pp. 5270–5278, 2016.

- [6] L. A. Kumar and S. A. Alexander, *Power Converters for Electric Vehicles*. CRC Press, 2020.
- [7] J. P. Navarro, “Análisis técnico-económico del vehículo eléctrico y las estaciones de recarga,” TERUEL, 2012.
- [8] E. D. L. E. E. EL and T. R. MOTORIZADO, “2.2 modelo de negocio de fabricantes del automóvil,” JORGE RODRÍGUEZ LLUVA TRABAJO DE FIN DE GRADO GRADO DE INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES, p. 8, 2019.
- [9] A. Falcón Concepción et al., “Análisis comparativo de coste-eficiencia entre vehículos convencionales y de energías alternativas en sistemas aislados: el caso de canarias.” 2018.
- [10] S. D. Roa Melo et al., “Diseño del tren motriz de un vehículo híbrido todoterreno,” B.S. thesis, Uniandes, 2011.
- [11] M. Garmendia, “Vehículo comercial híbrido serie-paralelo,” 2007.
- [12] M. Rodríguez, J. Bohórquez, and A. E. Díaz, “Estudios sobre el desempeño de vehículos eléctricos dependiendo de la arquitectura de su sistema de tracción,” PhD. dissertation, Thesis, Univ. Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2015 [en línea . . . , 2015.
- [13] E. G. Campana, “Gestión energética para flotas de vehículos eléctricos e híbridos con pila de combustible,” PhD. dissertation, Universidad Politécnica de Madrid, 2019.
- [14] W. E. Agila, E. Villanueva, L. González, M. A. Rubio, D. Guinea, and E. Cotillas, “Instrumentación y control de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico (pemfc) de 500w,” 2003.
- [15] J. C. Ruiz-Morales, J. P. Martínez, D. M. López, D. P. Coll, P. F. N. Coello, B. B. Pérez, J. C. Vázquez, and P. Gómez-Romero, “Pilas de combustible,” in *Anales de la Real Sociedad Española de Química*, no. 3. Real Sociedad Española de Química, 2006, pp. 22–30.
- [16] P. Asensio, “Hidrógeno y pila de combustible,” Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid [en línea]. Disponible en: <http://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/cuadernos-energias-renovables-paratodos-hidrogeno-y-pila-de-combustible.pdf> [última consulta: 22 diciembre 2014], 2007.
- [17] S. Emadi, A y Williamson, “Vehículos de pila de combustible: oportunidades y desafíos,” in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2004., 2004, pp. 1640–1645.
- [18] H. Das, C. Tan, and A. Yatim, “Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 76, pp. 268–291, 2017, cited by 184. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85015384772&doi=10.1016%2fj.rser.2017.03.056&partnerID=0&md5=7abd9218d19c48dc951b97c78b1e2da8>
- [19] R. D. A. A. Jose' and M. D. Marta, *Motores de combustión interna*. Editorial UNED, 2015.
- [20] D. C. Suescun Vera et al., “Diseño de una arquitectura de tren de potencia para convertir un vehículo con motor de combustión interna en un vehículo eléctrico,” B.S. thesis, Uniandes, 2017.
- [21] L. ANCHATIPAN and E. DAVID, “Implementación del tren de potencia y sistema de transmisión para un vehículo biplaza tipo buggy para la carrera de tecnología superior en mecánica automotriz de la unidad de gestión de tecnologías espe.”
- [22] E. A'GUEDA CASADO, T. GOMEZ MORALES, and J. MARTÍN NAVARRO, *Sistemas de transmisión de fuerzas y trenes de rodaje*. Editorial Paraninfo, 2012.

5. Biografía



¹Brian Daniel Vélez Salazar, Ingeniero Automotriz Maestrante en Sistemas de Propulsión Eléctrica en la Universidad Técnica de Ambato. Docente en la carrera de Tecnología superior en Mecánica Automotriz del Instituto Superior Universitario Central Técnico.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	26 abril 2021
Fecha aceptación	13 junio 2021

DESARROLLO DE LOS MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA EN EL CAMPO AERONÁUTICO

DEVELOPMENT OF MATERIALS AND MANUFACTURING PROCESSES IN THE AERONAUTICAL FIELD

José Trujillo Jaramillo¹, Edison Acurio Armas², Rodrigo Bautista Zurita³

¹Escuela Técnica de la Fuerza Aérea, Latacunga, Ecuador

²Unidad de Gestión de Tecnologías. Mecánica Aeronáutica Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, Latacunga, Ecuador
jgtrujillo¹@espe.edu.ec , ²eracurio@espe.edu.ec, ³rcbautista@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 2 (09)

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo establecer una visión global de la evolución del desarrollo de Materiales y Procesos de Manufactura dentro del campo Aeronáutico. Los actuales constructores de partes y componentes de aeronaves, enfrentan grandes desafíos de presentar plataformas aeronáuticas con mayor eficiencia, en la cual sus materiales permitan mejorar sus propiedades y rendimiento mientras que sus procesos de manufactura o fabricación sean sencillos y versátiles para poder generar mecanismos complejos con formas aerodinámicas.

El reconocimiento, identificación, selección de los materiales y procesos de manufactura son muy importantes en el campo de la ingeniería, en razón de que estos aportan la información necesaria y pertinente en las etapas de diseño, manufactura, mantenimiento de lo que se va a construir y de esta manera evitar posibles fallos mecánicos y estructurales en las aplicaciones aeronáuticas y aeroespaciales.

Palabras Clave: Materiales Aeronáuticos, Procesos de Manufactura, Plataformas Aeronáuticas y Aeroespaciales, Fallos estructurales.

Abstract

The present work aims to establish a global vision of how the development of Materials and Manufacturing Processes has evolved within the Aeronautical field. The current constructors of parts and components of aircraft, face great challenges to present aeronautical platforms with greater efficiency, in which their materials allow to improve their properties and performance while their manufacturing or manufacturing processes are simple and versatile to be able to generate complex mechanisms with aerodynamic shapes.

The recognition, identification, selection of materials and manufacturing processes are very important in the field of engineering, because they provide the necessary and relevant information in the stages of design, manufacture and maintenance of what is going to be built and in this way avoid possible mechanical and structural failures in aeronautical and aerospace applications.

Keywords: Aeronautical materials, Manufacture process, Aeronautical and Aerospace Platforms, Structural failures.

1. Introducción

El ser humano siempre tuvo el sueño de volar y conquistar el cielo, es por esto que desde que se construyeron los primeros ingenios aeronáuticos, a inicios del siglo XX hasta la actualidad, sus diseñadores han utilizado diversos materiales tales como tela, madera, metales, polímeros, cerámicos, materiales compuestos y nanomateriales para su fabricación [1]. La industria aeronáutica está investigando constantemente y buscando el desarrollo de materiales innovadores, con el objetivo de crear aeronaves que sean más rápidas, ligeras y eficientes.

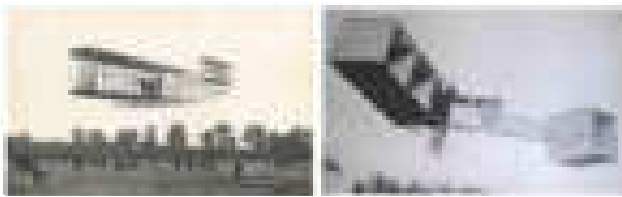


Figura 1. Primeros ingenios aeronáuticos
Fuente: <https://historiaybiografias.com>

Estos materiales deben cumplir con ciertos requisitos tales como: ser livianos, tener alta resistencia mecánica, soportar corrosión, altas temperaturas y condiciones ambientales severas, por lo que los científicos han generado nuevas investigaciones para fabricar nuevos materiales con propiedades mejoradas [2].



Figura 2. Evolución de los materiales en el campo aeronáutico

Las piezas y componentes de la Industria aeronáutica, se pueden dividir en cuatro grupos:

- Fuselaje: Estructuras que incluyen alas, superficies de control, timones traseros.
- Motores: motores, turbinas y turbofans.
- Estructurales y Sistemas: Tren de aterrizaje, fijaciones y sujeciones del motor, puertas.
- Interior, acabados y detalles: asientos, paneles de plástico, aviónica y comodidad electrónica [3].

PLATAFORMAS AERONÁUTICAS	FUSELAJE	MOTORES	INTERIORES
MATERIALES COMPLETOS	Aluminio, Kevlar, Carbono, Fibra de carbono, GFRP, CFRP, CFRP, CFRP	Aluminio, Inconel, Titanio, Titanio, Titanio, Titanio	Aluminio, Kevlar, Carbono, GFRP, CFRP, CFRP, CFRP
PROCESOS DE FABRICACIÓN	Formado, Moldeo, Moldeo, Moldeo	Formado, Moldeo, Moldeo, Moldeo	Formado, Moldeo, Moldeo, Moldeo

Figura 3. Materiales y Procesos de Manufactura comunes en la Industria aeronáutica

Los fabricantes de motores de turbinas aeroespaciales se enfrentan a continuos desafíos para producir sistemas de propulsión con mayor eficiencia y menores emisiones. Para lograr estos objetivos, se están implementando tecnologías maduras en sistemas heredados, se están desarrollando materiales en evolución y tecnologías de procesos para su aplicación en sistemas de campo y de próxima generación, y se están desarrollando tecnologías revolucionarias de materiales y procesos para cambios radicales en los futuros sistemas de motores de turbina. (Green, 2009)

Numerosas investigaciones de las características mecánicas del material durante el funcionamiento de la turbina de gas revelan una gran acumulación de daños y la rápida degradación de sus propiedades. La degradación general es la disminución de la ductilidad, la resistencia, el límite de resistencia y, al mismo tiempo, el aumento de la velocidad de propagación de la fluencia y el agrietamiento, etc. Esto se refiere especialmente al material de los bordes de las cuchillas anterior y posterior. Las grietas y distorsiones generalmente aparecen solo en estos lugares, lo que limita la vida útil del motor. (Karpinos, 2013)

Por otro lado, empresas como Boeing, Airbus y General Electric, desarrollan procesos de manufactura y concentran su potencial principalmente en ingeniería y fabricación de aditivos metálicos de aluminio y titanio, una tecnología que permite generar partes impresas en 3D más ligeras y más fuertes para aplicaciones aeronáuticas. La impresión en 3D de estos tipos de componentes, implica una reducción drástica de los costes de fabricación, el impacto ambiental, los tiempos de producción y la masa.

Así mismo, los avances y técnicas manufactureras han permitido la construcción de partes y componentes

aerónauticos más grandes y complejos de fibra de carbono, kevlar, fibra de vidrio permitiendo de esta forma, tener más del 50% de las aeronaves fabricadas con materiales compuestos.

Los cerámicos como la berilia, alúmina, silicatos, carburos o nitratos, son utilizados principalmente como aislantes térmicos, sin embargo, una de las aplicaciones en las que este tipo de materiales es muy estudiado, es en la creación de aviones hipersónicos, en especial para el desarrollo de la nariz y de los bordes de ataque de las alas y superficies aerodinámicas. Las plataformas aeronáuticas o aeroespaciales que utilicen este tipo de materiales podrán alcanzar velocidades que bordean Mach 5 o superiores y altitudes muy grandes, resistiendo temperaturas que superan los 1000°C.

1. Materiales y procesos de manufactura

1.1. Materiales Metálicos

Aluminio: Las aleaciones de aluminio, dentro del sector aeronáutico son reconocidas por su elevada relación de resistencia a bajo peso, resistencia a la corrosión, conductividad térmica y eléctrica, flexibilidad, apariencia y facilidad de conformado y facilidad en los procesos de mecanizado.

Estas aleaciones se identifican mediante cuatro dígitos y en algunos casos seguidos por una designación de tratamiento térmico conocido como temple:

Tabla1: Codificación de aleaciones de aluminio

AL FAMILIARES DE ALUMINIO	
Aluminio puro 99.5 de pureza	1000
Aluminio aleado principalmente con cobre	2000
Aluminio aleado principalmente con magnesio	3000
Aluminio aleado principalmente con silicio	4000
Aluminio aleado principalmente con manganeso	5000
Aluminio aleado principalmente con magnesio y silicio	6000
Aluminio aleado principalmente con zinc	7000
Aluminio aleado con otros elementos (otro)	8000

Estas aleaciones, con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas y darles un endurecimiento estructural, son sometidas a una secuencia de tratamientos térmicos:

- Puesta en solución
- Temple
- Maduración natural a temperatura ambiente
- Revenido o maduración artificial

Primero se realiza una puesta en solución o solubilización, que es el proceso mediante el cual la aleación sube a una temperatura elevada y prolongada alrededor de los 530°C. Durante este tratamiento, los compuestos intermetálicos del tipo de Mg₂Si para las aleaciones de la serie 6XXX y Al₂Cu para las series 2XXX, se disuelven y la aleación se transforma en una solución líquida homogénea.

Posterior a este calentamiento, se procede a un temple que se trata de un enfriamiento muy rápido del metal ya sea por inmersión o ducha de agua fría.

Finalmente, después del temple, la solución sólida sobresaturada está en un estado estable consiguiendo de esta manera un endurecimiento estructural.

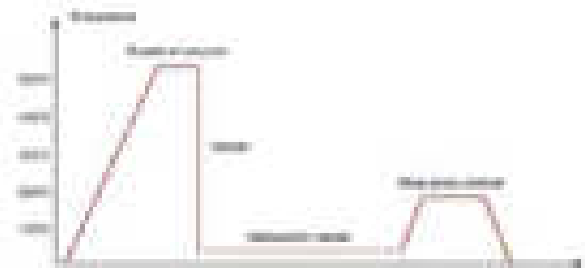


Figura 4. Tratamiento térmico de endurecimiento estructural del aluminio

Fuente: <http://www.alu-stock.es/tecnica/tratamientos>

El aluminio 2024, también llamado Aclad es una de las aleaciones más utilizadas en el sector aeronáutico en elementos de fijación (remaches, tornillos, pernos, lockbolts, hi-lock, taper-lock, tuercas) capaces concentrar las cargas concentradas y transferirlas. Laminado se utiliza en el fuselaje de la aeronave. Estos elementos deben poseer características como:

- Resistencia a la corrosión.
- Resistencia a la fatiga (Tracción y cortadura).
- Permeabilidad magnética (a ciertos equipos o sistemas de control)

La aleación de aluminio 6061 es muy dúctil y ligero, utilizada en estructuras tubulares en la mayoría de aeronaves experimentales como ultralivianos. Otras de sus aplicaciones son accesorios de aeronaves, pasadores de bisagras, pistones de freno y pistones hidráulicos. Esta aleación es ideal para trabajos con un buen acabado superficial, presenta facilidad de

maquinado, posee excelentes características para soldadura fuerte y al arco, además de no ser tóxico.

El aluminio 7075 o duraluminio es utilizado en vigas, uniones de estructuras, en la fabricación de fuselajes de ala delta o del área de militar, accesorios de aeronaves, engranajes, ejes, partes de misiles, tornillos sin fin, es perfecto para áreas en donde es necesaria una alta resistencia mecánica y además es:

- Resistente a la corrosión (sin embargo, es baja respecto a otras aleaciones).
- Resistencia a la fatiga.
- La relación resistencia-densidad es alta.
- Alta dureza.
- Alto índice de endurecimiento.

Adicionalmente existen remaches de aleación de aluminio de los siguientes tipos: aleaciones 1100, 5056, 2117, 2017 y 2024.

Los remaches de aleación 1100 se utilizan para el remachado de láminas de aleación de aluminio en las que es adecuado un remache de baja resistencia; en cambio los remaches de aleación 5056 se utilizan en la condición para remachar láminas de aleación de magnesio.

Los remaches de aleación 2117 tienen una resistencia moderadamente alta y son adecuados para remachar láminas de aleación de aluminio. Estos remaches reciben solo un tratamiento térmico, realizado por el fabricante, y se anodizan después de ser tratados térmicamente. No requieren más tratamiento térmico antes de ser utilizados. Los remaches de la aleación 2117 conservan sus características indefinidamente después del tratamiento térmico y se pueden accionar en cualquier momento. Los remaches hechos de esta aleación son los más utilizados en la construcción de aviones.

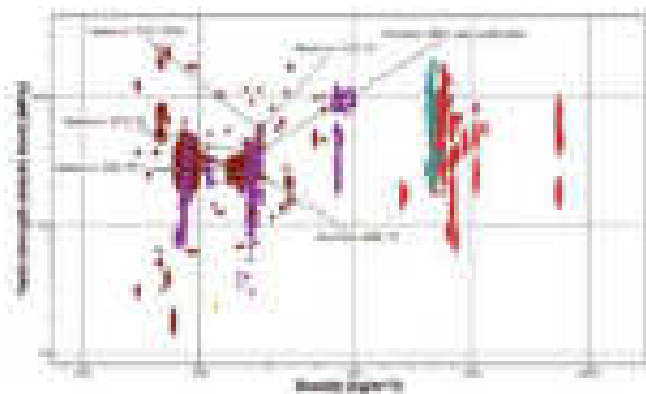


Figura 5. Relación Resistencia vs Peso de aleaciones de aluminio

Titanio: El titanio se encuentra dentro del grupo de los metales ligeros que por tener una menor densidad (4.55 g/cm³) que la del acero; aunque posee mayor densidad que el aluminio con una densidad de 2.70 g/cm³, el magnesio con densidad de 1.75 g/cm³, y el berilio con densidad de 1.85 g/cm³, su resistencia mecánica representa una gran fortaleza ya que bordea los 1400 MPa.

El titanio además de ser más ligero que el acero, posee una excelente resistencia frente a los diversos tipos de corrosión, una buena resistencia específica y un elevado punto de fusión (1668°C). Estas propiedades lo hace un material sustituto del aluminio en la industria aeronáutica y con gran importancia en el área aeroespacial; desgraciadamente es muy caro.

Las aleaciones más utilizadas en el campo aeronáutico son:

Ti-6Al-4V de aplicación general. Esta aleación posee una excelente combinación de resistencia y dureza, además de ser muy resistente a ataques corrosivos por lo que su uso está muy extendido en el campo aeronáutico.

Ti-5Al-2.5Sn para aplicaciones tubulares.

Ti-6Al-6V-2.5Sn para conjuntos de ala, guías de aletas y alerones, abrazaderas para el montaje de motores, conjuntos de frenos y elementos de control del timón de dirección en el Jaguar, Tornado, Trident, Airbus, A 300 B y el Concorde.

En la actualidad, la industria aeroespacial está trabajando con materiales compuestos de una matriz de titanio con refuerzos cerámicos, los cuales tienen mayor módulo elástico y resistencia mecánica que las aleaciones convencionales de titanio. Para este tipo de materiales compuestos se puede utilizar un refuerzo en forma de partículas o en fibras pequeñas. La principal ventaja de utilizar un refuerzo en forma de partículas es su comportamiento isotrópico. Los refuerzos cerámicos del material deben permanecer estables a la temperatura y formar una buena intercara con la matriz. Se han reportado diferentes familias cerámicas como reforzantes donde se incluyen SiC, Al₂O₃, TiB₂, TiC, TiN, B₄C, etc. (Lagos, 2019)

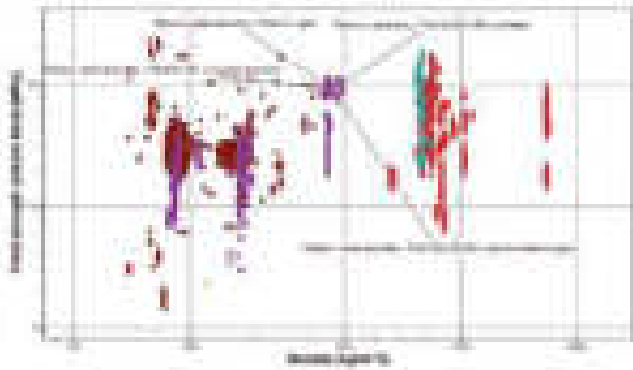


Figura 6. Relación Resistencia vs Peso de aleaciones de titanio

Acero: Al inicio el acero sustituyó a las piezas de madera en las aeronaves y aunque en la actualidad ha perdido protagonismo en la aplicación aeronáutica, todavía se utilizan en aquellas zonas donde la resistencia mecánica y a la fatiga es muy importante

Las aleaciones de acero que contiene carbono en porcentajes que van del 0,10 al 0,30 por ciento se clasifica como acero bajo en carbono. Los números de SAE equivalentes van de 1010 a 1030. Los aceros de este grado se usan para hacer artículos, como cables de seguridad, ciertas tuercas, bujes de cables o extremos de varilla roscada. Este acero en forma de lámina se utiliza para piezas estructurales secundarias y abrazaderas y en forma tubular para piezas estructurales moderadamente tensadas. El alambre de frenado para las tuercas, se hace también con este tipo de aceros.

El acero que contiene carbono en porcentajes que oscilan entre 0.30 y 0.5 por ciento se clasifica como acero de carbono medio. Este acero es especialmente adaptable para maquinado o forjado y donde la dureza de la superficie es deseable. Ciertas varillas de mando de controles de vuelo y forjados ligeros están hechos de acero SAE 1035, además los aceros de medio carbono son apropiados para construcción de ejes, tornillos y bieletas.

El acero que contiene carbono en porcentajes que van del 0.50 al 1.05 por ciento se clasifica como acero con alto contenido de carbono. La adición de otros elementos en cantidades variables se suma a la dureza de la serie 4000: el silicio es el principal elemento de aleación de este grupo y reduce la temperatura de fusión. Su uso principal es en soldadura y soldadura fuerte. Aunque estas aleaciones de acero tienen muy pocas aplicaciones en aeronáutica por su fragilidad excesiva, se puede señalar que el acero SAE 1095 se puede emplear en forma de chapas o alambres para

flejes y resortes.

Los aceros al níquel, se emplean en la construcción de pasadores, terminales pernos y abrazaderas, ya que la adición de níquel permite mejorar la dureza, resistencia mecánica y límite elástico.

Los aceros al cromo se utilizan en cojinetes ya que tienen una alta dureza, tenacidad y resistencia a la corrosión.

Las aleaciones de acero al cromo – níquel son utilizados con la finalidad de aumentar dureza y tenacidad en el material; partes y componentes tales como bielas y cigüeñales de los motores recíprocos se fabrican con acero SAE 3140 y para cajas de engranajes, piñones y ruedas dentadas, se recomienda el SAE 3310.

Dentro de esta serie de aleaciones, existen aceros resistentes a la corrosión los mismos que se utilizan en partes aeronáuticas tales como: tabiques cortafuegos de los compartimentos de los motores, colectores, tubos de escape y lavabos.

Los aceros al cromo - molibdeno, gracias a la adición de pequeñas cantidades de molibdeno, permite mejorar las propiedades mecánicas de los aceros, pero en especial mejora la adaptabilidad a las soldaduras.

La aleación más utilizada para fines aeronáuticos de esta familia es el SAE 4130 para la construcción de fuselajes, trenes de aterrizaje y bancadas de motor. Finalmente para la construcción de ejes de bombas, muelles de válvulas y dispositivos hidráulicos, se utiliza el acero SAE 6195.

Tabla 2. Codificación de aleaciones de acero utilizados en aeronáutica.

ALEACIONES DE ACERO	
Aceros al carbono	1000
Aceros al níquel	2000
Aceros al cromo – níquel	3000
Aceros al molibdeno	4000
Aceros al cromo	5000
Aceros al cromo – tungsteno	6000
Aceros al tungsteno	7000
Aceros al silicio – manganeso	9000



Figura 7. Relación Resistencia vs Dureza de aleaciones de acero utilizado en aeronáutica.

Super Aleaciones Termoresistentes (HRSA)

Las súper aleaciones termoresistentes o HRSA (Heat Resistant Super Alloy) son un grupo de aleaciones base níquel, hierro-níquel y cobalto usadas en los motores de las aeronaves por sus excepcionales propiedades de resistencia térmica. Los materiales usados en los motores de jet deben resistir largos periodos de tiempo en un ambiente de alta temperatura, alto estrés y gases corrosivos calientes. Muchos materiales simplemente no pueden sobrevivir las severas condiciones en las secciones más calientes del motor. Cuando las temperaturas alcanzan sobre los 1300°C estas aleaciones, poseen muchas propiedades que son requeridas para el material de un motor como son alta resistencia, larga vida a la fatiga, resistencia a la fatiga y resistencia a alto estrés a alta temperatura. Las HRSA resisten la corrosión y la oxidación a altas temperaturas, cuando esto causa el rápido deterioro de muchos otros materiales metálicos. Estos materiales pueden operar a temperaturas por encima de los 950-1300°C por largos periodos, haciéndolos materiales adecuados para el uso en motores jet modernos.

Las aleaciones de níquel son las más utilizadas, y constituyen más del 50% del peso de los motores de aeronaves de tecnología punta. La tendencia en los motores futuros es a aumentar esta proporción. Las aleaciones más comunes son:

- Inconel 718, Waspaloy, Udimet 720 – templadas por precipitación
- Inconel 625 – reforzada con solución (no templada)

Las aleaciones con base de hierro han sido desarrolladas a partir de los aceros inoxidables austeníticos. Algunos tienen un muy bajo coeficiente de dilatación (tales como Incoloy 909) lo que los

hace especialmente apropiados para árboles, anillos y carcasas. Sin embargo, tienen propiedades de resistencia en caliente más bajas de las tres que componen el grupo.

Las aleaciones más comunes de este tipo son:

- Inconel 909
- A286
- Greek Ascology

Las aleaciones de cobalto exhiben una resistencia a la corrosión por calor a elevadas temperaturas mayor que la de las aleaciones de níquel. Sin embargo, son más caras y también más difíciles de mecanizar, debido a su gran tendencia al desgaste. Su uso en turbinas está limitado a las piezas de la sección de combustión en las zonas más calientes del motor.

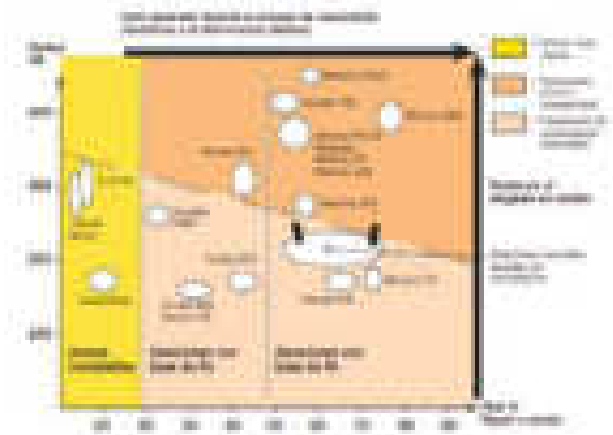


Figura 8. Aleaciones termo resistente utilizado en aeronáutica
Fuente: Catálogo SANDVIK HRSA.2010

Gracias a este tipo de materiales, la durabilidad ha sido mejorada significativamente debido a avances en el diseño de motores, tecnología de propulsión y desarrollo de materiales. El mejoramiento de durabilidad permite el mejor uso de aeronaves al incrementar la vida de los motores y reduciendo las inspecciones de mantenimiento.

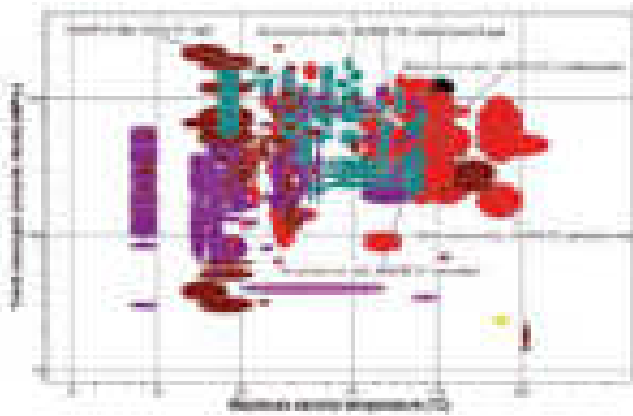


Figura 9. Relación Resistencia vs Temperatura máxima de servicio de HRSA utilizado en aeronáutica

Aleaciones de Magnesio

Desde el punto de vista estructural, las aleaciones de magnesio son las más ligeras que se conocen; su densidad es 1,7 g/cm³ y su resistencia mecánica se la considera muy buena. Es de fácil mecanizado y su materia prima procede de fundición o moldeo. Su uso en aeronáutica radica en la construcción de partes y componentes en cárteres, equipos menores y parte de los trenes de aterrizaje.

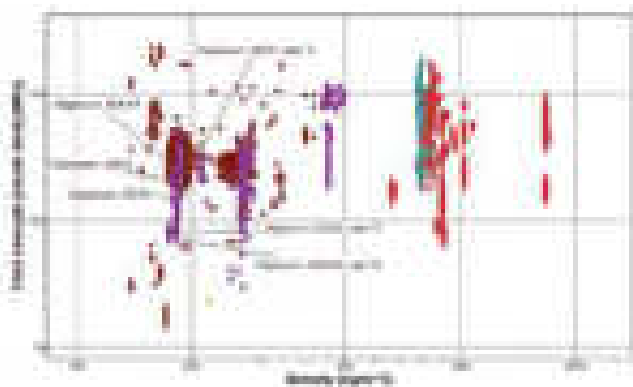


Figura 10. Relación Resistencia vs Densidad aleaciones de magnesio utilizado en aeronáutica

1.2. Materiales y procesos de manufactura

Plásticos y elastómeros

Los plásticos se utilizan en muchas aplicaciones en los aviones modernos. Estas aplicaciones van desde componentes estructurales de plásticos termoestables reforzados con fibra de vidrio hasta molduras decorativas de materiales termoplásticos, canopies y ventanas.

Los polímeros termoplásticos son aquellos que el calor los ablanda de tal manera que pueden moldearse

repetido número de veces, siempre y cuando no se supere la temperatura máxima que el material soporta.

Los polímeros termoestables, en cambio son aquellos que se endurecen por calentamiento y no se pueden volver a fundir y moldearse. Además de la clasificación anterior, los plásticos transparentes se fabrican en dos formas: monolítica (sólida) y laminada. Los plásticos transparentes laminados están hechos de láminas frontales de plástico transparente unidas por un material de capa interna, generalmente polivinil butirilo. Debido a sus cualidades de resistencia a la rotura, el plástico laminado es superior a los plásticos sólidos y se utiliza en muchos aviones presurizados.

La mayor parte de la lámina transparente utilizada en la aviación se fabrica de acuerdo con varias especificaciones militares. Un nuevo desarrollo en plásticos transparentes es el acrílico estirado. El acrílico estirado es un tipo de plástico que, antes de ser moldeado, se tira en ambas direcciones para reorganizar su estructura molecular. Los paneles acrílicos estirados tienen una mayor resistencia al impacto y están menos sujetos a rotura; su resistencia química es mayor, los bordes son más simples y el agrietamiento y los rasguños son menos perjudiciales.

Los plásticos termoestables suelen también utilizarse en zonas de aislamiento eléctrico, conducciones de aire caliente, poleas y pequeños engranajes de transmisión.

El teflón (politetrafluoretileno o PTFE) es un plástico que soporta altas temperaturas y vibraciones, buenas propiedades eléctricas y es anticorrosivo. Se utiliza para hacer tuberías flexibles, rodillos, mamparos, resbalones de cerradura. Así mismo Buna N es un elastómero que se utiliza para fabricar mangueras flexibles que soportan altas presiones, sellos y empaques.

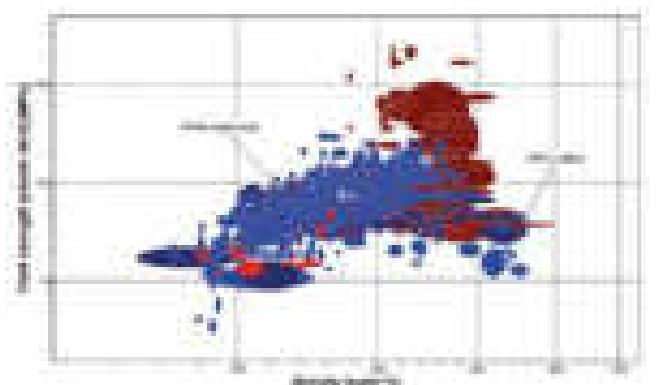


Figura 11. Relación Resistencia vs Densidad plásticos utilizado en aeronáutica

Materiales compuestos

Un material compuesto se podría definir como

la unión de dos o más materiales con la finalidad de generar uno nuevo con mejores propiedades, generalmente está compuesta por dos partes, el refuerzo y la matriz.

En los años de 1970, la industria aeronáutica comenzó a desarrollar fibras sintéticas para mejorar el diseño de las aeronaves. Desde entonces, los materiales compuestos se han utilizado cada vez más. Cuando se mencionan compuestos, la mayoría de la gente piensa solo en fibra de vidrio, fibra de carbono o kevlar. El uso de los compuestos comenzó en la aviación, pero ahora están siendo aceptados por muchas otras industrias, incluidas la automoción, los artículos deportivos y la navegación, así como los usos de la industria de la seguridad y defensa.

Estos materiales presentan muchas ventajas:

- Alta relación resistencia-peso
- Transferencia de tensión de fibra a fibra permitida por la compatibilidad química con la matriz.
- Módulo (relación de rigidez / densidad) de 3.5 a 5 veces mayor que la del acero o el aluminio.
- Vida más larga que los metales.
- Mayor resistencia a la corrosión
- Resistencia a la tracción 4 a 6 veces mayor que la del acero o el aluminio.
- Mayor flexibilidad de diseño.
- La construcción encolada elimina juntas y sujetadores.
- Fácil de reparar.

Las desventajas de los materiales compuestos son:

- Métodos de inspección difíciles de realizar, especialmente la detección de
- Falta de base de datos de diseño a largo plazo, métodos de tecnología relativamente nuevos
- Elevado costo
- Equipo de procesamiento muy caro.
- Gran variedad de materiales, procesos y técnicas.
- Falta general de conocimientos y experiencia en reparaciones.
- Productos a menudo tóxicos y peligrosos.
- Falta de metodología estandarizada para la construcción y reparación.

Existen otro tipo de configuraciones estructurales de materiales compuestos, tales como tipo sándwich, lattice o enrejados y segmentados, los mismos que en

aeronáutica son muy utilizados principalmente para fuselaje, pisos de aviones, cubiertas de ventilados, alas con misiles entre otras.

La estructura honeycomb o panal de abeja, tiene una geometría que permite minimizar la cantidad de material para alcanzar el peso y costo mínimo del material. Esta estructura posee muy buenas propiedades de compresión y cortante, buena resistencia a la corrosión y humedad.

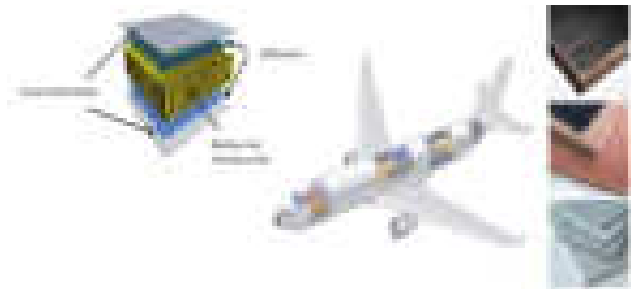


Figura 12. Estructura compuesta tipo sándwich (honeycomb)

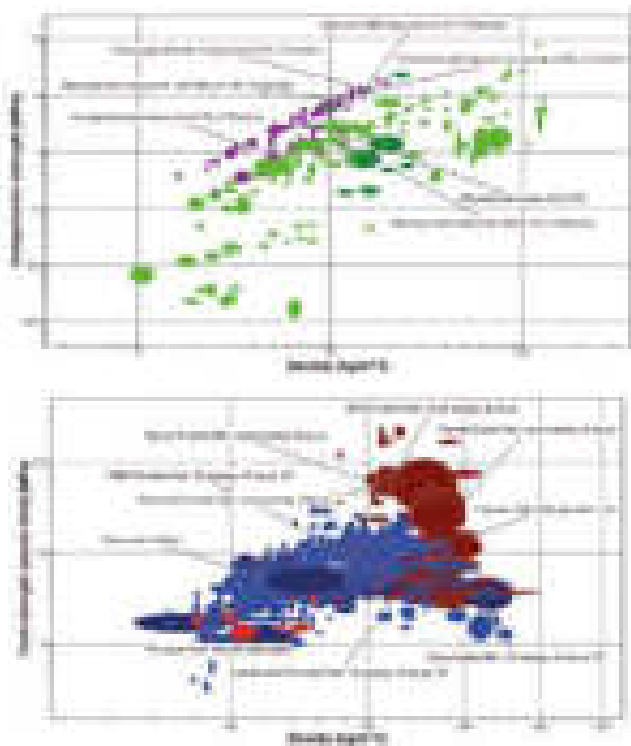


Figura 13. Relación Resistencia vs Densidad materiales compuestos utilizado en aeronáutica.

Cerámicos

Conocidos también como materiales UHTC (Ultra High Temperature Ceramics), se caracterizan por tener un alto punto de fusión, sirven como aislantes térmicos y se los utiliza en zonas o lugares de las plataformas aeronáuticas y aeroespaciales donde se generan grandes cantidades de calor y altas

temperaturas como revestimientos de barrera térmica en álabes, combustores, turbinas y sistemas de escape.

Dentro de esta familia de materiales se encuentran los boruros, carburos, nitruros, óxidos, etc.

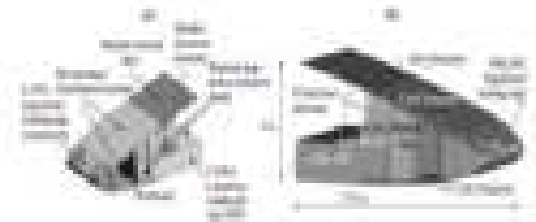


Figura 14. Construcción del borde de ataque de un ala con materiales UHTC.

Fuente: Promising Ultra_High_Temperature Ceramic Materials for Aerospace Applications, Simonenko

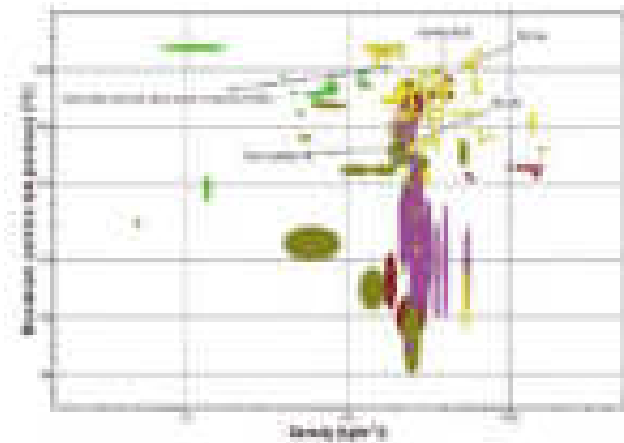


Figura 15. Relación Temperatura máxima de servicio vs Densidad materiales cerámicos utilizado en aeronáutica.

1.3. Materiales y procesos de manufactura Procesos de Manufactura en Aeronáutica

Partiendo que un proceso de manufactura busca dar forma a un material conservando las propiedades del mismo, en la Industria aeronáutica, existe una diversidad de procesos de manufactura que exigen en la actualidad mayor precisión, optimización de tiempos y recursos, pero sobretodo menores costos, por lo que los fabricantes se encuentran en la búsqueda de procesos de manufactura más eficientes. (Ingeniería concurrente).



Figura 16. Procesos de Manufactura para componentes aeronáuticos.

Las partes y componentes de las aeronaves en su gran mayoría son mecanizados en máquinas CNC de 4,5 y hasta 6 ejes de gran envergadura y última tecnología, sin embargo existen más de 250 procesos de manufactura para el conformado de las plataformas aeronáuticas. Las piezas de titanio, fibras de carbono y cerámicos aunque son más livianas, son muy difíciles de mecanizar, debido a su estructura, propiedades y características de mecanizado, por lo que los grandes fabricantes tienen nuevos retos para la consolidación de procesos de manufactura más eficientes y productivos.

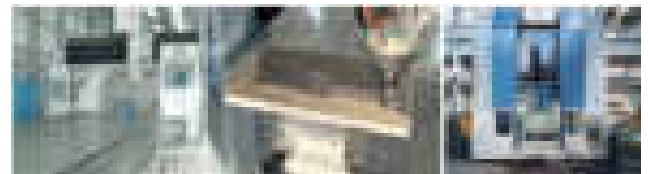


Figura 17. Máquinas para mecanizar componentes aeronáuticos.

Dentro de los aspectos claves en análisis de la Manufactura, se debe tener en cuenta la criticidad de la parte o componente, ya que es un aspecto relacionado con la buena selección y fiabilidad del proceso, controles de calidad, integridad superficial (grietas, tensiones residuales o alteraciones metalúrgicas).



Figura 18. Fallos generados a partir del proceso de manufactura en componentes aeronáuticos

Fuente: Módulo mecanizado de alta velocidad. N López de la Calle, Lamikiz

Al analizar el incidente presentado en la figura anterior, se determinó que el origen del accidente fue por una grieta generada en un debilitamiento de un tubo del sistema de lubricación de un rodamiento de las turbinas de media presión, en razón de que en el proceso de fabricación del elemento, existió un mal alineamiento de dos taladrados. Al final se tuvieron que reemplazar 39 turbinas RR Rolls Royce Trent 900 que presentaban el tubo defectuoso.

2. Discusión

La vinculación del diseño, los materiales y las nuevas tecnologías de fabricación mediante simulación y modelado por computadora (CAD-CAM-CAE) son ahora un requisito para los componentes y sistemas de alto rendimiento y eficiencia en el campo aeronáutico. Las plataformas aeronáuticas dependen de materiales cuyas propiedades y formas tengan afinidad con la ruta de fabricación del producto. Los modelos permiten la predicción de propiedades mecánicas específicas, que respalda el diseño para la fabricación y la optimización de materiales y la producción en masa. El modelado y la simulación también están siendo aplicados para optimizar materiales y procesos establecidos a través de base de datos y softwares.

Los materiales y tecnologías de proceso de manufactura tienen ahora, el potencial de mejorar significativamente la eficiencia y la capacidad ecológica de los motores de turbina. Por definición, comienzan con un bajo nivel de madurez y requieren investigación, desarrollo, evaluación y validación antes de ser aplicados a cualquier sistema futuro; sin embargo, estas tecnologías de alto riesgo / alta

rentabilidad, si tienen éxito en lograr objetivos de rendimiento agresivos, ya que pueden habilitar nuevos componentes y diseños de sistemas que permitan mejoras importantes en la capacidad y el rendimiento en general.

Así mismo, el uso de nuevos materiales, podrían cambiar los diseños actuales de las plataformas aeronáuticas, provocando también un ajuste en el desarrollo de tecnología para su conformación.

Por ejemplo:

- Los materiales compuestos de cerámica de alta resistencia a la temperatura, serán utilizados para las cámaras de combustión, las turbinas y los sistemas de escape de nuevos motores avanzados y más eficientes.
- Los materiales intermetálicos de menor densidad también podrán ser aplicados en componentes rotativos.
- Los materiales compuestos de fibra de carbono constituirán prácticamente el 90% del total del peso de las aeronaves o plataformas aeronáuticas.

El uso de material compuesto en aviones, en lugar de acero, ha dado como resultado estructuras ligeras de aviones y, en consecuencia, ha reducido el nivel de consumo y costos de combustible, reduciendo así las emisiones de CO₂. Existen varias aplicaciones de nanocompuestos en la industria aeroespacial. (Ramdani, 2019)

Entre tales aplicaciones que son específicas en la construcción de aviones, incluyen:

- Elementos de refuerzo para estructuras, tales como: frames, largueros o como la capa exterior para las estructuras tipo panal de abeja usadas en el fuselaje y las alas,
- Matrices cerámicas combinadas con nanoadiciones; estos nanocompuestos pueden representar un elemento único solución para los radomes de aviones hipersónicos y
- Nanocompuestos basados en zirconio para protección térmica en turbo motores.
- Los nanocompuestos metálicos pueden contener un metal como segundo componente y ambos componentes, a menudo muy finamente, están dispersos entre sí. Dichos nanocompuestos de estas combinaciones pueden tener propiedades eléctricas, ópticas y magnéticas mejoradas, con

buena resistencia a la corrosión.

El uso de nanocompuestos en la industria aeronáutica representa una solución avanzada de material. El material nanocompuesto ayuda en la construcción de aeronaves como elemento de refuerzo para estructuras de aeronaves tales como largueros, marcos o como revestimiento para las estructuras de tipo panel utilizadas en las alas y el fuselaje. Como materiales de base para aplicaciones de alta temperatura, los compuestos de nano carbono se desarrollaron por primera vez para la tecnología aeroespacial, para la construcción de componentes y misiles, transbordadores espaciales, vehículos de reingreso, forros de frenos y como material de disco de freno para aeronaves civiles y militares.

Airbus y Boeing pronostican que hasta el 2035 el mercado aeronáutico mundial demandará aproximadamente 22730 aviones comerciales y de carga nuevos y para el 2035 la perspectiva será de 45240 aviones, es decir prácticamente se duplicará la demanda a las existentes en la actualidad, lo que generaría una gran oportunidad para las empresas manufactureras de partes y componentes aeronáuticos.

Para poder llegar a estas metas ambiciosas, las empresas manufactureras dentro del campo aeronáutico deberán garantizar que las partes y componentes puedan ser fabricadas de manera continua, eficiente y siguiendo las especificaciones dentro de una filosofía de seguridad operacional de los sistemas y plataformas aeronáuticas desde los procesos primarios hasta la finalización del producto y de esta manera controlar su cadena de manufactura de la manera más completa posible.

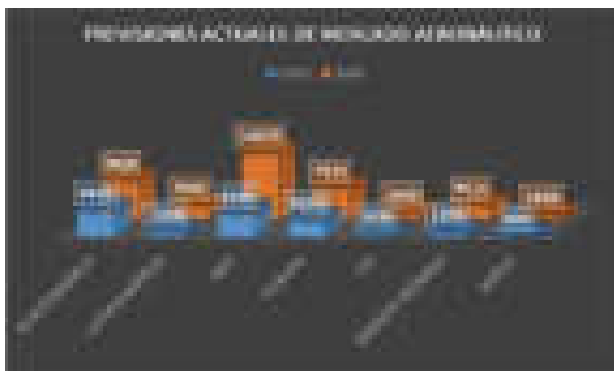


Figura 19. Proyección de flota aeronáutica 2015 – 2035
Fuente: www.boeing.com

3. Conclusiones

A continuación se describe las conclusiones obtenidas en esta investigación:

- Los principales beneficios en los materiales utilizados en el campo aeronáutico son: buena resistencia al rendimiento, resistencia a la tracción, resistencia a la corrosión, resistencia a altas temperaturas y baja densidad, pero sobre todo, de peso ligero, que dan como resultado materiales aeroespaciales fuertes pero más livianos.
- La investigación, estudio y caracterización de los materiales tradicionales en búsqueda de nuevos materiales avanzados, compuestos o nanomateriales, permitirán buscar las mejores relaciones de peso, resistencia y costo dentro del sector aeronáutico.
- En la fabricación de piezas aeronáuticas, más que velocidad de producción, se debe priorizar la confiabilidad de la cadena de manufactura del componente, llegando a un equilibrio óptimo de maquinaria, herramientas, talento humano e ingeniería de manufactura.
- La vinculación del diseño, los materiales y las nuevas tecnologías de fabricación mediante simulación y modelado por computadora (CAD-CAM-CAE) son ahora un requisito para los componentes y sistemas de alto rendimiento y eficiencia en el campo aeronáutico.

4. Referencias

- [1] Cortéz, G. (2010). Nanotecnología en Aviación. Bolivia. Revista de Información, Tecnología y Sociedad.
- [2] Ezugwu. E.O. (2004). High Speed Machining of Aero-Engine Alloys. UK: J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng.
- [3] Federal Aviation Administration FAA. (2018). Aviation Maintenance Technician Handbook General. USA, FAA-FSS.
- [4] Golfman Y. (2011). Hybrid Anisotropic Materials for Structural Aviation parts. Estados Unidos. CRC Press.

[5] Green, K.A., Furrer D. (2009). Advanced turbine engine materials. *Advanced Materials & Processes*.

[6] Karpinos, B (2013). Thermal Cyclic Creep and Long Term Strength of the Material of Aircraft Gas Turbine Blades after Operation. *Strength of Materials*.

[7] Lepeshkin A, Borja de. (2012). Investigations of Thermal Barrier Coatings for Turbine Parts. *Ceramics Coatings Application in Engineering*.

[8] López de la Calle. (2015). Mecanizado de alta velocidad. Material disponible dentro del Programa de Maestría en Manufactura y Diseño asistidos por Computador. Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE.

[9] Neely, J.E., Kibbe, RR., García Díaz, R. (1992). *Materiales y Procesos de Manufactura*. México D.F. Limusa.

[10] Ramdani, N. (2019). Polymer Nanocomposites for Advanced Engineering and Military Applications. USA. *Advances in Chemical and Materials Engineering (ACME) Book Series*, IGI Global

[11] Riba Romeva, C. (2008), *Selección de Materiales en el Diseño de Máquinas*, España, UPC.

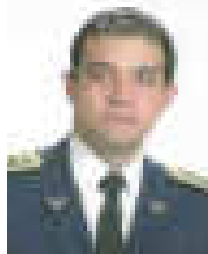
[12] Simonenko, E.P. Sevastyanov D.V, Simonenko N.P, Sevastyanov, V.G, Kuznetsov, N.T. (2013). Promising Ultra-High-Temperature Ceramic Materials for Aerospace Applications. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*.

[13] Sun, C.T. (2006). *Mechanics of Aircraft Structures*, Second Edition, Estados Unidos, John Wiley & Sons, Inc.

5. Biografía



¹José Guillermo Trujillo Jaramillo. Nació en Quito provincia de Pichincha, Ecuador. Magíster en Manufactura y Diseño asistidos por computador, Diploma Superior de cuarto nivel en Pedagogías Innovadoras, Diplomado Internacional de Gestión por competencias Ingeniero Mecánico, Docente / Instructor Tiempo Completo de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea - Carrera de Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE. **Central Técnico.**



²Tcn. Edison Ramiro Acurio Armas, Lcdo. Administración Aeronáutica, Ing. Electrónico en Telecomunicaciones, Magister en Educación / Jefe Dpto. Ingeniería Centro de Investigación y Desarrollo de la Fuerza Aérea, Director de Carrera de la Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Subdirector de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea.



³Rodrigo Cristóbal Zurita Bautista. Nació en Salcedo provincia de Cotopaxi, Ecuador. Magíster en Sistemas de Control y Automatización Industrial, Ingeniero Industrial, Tecnólogo en Mecánica Aeronáutica, Docente Tiempo Completo de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Director de la Carrera de Tecnología Superior en Mecánica Aeronáutica.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	14 marzo 2021
Fecha aceptación	06 mayo 2021

ANÁLISIS MECÁNICO EN EL PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL INYECTOR DE SISTEMAS CRDI BOSCH

MECHANICAL ANALYSIS IN THE CALIBRATION PROCESS OF BOSCH CRDI SYSTEM INJECTORS

Carlos Andrés Almendáriz Maisincho¹, José Lizandro Quiroz Erazo², Luis Anibal Naranjo Pullupaxi³

¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

e – mail: ¹caalmendariz@espe.edu.ec, ²jlquiroz@espe.edu.ec, ³lanaranjo5@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 3 (09)

Resumen

La investigación tiene como objetivo principal la calibración del inyector CRDI Bosch serie 044 5110 310, iniciando con las pruebas mecánicas de funcionamiento como son: presión inicio de inyección, ruido, goteo interno, goteo externo y pulverización, reemplazando los elementos en mal estado, realizando las pruebas de inyección en ralentí, preinyección y full carga en el banco CRDI para bombas e inyectores; a su vez se describe las herramientas para ejecutar el proceso de desarmado y enlistando cada elemento para un mejor reconocimiento, prosiguiendo con la limpieza por ultrasonido y desarrollando paso a paso el proceso de armado. Con el uso del manual de calibración de inyectores CRDI se realiza el ajuste de los anillos AH, DNH, DFK, mediante la evaluación de sus alturas y longitudes de algunos elementos del inyector con el uso de fórmulas específicas llegando a obtener los espesores requeridos que solucionan los problemas de inyección, comprobados nuevamente en el banco.

Palabras Clave: Inyectores, Calibración, Oscilogramas, Pruebas mecánicas y electrónicas, sistemas de inyección CRDI.

Abstract

The main objective of the investigation is the calibration of the Bosch CRDI injectors series 044 5110 310, starting with the mechanical performance tests such as: operating pressure, noise, internal dripping, external dripping and spraying, replacing the elements in poor condition, performing the injection tests at idle speed, pre-injection and full load on the CRDI bench for pumps and injectors; At the same time, the tools to execute the disassembly process are described and each element is listed for a better recognition, continuing with the ultrasound cleaning and developing the assembly process step by step. Using CRDI injector calibration manual, the adjustment of the AH, DNH, DFK rings is carried out by evaluating their heights and lengths of some elements of the injector with the use of specific formulas, obtaining the thicknesses required that fix the injection problems, checked again at the bench.

Keywords: Injectors, Calibration, Oscilograms, Mechanical and electronic tests, CRDI injection systems.

1. Introducción

Los sistemas de inyección CRDI son el conjunto de sensores y actuadores que interacciona entre si son monitoreados por el módulo de control electrónico diésel, que consta de dos circuitos uno de baja 2-5[Bar] y otro de alta presión 300-2500[Bar], siendo los inyectores el objeto de estudio para la investigación.

Los inyectores cumplen un papel fundamental en la inyección de combustible en los motores a diésel ya que es el principal componente que ayuda al motor para que tenga un buen funcionamiento, un buen torque y sobre todo menor consumo de combustible en el momento de la inyección [1].

Este dispositivo requiere de una mano de obra especializada para realizar su respectivo mantenimiento, tanto preventivo como correctivo, y un correcto procedimiento en su análisis, montaje y pruebas, rigiéndose en los parámetros recomendados por el fabricante.

La generación de la presión en la inyección no tiene relación de la cantidad de las RPM y del caudal de inyección, esta es una de las cualidades del sistema.

Con la activación electrónica del inyector se inicia la inyección y caudal de inyección. En ese instante es monitoreado con el sistema ángulo tiempo del control electrónico Diésel. Lo cual es necesario dos sensores del número de revoluciones, tanto en el árbol de levas como en el cigüeñal para reconocer los tiempos [2].

Es necesario una mezcla adecuada para reducir las emisiones de los gases de escape y disminuir los ruidos del motor, donde los inyectores deben dar caudales pequeños en la preinyección e inyecciones múltiples.

Principio de funcionamiento del inyector

La bomba de inyección manda combustible por el riel común al inyector y va dirigido hacia el canal en la tobera hasta llegar a la cámara pequeña yacente en la base, que bloquea la aguja del inyector situado sobre el asiento en forma de cono con la asistencia de un resorte, lo cual este está ubicado en la parte superior de la aguja que conserva el grupo cerrado [3].

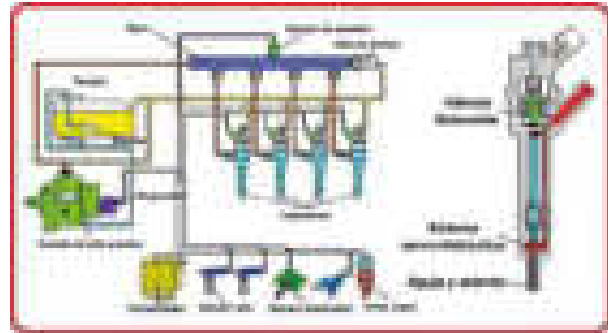


Figura 1. Funcionamiento de sistemas common rail e inyectores CRDI

El combustible bajo la presión eleva la aguja e inyecta en la cámara de combustión al momento que la presión desciende, por el fin de la inyección, el resorte regresa a la posición original a la aguja encima del asiento del inyector finalizando la inyección.



Figura 2. Funcionamiento de sistemas interno del inyector CRDI

Etapas de funcionamiento

Primera etapa de funcionamiento:

La resultante de las fuerzas ($\Sigma F=0$) mantiene la tobera siempre cerrada, el solenoide no genera activación y no se produce la inyección [4].

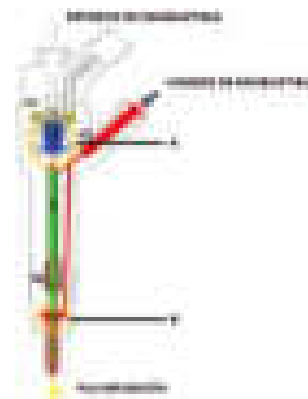


Figura 3. Etapas de funcionamiento del inyector CRDI.

Donde:

- A Presión de riel de válvula
- B Presión de riel de tobera
- F1 Fuerza electromagnética
- F2 Resorte de válvula
- F3 Resorte de tobera

Segunda etapa de activación:

En el inyector existen dos fuerzas de riel que al accionarse forman dos cámaras A y B como se muestra en la figura, el combustible ingresa tomando dos caminos, uno hacia el riel de válvula formando A y el otro hacia el riel de tobera que forma B, como las presiones son iguales sobre la guía que tapa la salida de combustible en la tobera existe la presión del resorte F3, para que el inyector se abra debe liberarse presiones en A. Esta caída de presión se logra con el accionamiento de la bobina que genera una caída de presión en F1 permite que la esfera de válvula se abra paso de combustible en A hacia el retorno, este cuando se libera regresa hacia su depósito [5].

Con esto la presión más alta queda localizada frente a la presión que ejerce F3 logrando vencer y desplazando la tobera que permite pulverizar el combustible

Tercera etapa de funcionamiento:

Se cierra la inyección F1 desactiva la resultante de las fuerzas regresando a su estado inicial que provoca el cierre de la tobera [6].

Pruebas mecánicas de los inyectores.

Las pruebas mecánicas consisten en determinar el deterioro de los inyectores realizando una inspección en cada una de sus pruebas como son: presión apertura del inyector, fuga interna, fuga externa, pulverización de combustible seguidamente de las pruebas de banco [7].

2. Aplicación

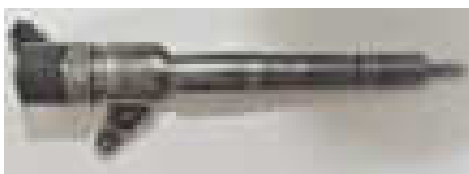


Figura 4. Inyector CRDI Bosch 044 5110 310

Tabla1: Características generales del inyector Bosch

Características	
Modelo	044 5110 310
Descripción	Inyector sistema CRDI 2.2
Max. Presión de inyección	1800 Bar
Tipo de inyector	CRDI 2.2
Código OSA	940 811 182

Presión de apertura del inyector

En esta prueba se genera la primera instancia de funcionamiento del inyector, la presión mínima con la que este componente empieza a generar la pulverización en la cámara de combustión, se monta en el banco de pruebas para common rail se da pulsaciones en la bobina produciendo una ligera variación de presiones obteniendo el primer dato de inyección[8].



Figura 5. Control de apertura de inyección del inyector CRDI Bosch

Resultado: el inyector Bosch 0 44 5110 310, inicia su etapa de funcionamiento con una presión de 188 [Bar]

Fuga externa

Esta prueba consiste en determinar el sellado de los elementos roscados externos del inyector como son la bobina y tuerca de tobera para esto se coloca papales absorbentes que no generen ningún tipo de suciedad o pelusa, se coloca sobre el banco de pruebas se ejerce una variación de presión, preferible con la presión captada en la primera prueba de presión de apertura del inyector [9].

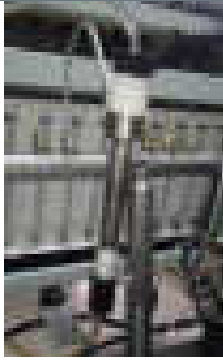


Figura 6. Comprobación de fuga externa del inyector Bosch 044 5110 310

Resultado: El inyector no presenta fugas externa mantiene un sellado estable en la tuerca de bobina y tobera no es necesario el reemplazo o ajuste.

Fuga interna

La prueba consiste en determinar la caída de presión sostenida del combustible con un valor por debajo de combustible resultado que no haya ningún goteo.



Figura 7. Prueba de fuga interna del inyector CRDI Bosch 044 5110 310

Resultado: El inyector presenta fuga interna por lo que produce un goteo no mantiene una presión sostenida de combustible es necesario el reemplazo de tobera.

Pulverización

La prueba consiste en realizar un análisis visual de la pulverización de combustible que tiene que ser prolijo, en forma de cono y continuo.

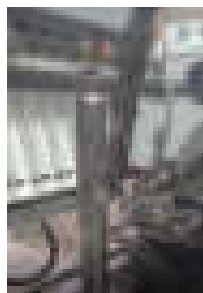


Figura 8. Estado de pulverización del inyector CRDI Bosch 044 5110 310

Resultado: una vez reemplazada la tobera el estado del chorro de la pulverización demuestra una forma de cono y continúa.

Pruebas de funcionamiento

Se procede a instalar el inyector Bosch 044 5110 310 en el banco de pruebas para realizar tres etapas de funcionamiento importantes para inyectores como son:

- Ralentí
- Preinyección
- Plena carga

Siendo preinyección con su anillo AH el punto de partida más importante para iniciar la calibración del inyector, obteniendo un buen desempeño en los demás anillos de calibración como son: DFK ralentí y DNH plena carga.

Tabla 2. Para Parámetros requeridos para el inyector Bosch 044 5110 310 en las pruebas de banco

Det. año	Prueba	Presión (Bar)	Ancho de pulso (ms)	Frec. anillo (Hz)	Tiempo (s)
VE	Full Charge	1000	1300	20	50
VE	Preinyección	600	100	8	10
LL	Ralentí	100	470	8	50

Prueba de banco

Tabla 3. Prueba en preinyección para inyector Bosch

Detalle	Prueba	Presión (Bar)	Ancho de pulso (ms)	Frec. anillo (Hz)	Tiempo (s)
VE	Preinyección	600	100	8	10

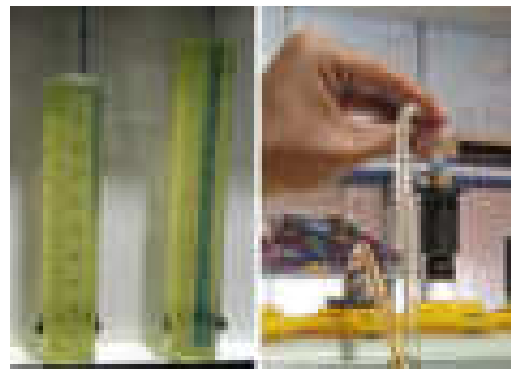


Figura 9. Pruebas de funcionamiento en preinyección

- 116 ml en inyección
- Full retorno

Vehículo con elevada temperatura y exceso de humo, pérdida de potencia.

Se determina que al emitir un exceso de inyección y retorno de combustibles en preinyección ralenti y full carga este requiere de calibración (inyector Bosch) como se determina a continuación:

Proceso de desarmado

En la siguiente tabla se enlista el proceso correcto de desarmado del inyector Bosch utilizando las herramientas específicas como se puede observar en la siguiente tabla:

Tabla 4. Proceso de desarmado del inyector Bosch

Nº	Proceso	Evidencia
1	Sujetar el inyector en la prensa con la ayuda de soportes, ubicados en los extremos del inyector.	
2	Alojar la tuerca de bobina con el útil XD 11-AB29 y retirar con cuidado del cuerpo del inyector.	
3	Extraer el conjunto que se encuentra en el interior de la bobina, resorte de bobina y núcleo VFK.	
4	Con la ayuda de unas pinzas retirar las seguras del inyector.	
5	Separar cuidadosamente la guía control de válvula.	
6	Separar el resorte del carburador.	

Nº	Proceso	Evidencia
7	Extraer la tuerca de sujeción de válvula con el útil TS15 (CR-V5) de 10 mm.	
8	Una vez removida la tuerca de sujeción se retira el control de válvula en conjunto con el anillo de calibración AIE.	
9	Con la ayuda de unas pinzas retirar la guía y esfera de válvula.	
10	Extraer cuidadosamente la tuerca de sujeción de tobera con el útil TS15 (CR-V) del cuerpo del inyector.	
11	Separar la tobera del cuerpo del inyector sin dejar caer los pares de guía.	
12	Extraer el conjunto interno de la sección de tobera, correspondiente a la armadilla de calibración DNH y su guía.	
13	Una vez removida la sección interna, emplear el útil D39-M15X0,5.	
14	Extraer la válvula y émbolo (plunger) del cuerpo del inyector.	



Figura 10. Despiece de las partes internas del inyector Bosch

Donde:

1. Bobina
2. Anillo VFK
3. Resorte de bobina
4. Seguro de inducido A
5. Seguro de inducido tipo luna
6. Inducido
7. Resorte de inducido
8. Tuerca de sujeción
9. Guía de inducido
10. Anillo AH
11. Esfera
12. Anillo DFK
13. Resorte de tobera
14. Guía de anillo DNH
15. Pines
16. Anillo DNH
17. Aguja de tobera
18. Tobera
19. Tuerca de sujeción de tobera
20. Válvula
21. Sello de válvula
22. Cuerpo del inyector



Figura 11. Limpieza del inyector Bosch

Para una buena calibración del inyector, es importante mantener las piezas en excelentes condiciones, una de ellas es la limpieza de estos componentes internos como externos, impidiendo que se mezclen con impurezas.

Calibración de inyector Bosch

Para la calibración del inyector Bosch se debe observar que este no tenga ninguna especie de rajaduras o alguna imperfección ya que estas podrían causar una mala calibración o simplemente arrojar datos erróneos dentro del banco de pruebas, también tener a la disposición los instrumentos de medición y en perfecto estado, ya que son de suma importancia para realizar este proceso, como se describe a continuación:

Ajuste de combustible en emisión y preinyección

Tabla 5. Ajuste de combustible y preinyección

N°	Función	Evidencia
1	Separar anillo de calibración MPK y resorte de bobina	
2	Retocar el inducido y reemplazar el resorte para el calibre	
3	Montar la bobina en el inyector y dar el ajuste necesario de T=El Nro Nota: No colocar el resorte de bobina y el anillo VFK.	
4	Fijar el macrometro sobre la punta superior de la bobina e introducir el husillo hasta que la punta haga contacto con el inducido para determinar el recorrido de la culata de la válvula.	
5	Procesar el espesor tomar nota de la medida obtenida, esta deberá estar dentro de un rango determinado que es determinado que es determinado entre: 0,001-0,040 [mm], caso contrario se procede al cambio o desbaste del anillo AH.	
6	Realizar el desbaste del anillo AH, hasta conseguir la medida requerida dentro del rango determinado.	

Nota: Si el grosor del anillo es mayor al de la medida requerida se procede al desbaste, caso contrario realizar el cambio de anillo AH.

NOTA: El desbaste del anillo siempre debe hacerse en forma de cilin, sobre una superficie plana, de preferencia un taladro y una lija de 400.

N°	Proceso	Evidencia
7	La altura del anillo VTK tiene un rango de referencia entre: 1,40 - 1,60 [mm] El grosor de estos anillos debe encontrarse dentro de estos parámetros establecidos, usando únicamente rectificable para el ajuste de combustible.	

3	Medir el anillo de calibración DPK y verificar si este se encuentra dentro de los parámetros determinados que son: 1,300 -1,600 [mm] n=1,442 [mm]	
---	---	---

Grosor de anillos de calibración

Una vez determinado los espesores de cada anillo de calibración se procede a desarrollar una tabla de comparación del antes y después del ajuste respectivo.

Ajuste de combustible en full carga y ralenti

Tabla 6. Ajuste de combustible en full carga y ralenti

N°	Proceso	Evidencia
1	Colocar el reloj palpador en la base del inyector para tomar datos de la altura del DNH. Anotar la medida obtenida en X la cual será el desplazamiento de la aguja de tobera que se encuentra en el rango (tolerancias) de: 0,19-0,25 [mm]	 medida obtenida X=1,578 [mm] esto es el desplazamiento del husillo del reloj palpador.
2	Medir la altura de la anodada DNH y verificar si se encuentra dentro del rango determinado. Realizar los siguientes cálculos: n=1,378-0,19; n=1,389 [mm] límite n=1,378-0,25; n=1,328 [mm] límite Si esta altura se encuentra fuera del rango se procede al machete o desbaste de la anodada.	<p>Nota: Los ajustes de los milímetros de ajuste deben ser objeto de variación de acuerdo a cada calibración y pruebas que se realizan en el banco.</p>  Construir la altura se encuentra fuera del rango se realiza el cambio por uno de 1,300 mm ya que al realizar la prueba en el banco es la que mejor resultados otorga.

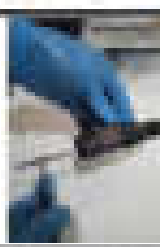
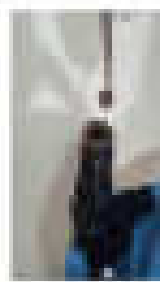
Tabla 7. Análisis de resultados de anillos de calibración


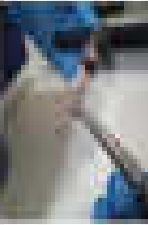
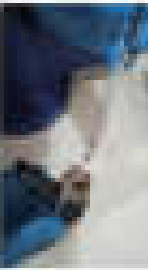
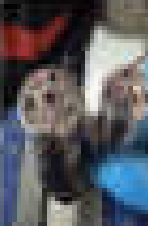
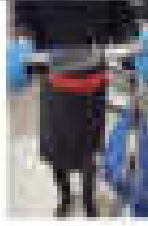
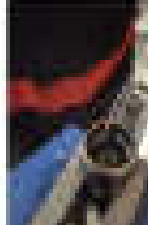
Anillo	Antes	Después	Rango
VTK	1,542 mm	1,742 mm	1,40-1,60 mm
AH	0,846 mm	0,841 mm	0,77-0,84 mm
DPK	1,442 mm	1,442 mm	1,30-1,70 mm
DNH	1,578 mm	1,3 mm	0,19-0,25 mm

Proceso de armado

Una vez realizada la limpieza del inyector y calibrados los elementos pertinentes, se procede a armar. El proceso se realiza de forma inversa, pero teniendo en cuenta algunos detalles que son muy importantes en el montaje como se puede ver a continuación:

Tabla 8. Armado del inyector Bosch

N°	Proceso	Evidencia
1	Entrar el Plunger e introducir en el interior del cuerpo del inyector desde su parte inferior.	
2	Introducir el conjunto de tobera. Primero cubrir el espaciador con un corte en la dirección a la tobera.	

<p>Segundo introducir el anillo DGE sin importar su dirección.</p> <p>Tercero ingresar el resorte sin importar su dirección.</p>	
<p>3 Ingresar el PDI en el interior del resorte de tobera.</p>	
<p>4 Ubicar guías y el espaciador de tobera.</p> <p>Tener en cuenta la posición del espaciador respecto al orificio de combustible.</p>	
<p>5 Ingresar la aguja en la tobera y asegurarse en el espaciador de tobera.</p>	
<p>6 Ajustar la parte tobera y aplicar el torque según las especificaciones.</p> <p>Torque=65Nm.</p>	
<p>7 Insertar las dos guías y la válvula de control. La posición debe estar acorde al orificio de combustible.</p>	

<p>8 Ajustar la tuerca interior de la válvula de control con el GII respectivo y el torque según especificaciones.</p> <p>Torque= 55 Nm</p>	
<p>9 Introducir y posicionar el inducido. Tener en cuenta que la cara plana de la rosca externa debe dirigirse hacia afuera.</p>	
<p>10 Introducir en el interior de la bobina el anillo VTK y el resorte de válvula. La frana crítica del anillo debe apuntar hacia la parte superior del inyector.</p>	
<p>11 Ingresar el anillo de ajuste o armadura de separación en la bobina.</p>	
<p>12 Lubricar el resorte de la bobina. Ajustar la bobina en el cuerpo del inyector con una pequeña presión. Aplicar un torque según las especificaciones.</p> <p>Torque = 14Nm</p>	

Resultados de calibración

Preinyección

La preinyección se considera la prueba que parametriza al inyector, ya que es la distancia en la que se levanta el inducido y deja fluir el combustible, por eso es de suma importancia.

Tabla 9. Resultado de calibración en preinyección

Presión	Presión	Velocidad (cm/s)	Presión (bar)	Velocidad (cm/s)	Presión (bar)	Velocidad (cm/s)
VE	Preinyección	800	220	8	15	
Imagen Resultado (P%)	Retorno	Inyección	Observación			
		<p>Al realizar el ajuste del anillo AH, el cual sirve para la calibración en preinyección se puede observar que los datos respectivos están dentro del rango de funcionamiento de este inyector.</p>				

Tabla 10. Resultado de calibración ralenti


Presión	Presión	Velocidad (cm/s)	Presión (bar)	Velocidad (cm/s)	Presión (bar)	Velocidad (cm/s)
LL	Ralenti	570	475	6	20	
Imagen Resultado (P%)	Retorno	Inyección	Observación			
		<p>Al ajustar la calibración del inyector Bosch en ralenti se debió ajustar el anillo DFK, observando los parámetros de funcionamiento dentro del rango respectivo.</p>				

Tabla 11. Resultado de calibración plena carga

Presión	Presión	Velocidad (cm/s)	Presión (bar)	Velocidad (cm/s)	Presión (bar)	Velocidad (cm/s)
VI	Full carga	1600	1380	25	30	
Imagen Resultado (P%)	Retorno	Inyección	Observación			
		<p>Al ajustar el anillo de calibración DNH que desempeña el trabajo para la calibración en full carga, el cual se colocó dentro de los parámetros de funcionamiento del inyector Bosch está perfectamente Calibrado. Lo cual estuvo 20 ml inyección</p>				

3. Discusión

Los inyectores deben tener una respectiva calibración para cada uno tiene su rango específico y diferentes tipos de anillos como son los anillos de calibración AH, DNH,DFK, que son los respectivos para pre inyección ralenti y full carga que son un punto de partida para una buena calibración de estos también tenemos anillos de retorno de combustible como es RLS que es el encargado de la apertura de la altura de la bobina y el anillo VFK que es el que controla el retorno de combustible este deberá estar dentro de los parámetros establecidos por el fabricante cabe recalcar que cada marca tienen diferentes especificaciones de calibración para cada uno de los controles de inyección a cada presión que Garner Espinoza establece para las medidas de los anillos.

A estos se le realizara unas pruebas antes de montar en el banco de pruebas como son pruebas de goteo, inspección de pulverizado, fuga interne y externa los que determinaran como se encuentra el estado de funcionamiento y dando un punto de partida para los cambios y ajuste que se deberán hacer en el proceso.

4. Conclusiones

- Se desarrolló todos los procedimientos de armado, desarmado y verificación de los inyectores CRDI Bosch serie 044 5110 310 mediante tablas de secuencia y todo esto gracias a investigar información exhaustiva y detalla, además de la práctica constante para llegar a lo planificado.
- Se desarrolló los procesos de calibrado del inyector CRDI tomando medidas de los elementos y pasando a los cálculos y obtener a las dimensiones requeridas de los anillos de calibración.
- Se investigó las fuentes bibliográficas a través de libros, tesis, información de manuales y revistas técnicas que sirvieron de ayuda con los procesos y parámetros de calibración de los inyectores CRDI Bosch.
- Se seleccionó minuciosamente el inyector CRDI Bosch serie 044 5110 310 para seguir con la investigación realizando los procesos correspondientes.

5. Referencias

- [1] Bosch. (2015). Instrucciones de reparación y ensayo de inyectores Common Rail Bosch CRI/CRIN. [En línea].
- [2] Cadena, D. (2013). Diseño e implementación de un banco de pruebas de inyectores de vehículos a diesel crdi para la escuela de ingeniería automotriz. [En línea].
- [3] Coral, F. (2013). Diseño e implementación de un banco de pruebas de inyectores de vehículos a diesel crdi para la escuela de ingeniería automotriz. [En línea].
- [4] Castillejo, A. (2014). Sistemas de inyección diésel electrónico, para servicio automotriz pesado. [En línea].
- [5] Raghani, R. (2017). Desarrollo de un manual de procesos para la comprobación de inyectores common rail del motor Hyundai J3 [En línea].
- [6] Molina, J. (2019). Análisis de los parámetros mecánicos y electrónicos de funcionamiento del

sistema de alta presión del conjunto CRDI del motor diésel Kia 2.0l tipo D4EA. [En línea].

- [7] Noboa, A. (2019). Investigación del comportamiento mecánico y electrónico de los inyectores Bosch “0445120289” y “0445110250” del sistema Common Rail. [En línea].
- [8] KIA MOTORS, C. (2016). COMMON RAIL - Delphi Manual de Entrenamiento de Servicio. Departamento de Asistencia Técnica de DIASA Ltda., Chile. [En línea].
- [9] Espinosa, G. (2016). Manual de calibración de inyectores CRDI Denso, Bosch y Delphi.

6. Biografía



¹Carlos Andrés Almendáriz Maisincho. – Ingeniero Automotriz, Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Asesoramiento en Mecánica y Electrónica de vehículos.

²José Lizandro Quiroz Erazo. – Ingeniero Automotriz (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE), Msc. Gestión de Energías, Diplomado Superior en Autotrónica (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE), Docente tiempo completo (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE).

³Luis Aníbal Naranjo Pullupaxi. – Ingeniero Automotriz, Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, Asesoramiento en Mecánica y electrónica de vehículos.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	12 junio 2021
Fecha aceptación	07 agosto 2021

ESTUDIO ANALÍTICO DEL FENÓMENO DE IMPACTO DE ALTA VELOCIDAD SOBRE LAMINADOS DE TEJIDOS EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA DE LA AUTOMOCIÓN

ANALYTICAL STUDY OF THE IMPACT PHENOMENON OF HIGH-VELOCITY ON WOVEN LAMINATES USED BY THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

¹Shirley García Castillo, ²Inés Iváñez, ³Sonia Sánchez Sáez, ⁴Enrique Barbero, ⁵Carlos Navarro

¹Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Universidad Carlos III de Madrid. Av de la Universidad, N° 30. 28911-Leganés-España

e – mail: ¹sgcastil@ing.uc3m.es

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 4 (09)

Resumen

El desarrollo de este trabajo de investigación está motivado por la alta aplicabilidad de los laminados de material compuesto en estructuras de diversos medios de transporte y la industria química, ya que poseen una alta resistencia y rigidez específica. Muchos componentes estructurales de las aeronaves, así como de los vehículos de automoción están fabricados con laminados reforzados con fibras en matriz polimérica. Con el objetivo de evaluar el comportamiento frente a impacto de diferentes laminados con refuerzos de fibra de vidrio o carbono, así como la influencia de las relaciones entre el laminado y el proyectil, en este trabajo se ha desarrollado y validado un modelo analítico. Las diferencias para el límite balístico y la velocidad residual entre los valores determinados a partir de los ensayos experimentales y los estimados con el modelo analítico son inferiores al 10% y el límite balístico se incrementa con la relación geométrica y con la relación de densidades.

Palabras Clave: Balístico, espesor, FRP refuerzo, modelización.

Abstract

The development of this research work is motivated by the high applicability of the laminates of composite materials for the manufacturing of different transport means and the chemistry industry. Many structural components of the aircrafts and cars are made with laminates reinforcement with fibres in polymer matrix. With the goal, to evaluate the behaviour of laminates reinforced glass or carbon fibres, as well the influence of the geometric and density ratio, between the laminate and projectile. In this work, it was development and validated an analytical model. The difference for the ballistic limit and residual velocity between the experimental and analytical results are less to 10%. The ballistic limit increases with the geometric and density ratios.

Keywords: Ballistic, FRP reinforcement, modelling, thickness

1. Introducción

El fenómeno impacto de alta de velocidad sobre estructuras fabricadas en laminados de material compuesto está controlado por las propiedades mecánicas del laminado y el proyectil, así como las condiciones de impacto, como son: la geometría del proyectil, espesor de la placa, ángulo de impacto, configuración del laminado [1].

El daño producido en un laminado de material compuesto sometido a un impacto del alta velocidad es un fenómeno complejo, debido a los diversos parámetros que actúan [2].

Los mecanismos de fallo que contribuyen a la absorción de la energía cinética del proyectil mecanismos son: el fallo de fibras, la deslaminación, la rotura de matriz y el fallo por cortadura. Adicionalmente, la deformación elástica de laminado, así como el movimiento del laminado, contribuyen a la absorción de la energía cinética del proyectil, aunque no contribuyan al fallo del laminado [1].

El límite balístico es la velocidad por debajo de la cual un proyectil específico no perfora la estructura que es impactada. Comúnmente, el límite balístico [3] es expresado en término de probabilidad como V50, lo que indica que existe un 50% de probabilidad de perforación y para su determinación se recurre a técnicas estadísticas.

La velocidad residual es la velocidad con la cual el proyectil atraviesa la probeta y sale de ésta. Desde el punto de vista experimental se ha demostrado que la velocidad residual se incrementa a medida que se aumenta la de impacto. Además, a partir de la velocidad residual se puede determinar la energía absorbida.

La energía de perforación es la energía mínima necesaria para perforar una estructura cuando los impactos se realizan a altas velocidades de impacto. Experimentalmente, se puede calcular a partir de la velocidad de impacto más baja con la cual se consigue atravesar las placas de material compuesto. Esta velocidad depende ligeramente de la forma del proyectil, y en mayor medida, del espesor del laminado en estudio [4].

De forma general, el estudio del fenómeno de impacto de alta velocidad mediante técnicas experimentales requiere un gran consumo de tiempo

y recursos materiales, lo que se traduce en un elevado coste, porque se deben considerar numerosas variables como pueden ser, los materiales que constituyen el laminado, las condiciones de ensayo (aspectos medioambientales, condiciones de operación, etc) y [5] de la geometría y densidad del impactador, entre otras.

La metodología experimental es compleja y eficaz ya que reproduce el evento en condiciones similares a las que hay en la realidad. Existe numerosa bibliografía que usan ensayos experimentales para predecir el límite balístico de laminados de material compuesto [6-8]. El problema que surge con este tipo de métodos es la dificultad de reproducir las condiciones necesarias y sobre todo el coste económico que conlleva realizar este tipo de experimentos, haciendo necesario otras alternativas de estudio.

Los métodos numéricos están basados en la resolución de problemas mediante herramientas informáticas que tienen una potente matemática detrás. Dichos métodos permiten simular procesos a través de algoritmos matemáticos con el objetivo de proporcionar una respuesta que se ajuste bastante a la realidad. La principal ventaja de estos métodos es que son capaces de proporcionar una buena aproximación del comportamiento real sin demasiado coste económico aunque si es cierto que la inversión inicial puede ser elevada. Dependiendo del tipo y de la complejidad de la simulación el coste computacional varía, el tiempo de resolución puede ser corto pero también existen problemas que tardar semanas en finalizar. Otra de sus ventajas es que pueden resolver procesos matemáticos que no tienen solución analítica. Actualmente existe un desarrollo creciente de modelos numéricos para el análisis de los problemas de impacto de alta velocidad sobre laminados de material compuesto. Existen numerosos programas basados en métodos numéricos como Abaqus o Ansys que están basados en el Método de los Elementos Finitos (MEF o FEM, en inglés). Dichos programas permiten realizar simulaciones mediante modelos en los que son necesarios introducir parámetros y propiedades (geometría, propiedades del material, propiedades de contacto, etc), en muchos casos de difícil determinación. Los estudios que se han realizado utilizando este tipo de métodos son muy numerosos como los de López-Puente et. al. [6] para impactos de alta velocidad en fibra de carbono y los de Iváñez et. al. [9] para estructuras sándwich con pieles de fibra de vidrio y núcleo de espuma. Actualmente existe un desarrollo creciente de modelos numéricos

para el análisis de los problemas de impacto de alta velocidad sobre laminados de material compuesto, debido a que estos proporcionan resultados muy detallados del fenómeno.

Otra alternativa de estudio son los métodos analíticos que se basan en la formulación matemática del problema a través de su descomposición en partes diferenciadas con el fin de entender el proceso y plantear la solución analítica de este.

La principal ventaja de la utilización de este método es el ahorro de tiempo y de dinero en comparación con los métodos experimentales y resultan muy útiles como una primera aproximación al diseño de componentes estructurales, porque permiten disminuir el número de ensayos experimentales a realizar y facilitar el desarrollo posterior de modelos numéricos.

En cuanto al fenómeno de impacto sobre materiales compuestos, existen principalmente dos maneras de abordar el problema analíticamente: por conservación de momento o por métodos energéticos.

Cuando se produce el impacto de un proyectil en un laminado de material compuesto la energía cinética de dicho proyectil es absorbida por diferentes mecanismos de absorción de energía. La filosofía de estos métodos consiste en definir todos los mecanismos de energía que actúan durante el evento y aplicar un balance energético entre el instante inicial y un instante genérico. Una vez realizado este paso, el problema puede resolverse de forma discreta, utilizando métodos explícitos o de forma continua, considerando todos los procesos y resolviendo la ecuación diferencial resultante. Dentro de estos últimos lo más habitual es que la variable de integración sea el tiempo, no obstante, algunos autores como [8] han preferido utilizar una variable de integración espacial.

Los modelos analíticos basados en la conservación de la energía, que consideran que la energía cinética o parte de ella es absorbida por el laminado durante el fenómeno de impacto, debido a: la deformación elástica de la placa de laminado material compuesto, el fallo del laminado, que incluye diversos mecanismos, la fricción y el calentamiento del laminado, así como la aceleración del mismo. Entre estos modelos se pueden nombrar los desarrollados por [2, 6, 8].

De forma general, todos los modelos indicados previamente son modelos específicos que son válidos para determinados constituyentes, espesores de

laminado, tamaño del proyectil y no han evaluado la influencia de variables geométricas, de resistencia y densidades entre el laminado y el proyectil. Por ello, en este trabajo de investigación se ha desarrollado un modelo analítico general, que permitirá evaluar el comportamiento frente a impacto de diferentes laminados, así como la influencia de las relaciones entre el laminado y el proyectil.

2. Descripción del modelo analítico

El modelo desarrollado en este trabajo de investigación ha sido desarrollado para cualquier laminado de tejido en resina polimérica, de espesor delgado.

Está basado en las leyes de conservación de energía y considera tres mecanismos de absorción de energía: la deformación elástica de fibras, la aceleración del laminado y el daño producido en el laminado. Este último mecanismo incluye el fallo de fibras, la formación del tapón de cortadura (laminado de fibra de carbono), así como el daño por deslaminación y rotura de matriz. Ha sido planteado en una formulación diferencial, cuya variable de integración es la velocidad en cada instante de tiempo y que puede ser resuelto mediante cualquier método numérico.

Para el planteamiento de la formulación del modelo analítico se han considerado las siguientes hipótesis:

- El proyectil es perfectamente rígido y se mantiene indeformable durante el fenómeno de impacto.
- El laminado de tejido se considera homogéneo y cuasi-isótropo en el plano.
- El ancho de la mecha del laminado es menor o igual al diámetro del proyectil.
- Las velocidades de propagación de las ondas longitudinales y transversales son constante a lo largo del espesor del laminado.
- La energía absorbida por fallo en tensión de las fibras y la deformación elástica de las fibras son tratadas de forma independiente.
- La energía absorbida por fricción entre el laminado y el proyectil, así como la absorbida por calentamiento del laminado se consideran despreciables, porque el laminado es delgado.

El modelo requiere del conocimiento de la ecuación constitutiva, la tenacidad de fractura en modo II, la densidad y el espesor del laminado, así como los parámetros del proyectil como la masa y el diámetro.

El modelo establece la conservación de la energía entre el instante inicial en el que toda la energía está asociada a la energía cinética del proyectil y un instante genérico en el que parte de la energía del proyectil ha sido absorbida por el laminado. Una explicación detallada de los mecanismos de absorción de energía y del modelo analítico se puede encontrar en el capítulo de libro desarrollado por García-Castillo et. al. [2].

La formulación del modelo se ha llevado a cabo mediante métodos energéticos, haciendo uso de los mecanismos de absorción de energía definidos por García-Castillo et. al. [1].

Entre el instante inicial t_0 y uno genérico t se cumple el siguiente balance energético.

$$E_0 = \frac{1}{2} \cdot m_p \cdot v(t)^2 + E_{abs}(t) \quad (1)$$

Donde: E_0 es la energía de impacto, m_p es la masa del proyectil y E_{abs} es energía absorbida por los diferentes mecanismos de absorción de energía desde t_0 hasta t .

$$E_{abs} = E_{EC} + E_{ET} + E_{ED} + E_{DL} + E_{EM} + E_{ES} \quad (2)$$

Donde: E_{EC} es la energía absorbida por aceleración del laminado, E_{ET} es la energía absorbida por fallo de fibras, E_{ED} es la energía absorbida por deformación elástica del laminado, E_{DL} es la energía absorbida por deslaminación, E_{EM} es la energía absorbida por rotura de la matriz, E_{ES} es la energía absorbida debida a la formación del tapón de cortadura, en el caso de los laminados de fibra de carbono.

3. Validación del modelo analítico

Para la validación del modelo analítico se emplearon dos laminados de tejido equilibrado, uno de fibra de vidrio E en resina poliéster de 3 y 6 mm de espesor y otro de fibra de carbono AS4 en resina epoxi 8552 de 2 mm de espesor. Las propiedades y variables necesarias para la aplicación del modelo analítico desarrollado en este trabajo se encuentran recogidas en [1, 8, 10].

La validación del modelo analítico se ha realizado con respecto a la velocidad residual y el límite balístico, tal como se observa en las Figuras 1, 2 y 3 en la cuales se muestra la velocidad residual del proyectil en función de su velocidad de impacto para los ensayos experimentales y el modelo analítico.

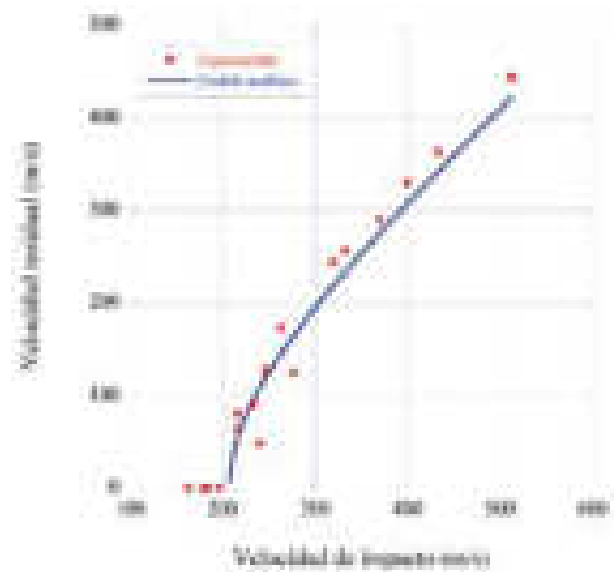


Figura 1. Velocidad residual frente a la velocidad de impacto para un tejido de fibra de vidrio/poliéster de 3 mm de espesor.

En todos los laminados estudiados la máxima diferencia entre los resultados del modelo analítico y los experimentales, para una misma velocidad de impacto, no supera el 10%, lo que indica que el modelo velocidad residual del proyectil al atravesar la placa de material compuesto. Se puede afirmar que, para estudiar el fenómeno de impacto transversal a alta velocidad sobre laminados de tejido, los mecanismos de daño seleccionados para el desarrollo del modelo son los más relevantes y que las hipótesis realizadas son apropiadas.

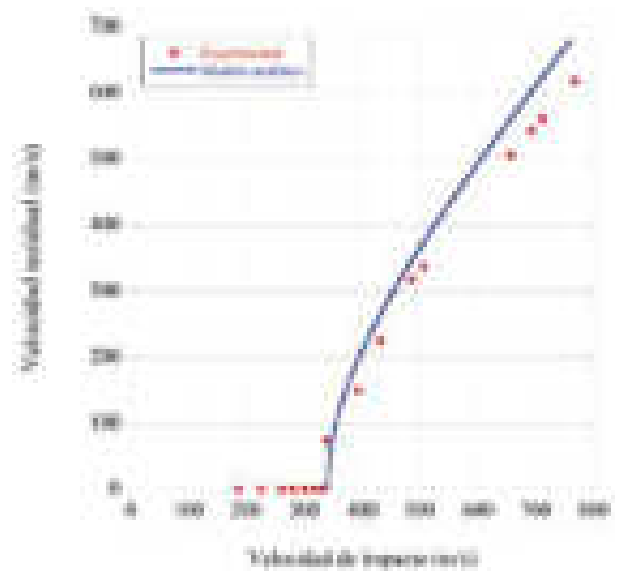


Figura 2. Velocidad residual frente a la velocidad de impacto para un tejido de fibra de vidrio/poliéster de 6 mm de espesor.

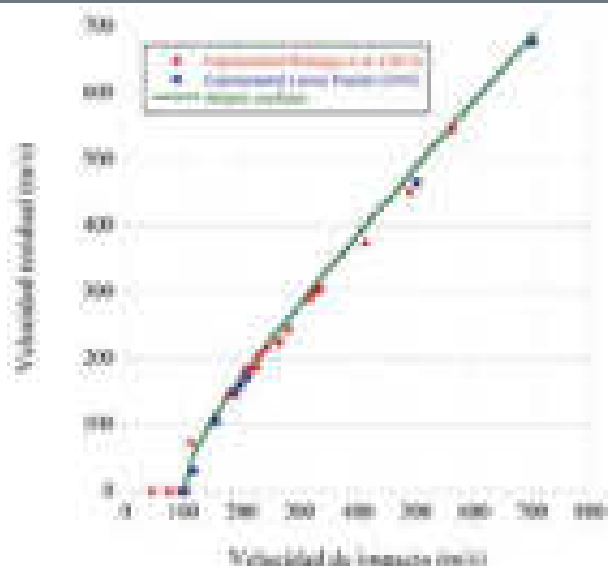


Figura 3. Velocidad residual frente a la velocidad de impacto para un tejido de fibra de carbono/epoxi de 2 mm de espesor

Los errores en la estimación de la velocidad residual que proporciona el modelo, en relación a los resultados experimentales disminuyen, en las inmediaciones del límite balístico, lo que es muy importante desde el punto de vista del ingeniero de diseño, pues le permite predecir la energía crítica que produce la perforación del laminado.

Los resultados de límite balístico obtenidos a partir del modelo analítico, que se corresponde a la velocidad de impacto a la cual la velocidad del proyectil en un instante de tiempo es igual a cero y su desplazamiento es igual al espesor del laminado. De la Tabla 2 se deduce que el error existente entre el límite balístico experimental y el que proporciona modelo analítico para cada uno de los laminados estudiados no alcanza un 9 %, lo que confirma la fiabilidad del modelo analítico propuesto.

Tabla 1. Límite balístico obtenido a partir del ajuste de los datos experimentales y del modelo analítico.

Laminado	Espesor (mm)	Límite balístico (m/s)	
		Modelo analítico	Experimental
Fibra de vidrio/poliéster	2	208	211,0
	4	212	212,0
Fibra de carbono/epoxi	2	109	100,0
			100,0

4. Estimación del límite balístico

La variación del límite balístico con respecto a la relación geométrica (cociente del espesor laminado entre el radio del proyectil) para un laminado de

tejido de fibra de vidrio se observa en la Figura 4, donde se muestra que un aumento del límite balístico con el incremento de esta relación, ajustándose la relación entre ambas variable a una línea recta. Por lo tanto, un incremento en la relación geométrica y por consiguiente en el espesor del laminado o la disminución del radio del proyectil da lugar al incremento del límite balístico.

La influencia de la relación de densidades (cociente de la densidad del laminado entre la del proyectil) para un laminado de tejido de fibra de vidrio sobre el límite balístico se observa que este se incrementa con una ley potencial cuando se aumenta la relación de densidades, es decir cuando se incrementa la densidad del laminado o disminuye la del proyectil, tal como se observa la en la Figura.5.

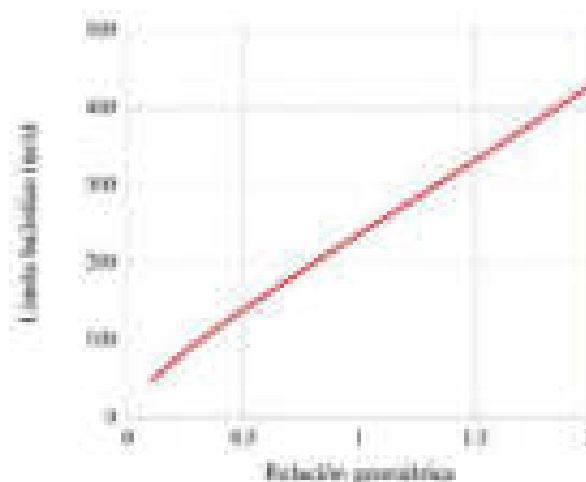


Figura 4. Relación del límite balístico con respecto a la relación geométrica para un laminado de tejido de fibra de vidrio E/poliéster.

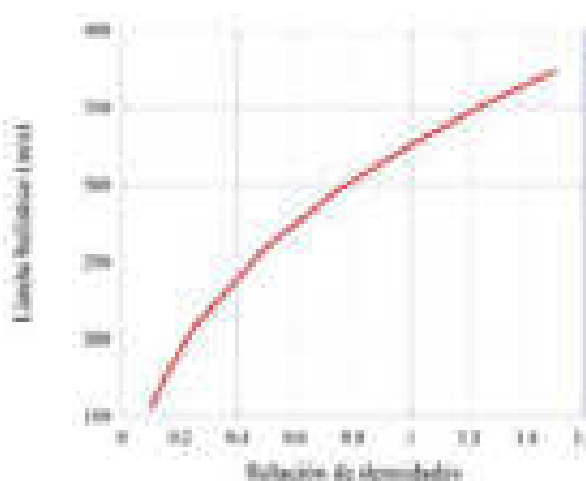


Figura 5. Relación del límite balístico con respecto a la relación geométrica para un laminado de tejido de fibra de vidrio E/poliéster.

5. Conclusiones

En este trabajo de investigación se ha presentado un modelo analítico que permite evaluar el comportamiento frente a impacto transversal de dos espesores y un laminado de fibra de carbono. A partir de este modelo se ha realizado un estudio de las principales relaciones adimensionales que influyen en el límite balístico frente a impacto de laminados de tejido de fibra de vidrio, obteniéndose las conclusiones que se detallan a continuación:

- El modelo analítico propuesto permite predecir con suficiente precisión el comportamiento frente a impacto transversal de laminados de tejido equilibrado en matriz polimérica, independientemente del material de refuerzo.
- La validación del modelo analítico propuesto se ha realizado con respecto al límite balístico y la velocidad residual, observándose mínimas diferencias entre los valores experimentales y los estimados a partir del modelo.
- Las diferencias para el límite balístico entre los valores determinados a partir de los ensayos experimentales y los estimados con el modelo analítico son inferiores al 10%.
- El límite balístico se incrementa linealmente con la relación geométrica, mientras que con la relación de densidades lo hace con una ley potencial, para laminados delgados de fibra de vidrio.

6. Referencias

- [1] García-Castillo, S. K., Sánchez-Sáez, S., Santiuste, C., Navarro, C., & Barbero, E. (2013). Perforation of composite laminate subjected to dynamic loads. In *Dynamic Failure of Composite and Sandwich Structures* (pp. 291-337). Springer, Dordrecht.
- [2] Naik, N. K., & Shrirao, P. (2004). Composite structures under ballistic impact. *Composite structures*, 66(1-4), 579-590.
- [3] Zukas, J. A., & Scheffler, D. R. (2001). Impact effects in multilayered plates. *International Journal of Solids and Structures*, 38(19), 3321-3328.
- [4] Ulven, C., Vaidya, U. K., & Hosur, M. V. (2003). Effect of projectile shape during ballistic perforation of VARTM carbon/epoxy composite

panels. *Composite structures*, 61(1-2), 143-150.

- [5] Moure, M. M., García-Castillo, S. K., Sánchez-Sáez, S., Barbero, E., & Barbero, E. J. (2018). Matrix cracking evolution in open-hole laminates subjected to thermo-mechanical loads. *Composite Structures*, 183, 510-520.
- [6] Morye, S. S., Hine, P. J., Duckett, R. A., Carr, D. J., & Ward, I. M. (2000). Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact. *Composites science and technology*, 60(14), 2631-2642.
- [7] Gellert, E. P., Cimpoeru, S. J., & Woodward, R. L. (2000). A study of the effect of target thickness on the ballistic perforation of glass-fibre-reinforced plastic composites. *International Journal of Impact Engineering*, 24(5), 445-456.
- [8] López-Puente, J., Zaera, R., & Navarro, C. (2007). An analytical model for high velocity impacts on thin CFRPs woven laminated plates. *International Journal of solids and structures*, 44(9), 2837-2851.
- [9] Iváñez, I., Santiuste, C., Barbero, E., & Sanchez-Saez, S. (2011). Numerical modelling of foam-cored sandwich plates under high-velocity impact. *Composite structures*, 93(9), 2392-2399.
- [10] Buitrago, B. L., García-Castillo, S. K., & Barbero, E. (2013). Influence of shear plugging in the energy absorbed by thin carbon-fibre laminates subjected to high-velocity impacts. *Composites Part B: Engineering*, 49, 86-92.

7. Biografía



¹Dra. Shirley K. García-Castillo, Profesora Titular de Universidad Carlos III de Madrid.



²Dra. Inés Iváñez, Profesora Titular de Universidad Carlos III de Madrid



³Dra. Sonia Sánchez-Sáez,
Catedrática de Universidad Carlos III
de Madrid.



⁴Dr. Enrique Barbero, Catedrático de
Universidad Carlos III de Madrid.



⁵Dr. Carlos Navarro, Catedrático de
Universidad Carlos III de Madrid.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	07 septiembre 2021
Fecha aceptación	26 octubre 2021

ANÁLISIS EXPERIMENTAL DE LA ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE ELEMENTOS TUBULARES DE FIBRA DE CARBONO DE SECCIÓN CUADRADA SOMETIDOS A IMPACTOS TRANSVERSALES

EXPERIMENTAL ANALYSIS OF THE ENERGY ABSORPTION OF SQUARE CARBON FIBER TUBULAR ELEMENTS SUBJECTED TO TRANSVERSE IMPACTS

Henry Iza Tobar¹, Shirley K. García Castillo², Inés Ivañez³,

¹Doctorando de Ingeniería Mecánica y Organización Industrial

¹Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad Carlos III de Madrid

Av de la Universidad, N° 30. 28911-Leganés-España

e – mail: ¹100414084@alumnos.uc3m.es, ²sgcastil@ing.uc3m.es ³idel@ing.uc3m.es

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 5 (09)

Resumen

El uso de materiales compuestos laminados en aplicaciones estructurales sigue creciendo debido a sus excelentes propiedades mecánicas específicas. Los laminados de fibra de carbono son ampliamente utilizados en la fabricación de estructuras primarias, como las vigas de impacto de las puertas laterales y los parachoques de los turismos, estas estructuras funcionan como elementos de seguridad pasiva y durante su vida útil están expuestas a cargas dinámicas. En este trabajo se estudia la capacidad de absorción de energía de elementos tubulares fabricados con fibra de carbono/epoxi (AS4/8552), que fueron impactados en una torre de caída a varias energías de impacto. Se evaluó la carga aplicada, la energía absorbida, el desplazamiento máximo, la indentación instantánea del impacto y el tiempo de contacto. Se observó una relación lineal entre la energía absorbida/masa, la relación desplazamiento vertical máximo/masa y la relación indentación instantánea/masa con respecto a la energía de impacto. Se identificaron las cargas correspondientes a: el umbral de agrietamiento de la matriz y de delaminación de los elementos tubulares sometidos a impacto de baja velocidad.

Palabras Clave: Laminados, carbono, energía, impacto, velocidad.

Abstract

The use of laminate composite materials in structural applications continue growing due to their excellent specific mechanical properties. Laminates of carbon fibre are widely used in the manufacture of primary structural, such as side-door impact beams and bumpers for passenger cars, these structures work as passive safety elements and during its service life are exposed to dynamic loads. In this work, it studies the capacity of energy-absorption of tubular elements were manufactured by woven carbon fibre/epoxy (AS4/8552), which were impacted in the tower drop at several impact energies. It were evaluating the applied load, the absorbed energy, the maximum displacement, the instant impact indentation and the contact time. It was observed a linear relationship between the absorbed energy/mass ratio, the maximum vertical displacement/mass ratio and, instant impact indentation/mass ratio regarding to the impact energy. It was identified the loads corresponding to: the matrix cracking and delamination threshold of tubular elements subjected to low-velocity impact.

Keywords: Laminate, carbon, energy, impact, velocity

1. Introducción

Las normativas sobre eficiencia de combustible y emisiones de gases de los vehículos son dos aspectos importantes en el mundo actual. Una forma de aumentar la eficiencia del combustible evitando disminuir la seguridad es utilizar materiales compuestos reforzados con fibra en especial con el uso del carbono en las aplicaciones estructurales de la industria del transporte, ya que los materiales compuestos reforzados con fibra tienen mayores resistencias específicas que el acero o el aluminio convencionales [11]. El uso de materiales compuestos laminados en aplicaciones estructurales está creciendo debido a sus excelentes propiedades mecánicas específicas. Para diseñar estructuras con estos materiales, es necesario conocer el comportamiento de las estructuras de materiales compuestos laminados [1-2].

El elemento tubular estructural de pared delgada es de gran interés tanto en la industria del transporte terrestre como aéreo. Este tipo de elementos se utilizan en estructuras primarias, como las palas de los rotores y los largueros de las alas de las aeronaves, donde están sometidas principalmente a flexión. Por otro lado, estos elementos se utilizan para absorber energía en las estructuras de seguridad pasiva de los vehículos, que suelen estar sometidas a compresión. Además, estas estructuras pueden estar sometidas a impactos de baja velocidad durante su vida en servicio o durante las operaciones de montaje y mantenimiento [3-4]. Estas cargas son especialmente críticas para los materiales compuestos laminados debido a que estos daños no suelen ser visibles a simple vista y podrían modificar en gran medida el comportamiento de la estructura [5-6]. Los laminados de fibra de carbono son ampliamente utilizados en la fabricación de elementos estructurales primarios especialmente críticas para los materiales compuestos laminados debido a que estos daños no suelen ser visibles a simple vista y podrían modificar en gran medida el comportamiento de la estructura [5-6]. Los laminados de fibra de carbono son ampliamente utilizados en la fabricación de elementos estructurales primarios en vehículos de competición, y desde hace unos años se está evaluando su uso en la fabricación de vehículos comerciales [7], obteniéndose reducciones de peso de los vehículos [8-9].

Sin embargo, el uso de estos laminados presenta algunos problemas debido a su fractura frágil, siendo este aspecto especialmente crítico en el diseño de elementos de absorción de energía [10]. Debido a

la reducción del coste de los materiales de carbono/epoxi y a la aparición de nuevos procedimientos de fabricación adaptados a la producción en serie, el análisis del comportamiento ante el impacto de los tubos fabricados con estos materiales es actualmente de gran interés.

El ensayo más adecuado para estudiar la respuesta de estos elementos es el de flexión en tres o cuatro puntos, ya que es representativo de su estado de carga. Durante una colisión, la estructura está sometida a cargas dinámicas, por lo que un correcto estudio de este fenómeno requiere de ensayos de impacto. El fenómeno del impacto es complejo y necesita de dispositivos experimentales específicos (pistola de gas, torre de caída, etc.) y de sofisticados dispositivos de medición, como cámaras de alta velocidad, etc.

Algunos autores han estudiado la capacidad de absorción-energía de elementos tubulares sometidos a cargas de flexión, pero sólo consideran las cargas estáticas. Palmer et al. [12] estudiaron el fallo progresivo de vigas de poco espesor fabricadas con materiales compuestos pultruidos. Lim y Lee, [13] analizaron mediante ensayos estáticos y simulaciones numéricas los elementos tubulares de sección cuadrada situados en la puerta de un vehículo, fabricados con diferentes laminados de vidrio/epoxi. Por su parte, Charoenphan et al. [14] estudiaron el fallo progresivo que se produce en un tubo de sección cuadrada cuando es sometido a cargas estáticas en un ensayo de flexión en tres puntos, observando que el fallo comienza en las esquinas de la sección. En este trabajo se evalúa la capacidad de absorción de energía de elementos tubulares de sección cuadrada los que se someten a bajo impacto.

2. Procedimiento Experimental

En la presente investigación se analizó el comportamiento de los elementos tubulares de sección cuadrada de pared delgada a probetas de fibra de carbono mediante preimpregnados de fibra de carbono/epoxi AS4/8552 de Hexcel Composites del Instituto Nacional Aeroespacial. La longitud de los tubos de sección cuadrada es de 480 mm de 35 mm por lado y un espesor de 2.5 mm como se muestra en la figura 1.



Figura 1. Probeta de fibra de carbono/epoxi AS4/8552.

Se realizaron varios ensayos a las probetas de sección cuadrada haciendo uso de una torre de caída CEAST Fractovis en función de la masa mostrado en la Figura 2.



Figura 2. Torre de caída CEAST Fractovis

Fue diseñado y fabricado un soporte para la probeta para el apoyo en tres puntos. Tanto la base del como los soportes son lo suficientemente rígidos para soportar el impacto como se observa en la Figura 2.



Figura 3. Esquema que de la probeta a ensayar con impactador y soporte.

El impactador tiene una forma semi esférica de 30.22 mm de radio con una masa de 6.128 kg. La forma semiesférica del impactador no permite la perforación instantánea de las probetas. Cada ensayo fue evidenciado con una cámara de alta velocidad PHOTROM ULTIMA teniéndose grabaciones que permitieron estimar las velocidades de impacto y la reacción de impactador evaluado la distancia recorrida en varios fotogramas consecutivos. Con el número de fotogramas (27) se calcularon las energías

de impacto y de absorción. Para el ensayo de impacto se tomaron como referencia cuatro energías con valores teóricos de 15J, 20J, 25J y 30J energías que no producen falla o rotura total de las probetas. De cada ensayo de impacto se obtuvo un registro de carga vs. tiempo (Fig. 2), ya que la punta del impactador estaba instrumentada con una célula de carga. Asumiendo la hipótesis [28] de un contacto permanente entre los elementos tubulares y el impactador, se pudo determinar el desplazamiento del punto de contacto mediante integraciones sucesivas de la curva carga vs. Tiempo. A partir de la curva fuerza desplazamiento, se obtuvo la energía absorbida hasta el fallo.

3. Resultados

La figura. 4 muestra las curvas fuerza-tiempo a diferentes energías de impacto. Las curvas presentan un comportamiento similar durante el tiempo transcurrido cuando se aplican energías de 14,27 J a 29,43J

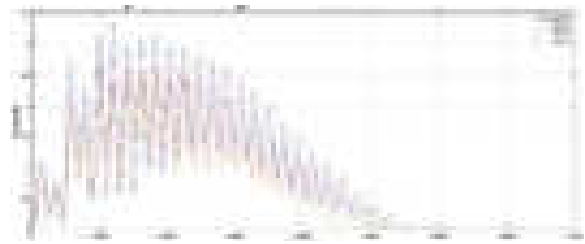


Figura 4. Representación de las curvas de la fuerza/masa vs. energía de impacto para la estructura tubular.

Los picos de carga máxima están en función de la energía aplicada y del tiempo transcurrido. Cuanto menor sea la energía aplicada durante el ensayo, mayor será el tiempo transcurrido para alcanzar un pico de carga máxima. Para la energía de impacto de 14,27 J el tiempo transcurrido en el que se obtiene la carga máxima de pico es de $3,272 \times 10^{-3}$ s, para 19,18 J el tiempo en el que se obtiene la carga máxima es de $2,036 \times 10^{-3}$ s, para 24,25 J el tiempo es de $1,996 \times 10^{-3}$ s y para 29,43 J el tiempo es de $2,385 \times 10^{-3}$ s.

A medida que la energía de impacto aumenta existe un aumento de la carga en función de la masa. Cuando se alcanza la energía máxima existe una variación del tiempo en especial para las energías desde 19.18 J hasta 29.43 J, este intervalo es de 3.89×10^{-4} s. Para el ensayo a una energía de 14.27 J el tiempo en el que se alcanza el pico máximo de carga es mayor debido a que a mayor energía de impacto el tiempo debe ser menor.

Para cualquiera de los picos, la carga en función de la masa aumenta con la energía de impacto, como se observa en la figura. 5, esto ocurre en los tres picos, lo que indica un comportamiento similar.

Al realizar la aproximación lineal para cada uno de los picos, la pendiente del primer pico es menor que la del segundo y del pico máximo. El primer pico es muy constante, es decir, para cualquier energía de impacto este pico se produce con una relación carga/masa similar, lo mismo puede definirse para el segundo pico.

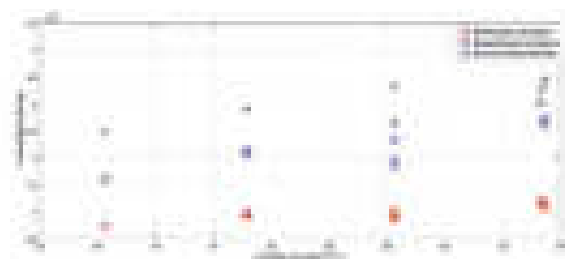


Figura 5. Picos de fuerza/masa vs. energía de impacto para la estructura tubular

La figura 6 muestra la energía absorbida en función de la energía de impacto. La energía absorbida para las estructuras tubulares ensayadas resultó en una absorción superior al 50%, a una energía de impacto de 14,27 J un porcentaje del 59,22% y para una energía de 29,30 un porcentaje del 61,73%. La aproximación lineal dio como resultado un valor de pendiente menor.



Figura 6. Energía absorbida/masa vs. energía de impacto para la estructura tubular.

En la figura 7 se muestra el desplazamiento relacionado con la masa (mm/kg) en función de la energía de impacto (J). Para los ensayos de tubos estructurales realizados se puede visualizar una gráfica directamente proporcional; mientras mayor sea la energía de impacto existe mayor desplazamiento en relación con la masa 29.43 J, 0.0464788 mm/Kg respectivamente y mientras menor sea la energía de impacto existe menor desplazamiento en relación con la masa 14.27 J, 0.02930 mm/Kg respectivamente.



Figura 7. Desplazamiento máximo/masa vs. energía de impacto para la estructura tubular.

En la figura 8 se muestra la indentación relacionada con la masa (mm/kg) en función de la energía de impacto (J). Para los ensayos de tubos estructurales realizados se puede visualizar una gráfica directamente proporcional; mientras mayor sea la energía de impacto existe mayor indentación en relación con la masa 29.43 J, 0.01854460 mm/kg respectivamente y mientras menor sea la energía de impacto existe menor indentación en relación con la masa 14.27 J, 0.01214884 mm/kg respectivamente.

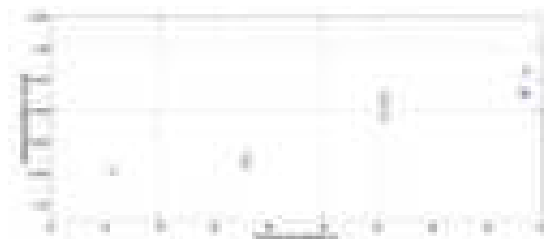


Figura 8. Indentación/masa vs. energía de impacto para la estructura tubular.

4. Conclusiones

Se determinó la capacidad de absorción de energía de elementos tubulares fabricados con fibra de carbono tejida / epoxi (AS4/8552) y de sección de caja, en función de la carga aplicada, la energía absorbida, el desplazamiento máximo, la indentación instantánea de impacto y el tiempo de contacto.

Se observó una relación lineal entre el pico de carga/masa frente a la energía de impacto, el tiempo de contacto frente a la energía de impacto para el primer y segundo pico de carga, correspondientes a una carga umbral de agrietamiento de la matriz y de delaminación, respectivamente.

Se observó una relación lineal entre la energía absorbida/masa, el desplazamiento vertical máximo/masa y la relación de indentación instantánea por impacto con la energía de impacto.

El ruido y las oscilaciones mostradas en el pico máximo de la carga/masa frente a la energía de impacto

en los ensayos de estructuras tubulares es mayor que el obtenido en los ensayos de placas laminadas.

La necesidad de disponer de elementos estructurales en los vehículos y con el fin de proteger a los ocupantes de los mismos permitió ensayar tubos con una masa adecuada que absorbieran la energía sin fracturarse.

Los mecanismos de fallo sugeridos son la rotura de la matriz, la delaminación y la rotura de las fibras tanto en compresión como en tensión. Este comportamiento se ha evidenciado en las curvas de masa de carga máxima frente a la energía de impacto y en la curva de tiempo frente a la energía de impacto. Se determina que la carga máxima es directamente proporcional a la energía de impacto.

La estructura tubular es capaz de absorber una mayor energía lo que garantiza la seguridad de los ocupantes. Cuanto mayor sea el desplazamiento de la estructura, mayor será la absorción de energía.

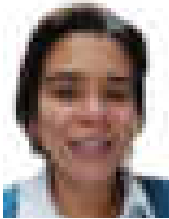
5. Referencias

- [1] Akca, E., Gursel, A.: A review on the matrix toughness of thermoplastic materials. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 3(2) pp.1-8 (2015).
- [2] Abrate, S.: Modeling of impacts on composite structures. *Composite structures*, 51(2), pp.129-138 (2001).
- [3] Lim, T. S. M., Lee, D. G.: (2002). Mechanically fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes. *Composite structures* 56(2), pp. 211-221 (2002).
- [4] Yan, L., Chou, N., Jayaraman, K.: On energy absorption capacity, flexural and dynamic properties of flax/epoxy composite tubes. *Fibers and Polymers*, 15(6), pp.1270-1277 (2014).
- [5] Remacha, M., Sánchez-Sáez, S., López-Romano, B., Barbero, E.: (2015). A new device for determining the compression after impact strength in thin laminates. *Composite Structures* 127, pp. 99-107 (2015).
- [6] Ivañez, I., Garcia-Castillo, S. K., Sanchez-Saez, S., & Barbero, E.: Analysis of the impact location on damage tolerance of bonded-repaired composite laminates. *Polymer Testing*, 78, (2019).
- [7] Carrera, M., Cuartero, J., Miravete, A., Jergeus, J., Fredin, K.: Crash behaviour of a carbon fibre floor panel. *International journal of vehicle design* 44(3-4), pp. 268-281 (2007).
- [8] Cheon, S. S., Choi, J. H.: Development of the composite bumper beam for passenger cars. *Composite structures* 32(1-4), pp. 491-499 (1995).
- [9] Botkin, M. E., Modelling and optimal design of a carbon fibre reinforced composite automotive roof. *Engineering with Computers* 16(1), pp. 16-23 (2000).
- [10] Feraboli, P., Masini, A., Taraborrelli, L., Pivetti, A.: Integrated development of CFRP structures for a topless high performance vehicle. *Composite Structures* 78(4), pp. 495-506 (2007).
- [11] Lim, T. S., Lee D. G.: Mechanically fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes. *Composite structures* 56(2), pp. 211-221 (2002).
- [12] Palmer, D.W., Lawrence, C.B., Gentry, T.R.: Progressive tearing failure of pultruded composite box beams: experiment and simulation. *Composites Science and Technology* 58, pp.1353-1359 (1998).
- [13] Lim, T.S., y Lee, D.G.: Mechanically fastened composite side-door impact beams for passenger cars designed for shear-out failure modes. *Composites Structures* 56, pp. 211-221 (2002).
- [14] Charoenphan, S., Bank, L.C., Plesha, M.E.: Progressive tearing failure in pultruded composite material tubes. *Composites Structures* 63, pp. 45-52 (2004).
- [15] García-Castillo, S. K., Buitrago, B. L., Barbero, E.: (2011). Behavior of sandwich structures and spaced plates subjected to high-velocity impacts. *Polymer Composites* 32(2), pp. 290-296 (2011).
- [16] Sanchez-Saez, S., Barbero, E., Zaera, R., Navarro, C.: Compression after impact of thin composite laminates. *Composites Science and Technology* 65(13), pp. 1911-1919 (2005).

6. Biografía



¹Mgs. Henry H. Iza Tobar.
Doctorando Universidad Carlos III de Madrid



²Dra. Shirley K. García-Castillo,
Profesora Titular de Universidad Carlos III de Madrid.



³Dra. Inés Iváñez, Profesora Titular de Universidad Carlos III de Madrid.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	07 septiembre 2021
Fecha aceptación	26 noviembre 2021

ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE MEDICIÓN EN EL CONTROL DIMENSIONAL DE PIEZAS CÓNICAS.

ESTIMATION OF THE UNCERTAINTY OF MEASUREMENT IN THE DIMENSIONAL CONTROL OF CONICAL PARTS.

¹Mauricio D. Chiliquinga M., ²Edison D. Mañay Ch.

¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE- Centro de Estudios de Posgrado
e – mail: ¹mdchiliquinga@espe.edu.ec, ²edmanay@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 6 (09)

Resumen

El éxito de las empresas está en la calidad de los productos. Es por ello que, se apalancan en el conocimiento de la metrología, que es la ciencia que estudia las mediciones. El objetivo de esta investigación es verificar las características dimensionales de una pieza cónica y de acuerdo a las especificaciones tomar decisiones de conformidad.

Los elementos de máquinas, se caracterizan por tener tolerancias exigidas a cotas fundamentales muy estrechas, alcanzando en algunas de ellas valores por debajo de los cinco micrómetros en piezas de uso aeronáutico. Es por ello que, para la inspección por contacto de la pieza cónica se usó una máquina de medición por coordenadas (CMM).

Es importante conocer la incertidumbre de medición para el control de calidad. Metrologicamente la incertidumbre es un parámetro que acompaña al resultado alineada y ajustada a las tolerancias que son los límites de aceptación vinculados a una pieza específica. En este artículo, para estimar la incertidumbre, se aplica y se interpreta los resultados en base a la norma ISO-10012 de modo que se determine si el producto se encuentra en la zona de conformidad o no. Hay que tomar en cuenta que las imprecisiones métricas abren una enorme brecha al desperdicio gastando significativamente los recursos de la organización.

Palabras Clave: Calidad, incertidumbre, medición, metrología, tolerancia.

Abstract

The exit of the companies is in the quality of the products. That is why they leverage the knowledge of metrology, which is the science that studies measurements. The objective of this investigation is to verify the dimensional characteristics of a conical part and, according to the specifications, to make conformity decisions.

The machine elements are characterized by having tolerances required at very narrow fundamental levels, reaching values below five micrometers in parts for aeronautical use in some of them. For this reason, a coordinate measuring machine (CMM) was used for the contact inspection of the conical part.

Knowing the uncertainty of measurement is important for quality control. Metrologically, uncertainty is a parameter that accompanies the result aligned and adjusted to the tolerances that are the acceptance limits linked to a specific piece. In this article, to estimate the uncertainty, the results are applied and interpreted based on the ISO-10012 standard in order to determine if the product is in the conformity zone or not. It must be taken into account that metric inaccuracies open a huge gap to waste, significantly expending the organization's resources.

Keywords: Quality, uncertainty, measurement, metrology, tolerance.

1. Introducción

La presente investigación tiene por finalidad establecer el valor de incertidumbre en la medición de piezas de forma cónica. Toda medición lleva implícita una incertidumbre [1]. Es un parámetro vital para mantener el control y el aseguramiento de la calidad en la producción. [2]

Las crecientes exigencias de calidad imponen la utilización de tolerancias cada vez más pequeñas y con frecuencia hay que trabajar con relaciones $T/2U$ inferiores a diez. [3]

En los procesos para control de calidad se manifiesta, constantemente la necesidad de sistemas más acertados para evaluar las características geométricas de los productos industriales [4]. Entre la diversidad de medios la máquina de medición por coordenadas o CMM (Coordinate Measuring Machine) es el medio más eficaz. Es un instrumento de medición directa que utiliza un palpador, que es un captador de posición por contacto [4], permite localizar puntos sobre cualquier tipo de superficie, con el fin de realizar un control de calidad de una determinada pieza manufacturada.

De acuerdo a la norma internacional ISO 10012 acreditadora de los sistemas de calidad de medición para laboratorios especializados en mediciones, especifica que el valor de incertidumbre debe ser de 3 a 10 veces menor al semi intervalo de tolerancia asignado a la pieza a medirse como se muestra en la figura 1, siendo este el criterio de aceptación o rechazar los elementos medidos. [5]

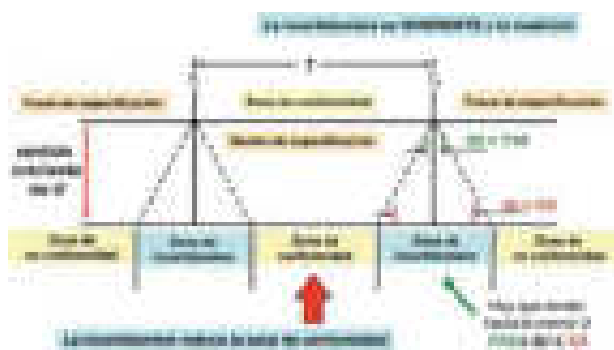


Figura 1. Tolerancia de diseño e incertidumbre de una medida.

Nota. Adaptado de Errores, incertidumbres y evaluación de la conformidad (p.97), por Sánchez et al., 2019, Revista Española de Metrología, 1, 93-103.

Se recomienda que el equipo de medición empleado para la verificación de una característica concreta tenga 10 veces menos incertidumbre que la tolerancia

a verificar. [5]

Fundamentación teórica

Metrología. Ciencia de las mediciones y sus aplicaciones. La metrología incluye todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones, cualesquiera que sean su incertidumbre de medida y su campo de aplicación. [7]

Incetidumbre de medición. Según el VIM, es el parámetro asociado al resultado de una medición, que caracteriza la dispersión de los valores que podrían atribuirse razonablemente al mensurando. [2]

Incetidumbre estándar: incetidumbre del resultado de una medición expresado como desviación estándar.

Evaluación tipo A (de incetidumbre): método de evaluación de incetidumbre por análisis estadístico de serie de observaciones.

Evaluación tipo B (de incetidumbre): método de evaluación de incetidumbre por otras vías diferentes al análisis estadístico de serie de observaciones. [8]

Estimación. Lleva a cabo un conjunto de operaciones con el objetivo de determinar (aproximar) el valor de una magnitud. El valor de la medición depende de su correcta realización y una interpretación adecuada. [8]

Medición. Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud. [7]

Magnitud. Atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia, que es susceptible de ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. [2]

Mensurando. El propósito de una medición es determinar el valor de una magnitud, llamada el mensurando, el cual es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente. La definición del mensurando es vital para obtener buenos resultados de la medición. [9]

Fuentes de incertidumbre

Una vez determinados el mensurando, el principio, el método y el procedimiento de medición, se identifican las posibles fuentes de incertidumbre.[1]

Éstas provienen de los diversos factores involucrados en la medición, por ejemplo:

- Los resultados de la calibración del instrumento.
- La incertidumbre del patrón o del material de referencia.
- La repetibilidad de las lecturas.
- La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos.
- Características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.
- Variaciones de las condiciones ambientales.
- La definición del propio mensurando.
- El modelo particular de la medición.
- Variaciones en las magnitudes de influencia

Cálculo de la incertidumbre

Principalmente se distinguen dos métodos principales para cuantificar las fuentes de incertidumbre: El Método de Evaluación Tipo A está basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones, mientras el Método de Evaluación Tipo B comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre, se supone una distribución con base en experiencia o información externa al metrologo. [9]

Para la presente investigación se evaluación la incertidumbre en base al tipo A, se estima basándose en mediciones repetidas obtenidas del mismo proceso de medición a través de métodos estadístico.

Evaluación tipo A de la incertidumbre estándar

La incertidumbre de una magnitud de entrada X_i obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Para el cálculo de la incertidumbre no se puede dar una recomendación general para el número ideal de las repeticiones (n), ya que éste depende de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición específica [1]. Hay que considerar que:

- Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre.
- Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo.
- En algunos casos se recomienda o se requiere que n sea mayor de 10 en donde las mediciones son de alta exactitud.

Para la evaluación de la incertidumbre, hay que tomar en cuenta que toda variable aleatoria responde a una cierta ley de distribución que se expresa a través de la denominada función de distribución normal o simplemente función de densidad de probabilidad de X , la cual se define de la siguiente forma:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (1)$$

Donde: $f(x)$ se denomina función de densidad de probabilidad. En la figura 2, se representa la distribución normal, que indica la probabilidad de que la variable μ tome valores fuera del intervalo $\mu \pm 3\sigma$ es prácticamente cero [10].



Figura 2. Distribución de probabilidad alrededor de la media en una distribución $N(\mu, \sigma^2)$.

Nota. Adaptado de Distribución normal [Fotografía], por Wikipedia, 2019, (https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_normal).

La función de distribución normal es utilizada en el cálculo de la incertidumbre cuando:

- Existe un estimado de observaciones repetidas de un proceso que varía aleatoriamente.
- También cuando un estimado en forma de un intervalo de confianza de un 99 % (u otro) de probabilidad sin especificar la distribución. [10]

Nivel de confianza

El factor para un nivel de confianza dado se obtiene a partir de la distribución t de Student con n-1 grados

de libertad, siendo n el número de mediciones, o bien de la distribución normal, si el número de reiteraciones es suficientemente grande. [11]

Distancia radial

La distancia radial es la medida existente entre dos objetos con ubicación distinta.

Matemáticamente es la longitud de un segmento de recta comprendido entre dos o más puntos en el espacio. [12]

$$d = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{1}$$

Media Aritmética

La media o el valor medio que resulta de un número de medidas se define como la suma de los resultados dividido entre el número de medidas [13]:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i / d)}{n} \tag{2}$$

Desviación Estándar

La desviación estándar del promedio de las muestras, es la función estadística utilizada para la cuantificación de la incertidumbre estándar de medición. [10]

$$s(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{3}$$

La incertidumbre estándar de la media se estima en este caso por [10]:

$$s(\bar{x}) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \tag{4}$$

Incertidumbre Estándar de Medición

El valor de incertidumbre se la obtiene mediante la multiplicación de la incertidumbre estándar de medición por un valor de nivel de confianza. [14]

$$u = s(\bar{x}) \cdot t_{(n-1, 99\%)} \tag{5}$$

Donde:

- u: Valor de incertidumbre estándar de la medición.
- s(x): Desviación estándar de la media.
- $t_{(n-1, 99\%)}$: Nivel de confianza al 99 % y grados de libertad de n-1.

2. Materiales, fuentes y métodos

La incertidumbre se obtiene en función de la norma ISO 10012. El cual indica el procedimiento para calcular el valor de incertidumbre en base al factor de confianza.

Para el cálculo de la incertidumbre se debe obtener un número suficiente de datos en diferentes posiciones. El conjunto de datos obtenidos se utiliza en el cálculo de la distancia radial, la media aritmética, desviación estándar, desviación estándar de la media, distribución normal e incertidumbre, que permiten establecer el criterio si la pieza manufacturada se encuentra en la zona de conformidad o no.

Una máquina de medición por coordenadas permite la medición con precisión, exactitud de las dimensiones de una pieza manufacturada. Por lo cual se emplea una CMM (Figura 3) con las siguientes características: exactitud del 99,8913% y repetibilidad de 0,13017752 mm, el cual cumple con los estándares de control de calidad [14].

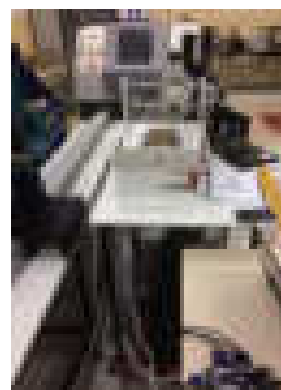


Figura 3. CMM de control de calidad

3. Resultados y Discusión

Cuando se da a conocer el resultado de la medición de una cierta cantidad física, es indispensable dar una indicación cuantitativa de la calidad del resultado, para que pueda tenerse una idea de su confiabilidad. Sin esto, es imposible hacer comparaciones de dichos resultados, ya sea entre ellos mismos, o con valores de referencia. Por ello debe existir un procedimiento comprensible y aceptado generalmente que lleve a una evaluación y expresión apropiada de la incertidumbre. [15]

En la norma internacional ISO 10012 encargada de especificar los requerimientos genéricos y asesoramiento para los procesos de medición y

conformación metrológica de los equipos de medición, se establece parámetros para obtener la incertidumbre de medición. En la presente se va a realizar la prueba de cálculo de error de conicidad para determinar la incertidumbre de dichas mediciones.

En la Figura 4, se presenta el elemento cónico utilizado en el análisis.

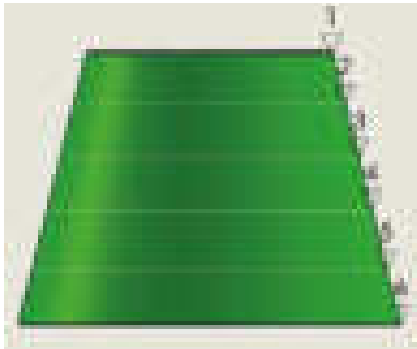


Figura 4. Pieza cónica, elemento de prueba

Nota. La pieza de análisis tiene una forma cónica y se la encuentra en los acoples para aseguramiento de herramientas de corte sobre centros de mecanizado CNC.

El proceso de medición consiste en tomar 12 puntos indistintos por cada nivel, 6 niveles por cono, con un total de 72 lecturas, como se muestra en la Figura 5.

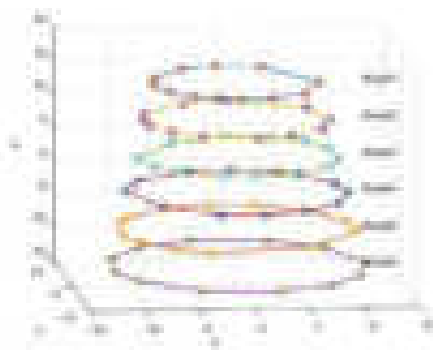


Figura 5. Pieza cónica, elemento de prueba

En las Tabla 1, se presenta los datos obtenidos en las mediciones del cono de (32,58 mm de altura, 22.21 mm de radio mayor y 12.81 mm de radio menor) y una tolerancia de ± 0.3 mm emitida por el fabricante.

Figura 4. Representación de las curvas de la fuerza/masa vs. energía de impacto para la estructura tubular.

Nº	h (mm)	r (mm)	R (mm)	Medición Efectiva	Intervalo Mayor a Menor	Mediciones Normal
Nivel 1						
1	1.211	7	22.2	12.82046	12.82046	12.82046
2	1.19	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
3	1.19	6.99	22.2	12.82074	12.82074	12.82074
4	2.015	7.01	17	12.82047	12.82047	12.82047
5	2.015	6.99	17	12.8207	12.8207	12.8207
6	4.017	7.015	22.2	12.82023	12.82023	12.82023
7	4.017	6.99	22.2	12.82043	12.82043	12.82043
8	5.117	7.011	22.2	12.82079	12.82079	12.82079
9	5.115	6.99	17	12.82049	12.82049	12.82049
10	4.017	7.01	17	12.82019	12.82019	12.82019
11	4.017	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
12	4.115	7.01	22.2	12.82043	12.82043	12.82043
Nivel 2						
1	1.192	7.01	22.2	12.82043	12.82043	12.82043
2	1.188	6.99	22.2	12.82046	12.82046	12.82046
3	1.19	7.01	22.2	12.82059	12.82059	12.82059
4	1.19	6.99	22.2	12.82077	12.82077	12.82077
5	2.015	7.01	22.2	12.82019	12.82019	12.82019
6	2.015	6.99	22.2	12.82043	12.82043	12.82043
7	4.017	7.015	22.2	12.82046	12.82046	12.82046
8	4.017	6.99	22.2	12.82046	12.82046	12.82046
9	5.117	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
10	5.115	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
11	4.017	7.015	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
12	4.017	6.99	22.2	12.82043	12.82043	12.82043
Nivel 3						
1	1.192	7.01	22.2	12.82049	12.82049	12.82049
2	1.188	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
3	1.19	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
4	1.19	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
5	2.015	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
6	2.015	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
7	4.017	7.015	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
8	4.017	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
9	5.117	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
10	5.115	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
11	4.017	7.015	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
12	4.017	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
Nivel 4						
1	1.191	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
2	1.189	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
3	1.19	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
4	1.19	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
5	2.015	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
6	2.015	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
7	4.017	7.015	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
8	4.017	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
9	5.117	7.01	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
10	5.115	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
11	4.017	7.015	22.2	12.82041	12.82041	12.82041
12	4.017	6.99	22.2	12.82041	12.82041	12.82041

Nivel 1						
1	2.174	2.16291	2.171	15.7771124	15.7822227	15.7811241
2	2.167	2.16	2.175	15.7841125	15.7821124	15.7811241
3	2.167	2.164	2.175	15.7821125	15.7822227	15.7811241
4	2.168	2.161	2.175	15.7821125	15.7822227	15.7811241
5	2.1675	2.164	2.171	15.7811124	15.7822227	15.7811241
6	2.167	2.164	2.171	15.7811124	15.7822227	15.7811241
7	2.167	2.164	2.171	15.7811124	15.7822227	15.7811241
8	2.167	2.164	2.171	15.7811124	15.7822227	15.7811241
9	2.167	2.164	2.171	15.7811124	15.7822227	15.7811241
10	2.167	2.164	2.171	15.7811124	15.7822227	15.7811241
11	2.167	2.164	2.171	15.7811124	15.7822227	15.7811241
12	2.167	2.164	2.171	15.7811124	15.7822227	15.7811241
Nivel 2						
1	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
2	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
3	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
4	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
5	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
6	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
7	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
8	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
9	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
10	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
11	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241
12	2.165	2.164	2.164	15.7811124	15.7822227	15.7811241

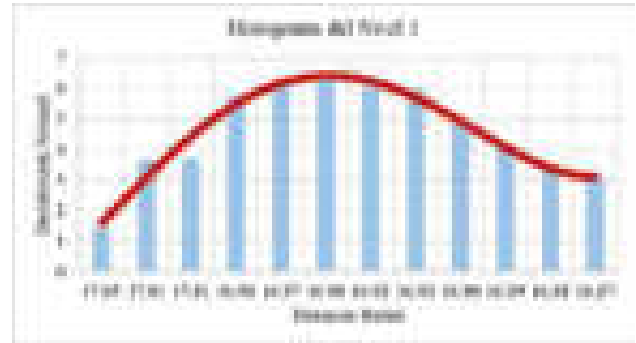


Figura 7. Distribución normal estándar del nivel 1.

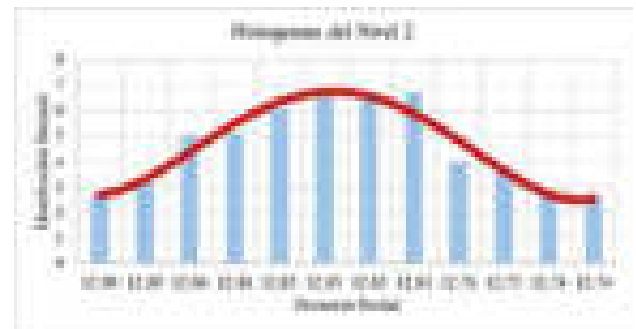


Figura 8. Distribución normal estándar del nivel 2.

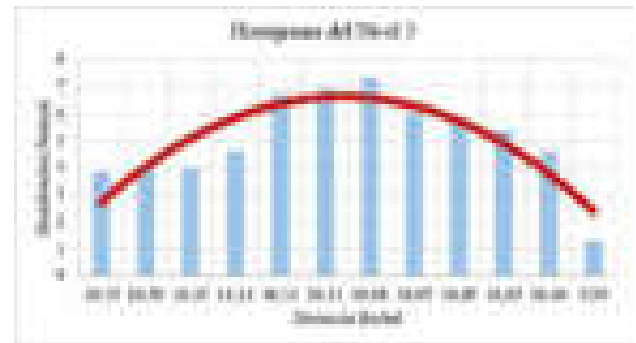


Figura 9. Distribución normal estándar del nivel 3.

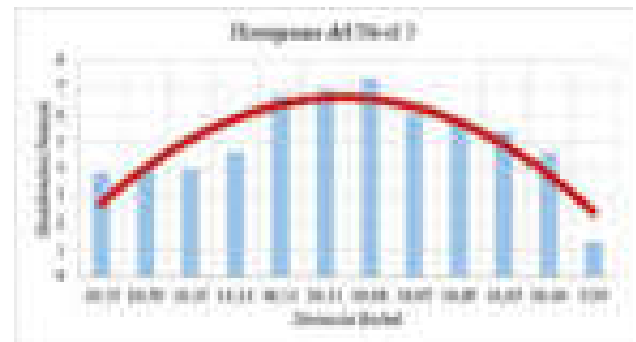


Figura 9. Distribución normal estándar del nivel 3.

A partir de las coordenadas (x,y,z), se calcula la distancia radial (d) mediante la Ecuación 2, es la distancia entre el centro del cono (punto de origen (0,0,0) de la pieza) y el punto sondeado. En la Figura 6, se presenta la distancia radial con respecto al origen de la pieza. La distancia radial es un valor fundamental para los cálculos siguientes.

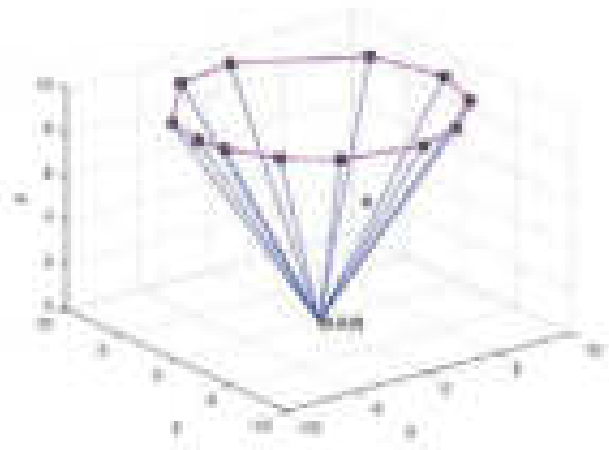


Figura 6. Distancia radial del Nivel 2 con respecto al punto de origen.

En las Figuras 7, 8, 9, 10, 11, 12, se presenta los resultados que se aproximan a la campana de Gauss en base a los cálculos aplicados con la Ecuación 1.

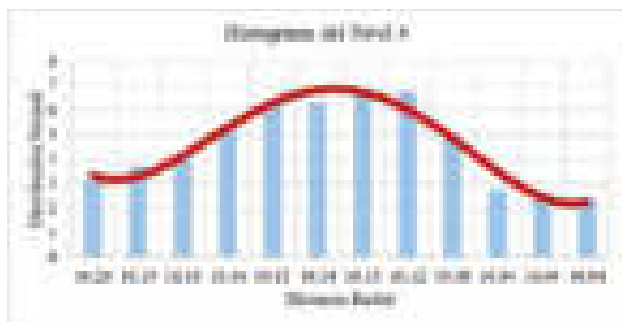


Figura 10. Distribución normal estándar del nivel 4.

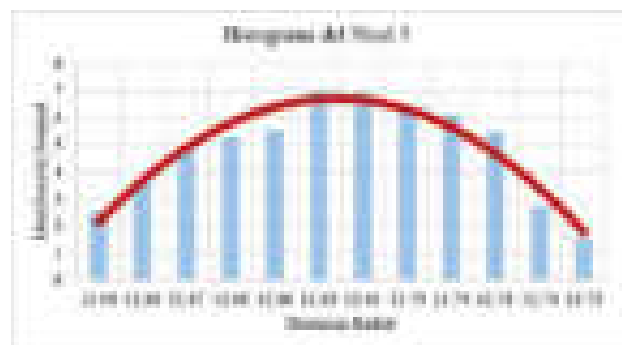


Figura 11. Distribución normal estándar del nivel 5.

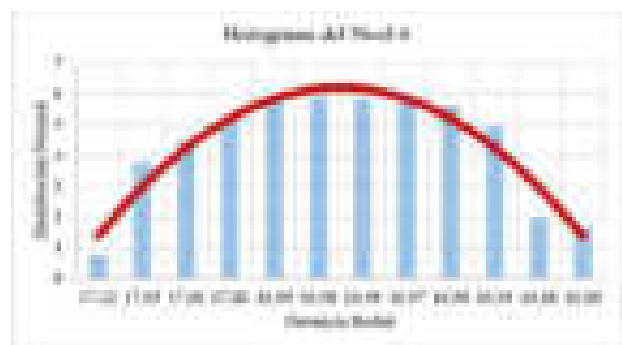


Figura 12. Distribución normal estándar del nivel 6.

Se puede visualizar en las Figuras 7-12, que el valor real de medición para una determinada posición se encuentra dentro del rango de la Distribución Normal Estándar ya que no supera la tolerancia de 0.3mm, la finalidad es validar el valor de incertidumbre de cada muestra.

Para obtener un resultado concluyente de la incertidumbre de medición con la CMM, tomamos los resultados de la distribución normal de Tabla 1, por cada nivel y aplicamos las ecuaciones 3, 4, 5, 6.

De acuerdo a la tabla de nivel de confianza [6], valores críticos de la distribución t de Student y según los grados de libertad “n-1”, es decir un grado de libertad de 11 de acuerdo a las 12 lecturas por cada nivel y con un factor de confianza del 99% (3,11), todos estos datos son específicos para muestras

menores de 20 lecturas, se obtiene los datos necesarios para la ecuación 6.

En la Tabla 2, se presenta los resultados con una incertidumbre al 99 % de nivel de confianza.

Tabla 2. Resultado de Incertidumbre al 99 % de confianza

Muestra	Promedio	Desviación Estándar	Desviación Media	Incertidumbre 99 %
Nivel 1	16,94628 0	,059411	0,01715	0,0533
Nivel 2	12,81784 0	,058456	0,016874	0,05248
Nivel 3	10,08932 0	,054103	0,015618	0,048572
Nivel 4	10,12232 0	,058816	0,016978	0,052804
Nivel 5	12,81824 0	,056768	0,016387	0,050965
Nivel 6	16,98313 0	,06798 0	,01962	0,06103

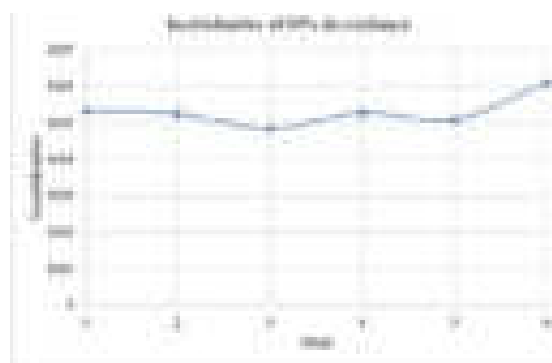


Figura 13. Incertidumbre al 99% de confianza.

El cono utilizado para la prueba tiene una tolerancia de $\pm 0.3\text{mm}$ emitido por el fabricante y de acuerdo con el criterio de seguridad de la norma ISO 10012, el valor de la incertidumbre debe ser como mínimo 3 veces menor al semi-intervalo o al valor medio de la tolerancia, es decir, tres veces menor a 0.3 mm.

Como se puede observar en la Tabla 2 y en la Figura 13, en las 72 muestras tomadas (12 por cada nivel), el valor de incertidumbre al 99 % de nivel de confianza varía entre 0.048 mm y 0.061mm, siendo estos datos aproximadamente 3 veces menor al valor medio de la tolerancia establecida por el fabricante, por lo que se puede indicar que las mediciones realizadas por el CMM proyectan un valor de medida muy cercano a la real y estos se encuentran dentro del criterio de aceptación de la norma ISO 10012.

4. Conclusiones

En cualquier medición siempre se tiene presente una serie de errores procedentes de distintas fuentes:

el mensurando, el instrumento de medida, las condiciones ambientales, el operador.

Para expresar el resultado de medición de una magnitud física, es obligado dar alguna indicación cuantitativa de la calidad del mismo ya que, sin dicha indicación, las mediciones no pueden compararse entre sí, ni con valores de referencia.

Las mediciones deben expresarse, en general, en la forma $Y \pm U$, donde Y es el resultado más probable (normalmente el valor medio de una serie de mediciones) y U es la incertidumbre de medida asociada al mismo. Cuanto menor sea la incertidumbre U del resultado de la medida más amplia será la zona de conformidad, de modo que las piezas tendrán una mejor calidad.

El valor de incertidumbre calculado es de 3 veces menor a la tolerancia con un nivel de confianza al 99%, por lo cual el cono medido se encuentra dentro de la zona de conformidad y cumple con los estándares de calidad; lo que ayuda a mejorar, asegurar el nivel de calidad de los productos manufacturados y de esta manera tomar las decisiones idóneas en cuanto aceptar o rechazar las piezas.

5. Referencias

- [1] Schmid, W. A., & Lazos, R. (2000). Guía para estimar la incertidumbre de la medición. CENAM, El Marquez, Qro., México.
- [2] Hipp, J., Hill, C., & Hall, M. (2007). Evaluación de datos de medición Guía para la Expresión de la Incertidumbre de Medida. España. NIPO.
- [3] Sánchez Pérez, Ángel & de Vicente y Oliva, Jesús & Prieto, Emilio. (2012). Errores, incertidumbres y evaluación de la conformidad. Revista Española de Metrología, 1, 93-103.
- [4] Onaciu, T. (2004). Sistemas para la adquisición de puntos en máquinas de medir por coordenadas. Informador Técnico, 68, 29–35. <https://doi.org/10.23850/22565035.811>
- [5] Sevilla-Hurtado, L. (2001). Análisis comparativo y propuesta metodológica para la evaluación de incertidumbres en métodos de medida indirecta de ángulos (Doctoral dissertation, Universidad de Málaga).
- [6] Sevilla, J. M. O. (2014). La incertidumbre en la medida de una magnitud y el método de Montecarlo. Técnica Industrial, 306, 54-64.
- [7] IMNC, N. M. (2008). Vocabulario internacional de metrología—Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM).
- [8] Cuello Mejía, D. A. (2015). Metodología para la estimación de incertidumbre en la calibración en un laboratorio de metrología. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica.
- [9] Acosta Ortega, J. R. (2009). Investigación de los elementos que actúan sobre la incertidumbre de la medición (Doctoral dissertation, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas).
- [10] Ruiz, S. S., & Avila, L. F. (2001). Incertidumbre de la medición: teoría y práctica. Maracay: L&S Consultores.
- [11] Hernández, M. M. P. (2012). Estimación de incertidumbres. Guía GUM. Revista Española de Metrología, 1(3), 113-130.
- [12] Flack, D. (2001). Measurement Good Practice Guide No. 42. CMM Verification. National Physical Laboratory.
- [13] Mook, W. G. (Ed.). (2002). Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico (Vol. 1). IGME.
- [14] Chiliquinga Malliquinga, M.D. & Jara Ramos, W. M. (2017). Diseño e implementación de una celda de manufactura flexible de orden aleatorio y distribución en línea con control de calidad para prácticas de FMS en el laboratorio De CNC. [Tesis de Ingeniería, Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE" Extensión Latacunga].
- [15] Miranda, J. (2001). Evaluación de la incertidumbre en datos experimentales. Instituto de Física, UNAM, México.

6. Biografía



¹Mauricio Chilibingua. – Ingeniero en Mecatrónica, Maestrante en Electrónica y Automatización mención Redes Industriales (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE), Desarrollador Electrónico en Person Technology en Salcedo, Ecuador.



²Edison Mañay. – Ingeniero en Mecatrónica, Maestrante en Electrónica y Automatización mención Redes Industriales (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE), Fundador de Alfa Soluciones e Ingeniería, Consultor en proyectos de Automatización y redes IoT en Salcedo, Ecuador.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	23 abril 2021
Fecha aceptación	14 junio 2021

EFECTO DE AVANCE AL ENCENDIDO Y TIEMPO DE INYECCIÓN DE UN SWAP DE MOTOR SERIE B A 2800 MSNM UTILIZANDO ELECTRÓNICA PROGRAMABLE PARA MEJORAR LA POTENCIA.

EFFECT OF THE IGNITION TIMING ADVANCE AND INJECTION TIMING OF A SERIE B SWAP ENGINE AT 2800 MAMSL USING PROGRAMMABLE ELECTRONICS TO IMPROVE THE POWER.

¹David Arturo Del Castillo Freire, ²Jorge Fernando Suárez Aimacaña
¹Universidad Internacional del Ecuador, Facultad de Ciencias Técnicas, Escuela de Ingeniería Automotriz
e – mail: ¹dadelcastillofr@uide.edu.ec, ²josuarezai@uide.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 7 (09)

Resumen

Una de las alternativas más efectivas para incrementar las prestaciones de potencia y torque de un motor de combustión interna es la electrónica programable automotriz; el presente proyecto de investigación busca ser una guía práctica para aficionados y profesionales especializados en el tema; al programar paso a paso los submapas de combustible e ignición de una ECU programable Fueltech FT 600, instalada en un vehículo Honda Civic, con un Swap de motor constituido por un bloque de la serie B20Z y un cabezote de la serie B16B tipo R, propulsado con gasolina de alto octanaje Sunoco Standard. Se aplica el método experimental, a través de dos variables independientes y una dependiente. Las dos variables independientes corresponden a la manipulación numérica -programación- del ancho de pulso de inyección y del ángulo de avance al encendido, las cuales inciden en la mejora de potencia y torque del motor, siendo ésta la variable dependiente; proceso corroborado mediante diversos ensayos desarrollados en un dinamómetro inercial de chasis MWD RR760 regido por la normativa SAE J1349. La programación de los submapas de combustible e ignición, permitió alcanzar una ganancia neta de 44,1 CV en potencia y de 2,0 kg*m en torque, resultado arrojado por el último ensayo dinamométrico efectuado en el proceso de programación.

Palabras Clave: Avance al encendido, ECU programable, SAE J1349, sensor de banda ancha, tiempo de inyección.

Abstract

*One of the most effective alternatives to increase the power and torque performance of an internal combustion engine is automotive programmable electronics; this technical material tries to be a useful guide to enthusiasts and specialized professionals in the topic; programming step by step the fuel and ignition maps of a Fueltech FT 600 programable ECU, installed in a Honda Civic, a Swap engine with a B20Z block and a B16B type R cylinder head, propelled with Sunoco Standard high-octane gasoline. Experimental method is applied through two independent variables and one dependent variable. The two independent variables belong to the numerical tampering -programming- of the injection pulse width and the ignition advance angle, which have an impact on the improvement of power and torque of the engine, being this the dependent variable; corroborated process with several tests carried out in a MWD RR760 chassis inertial dynamometer governed by SAE J1349 standard regulation. The programming of fuel and ignition maps allowed to reach a net gain of 39,82 CV of power and 9,69 kg*m of torque, these results were achieved in the last dynamometer test completed in the programming process.*

Keywords: Ignition timing advance, programmable ECU, SAE J1349, Wide Band, injection timing.

1. Introducción

Hace poco, los fabricantes de ECU's automotrices solían impregnar en sus unidades chips de memoria abierta que almacenaban información correspondiente a la configuración del motor en forma de datos, los cuales podían ser extraídos, leídos y posteriormente analizados [1].

El contenido de los datos era simplemente una secuencia de números que de manera superficial no tenía sentido, hasta que algunas compañías especializadas en el tuneo de datos, actualmente conocidas como fabricantes de ECU's programables empezaron a manipular y alterar sus funciones para evidenciar el efecto en el rendimiento del motor. Al comienzo no se demostró un resultado satisfactorio, sin embargo, en ocasiones los vehículos alcanzaban velocidades mayores, corroborándose un incremento en su potencia [1].

El mapeo de computadoras automotrices es una especialidad cuyo fin busca mejorar las prestaciones de torque y potencia de un motor de combustión interna a través de la adaptación y manipulación de una ECU programable en función de dos variables que desempeñan un rol fundamental en el sistema de gestión electrónica: el efecto de avance al encendido y el tiempo de inyección, las cuales operan con base en el comportamiento de ciertos parámetros como: revoluciones del motor, posición de la mariposa de aceleración, presión absoluta del múltiple de admisión, corrección de la mezcla aire-combustible, y temperatura del líquido refrigerante [2].

El proceso de programación de una ECU programable empieza con el seteo de los sensores y actuadores del motor, de acuerdo con sus especificaciones y características de operación, obteniendo como resultado un mapa denominado base, por parte de la computadora de manera automática, tanto de avance al encendido medido en grados, así como de tiempo de inyección medido en milisegundos.

Generalmente todo mapa base es ajustado y modificado con el objeto de obtener mayores prestaciones de potencia, generándose otro u otros mapas denominados programaciones.

Un motor destinado a competición puede tener diversos mapas conforme a condiciones específicas, tales como: la geometría de la pista; habilidad, desempeño, y forma de conducción del piloto.

El ajuste y calibración del motor se lo realiza modificando en la ECU programable los parámetros operativos de cada zona del mapa base, mediante el uso de un dinamómetro de chasis, a través del cual es posible determinar si el rendimiento obtenido del motor se ajusta a las especificaciones deseadas en cada una de sus zonas de operación [3].

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

Para el desarrollo del presente artículo se empleó una ECU programable Fueltech FT600.

Tabla 1. Especificaciones generales y técnicas de la ECU programable Fueltech FT600.

Generales	Capacidad de control de potencia (por cilindro)	1-12
	Programación en tiempo real	Pantalla táctil - 7"
	Panel de instrumentos	Pantalla táctil, división horizontal en 4 pantallas
	Leds de cambio de revoluciones con luz progresiva	10
	Tubo para indicación de estado de la luz	1
	Chasis	Aluminio impermeable
	Pantalla de tablero	4,3" táctil
	Peso	788 gr (143,84 x 143,84 x 61,17) mm
	Dimensiones	50,98 x 61,17 mm
	Resolución de tiempo de inyección	0,001 ms
Técnicas	Resolución de tiempo de ignición	0,1 ms
	Canales de entrada	22
	Canales de salida	32
	Capacidad de almacenamiento	2k 00 min
	Canales internos de almacenamiento	256
	Resolución de datalogger	200 Hz
	Protector de Rayos UVS - UVA	1

Un Swap -cambio de ciertas partes mecánicas de un motor- de Honda, constituido por un bloque de la serie B20Z y un cabezote de la serie B16B tipo R; además de contar con algunas modificaciones adicionales como camisas y bielas forjadas, pistones de alta compresión, entre otras; incorporado en un vehículo tipo Hatchback modelo Civic del 2001.

Tabla 2. Especificaciones técnicas del Swap del motor B20Z y B16B Tipo R.

SWAP Motor B20Z y B16B Tipo R	Cilindrada	1999 cc/cm ³
	Compresión	10*
	Diámetro	81 mm
	Carrera	89 mm
	Relación biela/carrera	1,58:1
	Longitud de biela	137 mm
	Distribución	16VHC
	Potencia Máx.	101,55 Hp (7500 rpm)
	Velocidad Máx.	180 km/h
	Velocidad Máx. (1000 rpm)	27,61 Km/h
	Velocidad Máx. (2000 rpm)	55,22 Km/h
	Velocidad Máx. (3000 rpm)	82,83 Km/h
	Velocidad Máx. (4000 rpm)	110,44 Km/h
	Velocidad Máx. (5000 rpm)	138,05 Km/h

Un dinamómetro de rodillo inercial de chasis MWD RR760. rtidumbre de medida y su campo de aplicación. [7]

Tabla 3. Especificaciones del Dinamómetro de Rodillo Inercial de Chasis MWD RR760.

Medidas de Adaptación de Troncos		Accesibilidad
Dimensiones del Chasis	Longitud	2870 mm
	Ancho	970 mm
Dimensiones del Rodillo	Presión Máx.	790 mm
	Diámetro	720 mm
	Longitud	2200 mm
	Potencia Máx.	700 Hp

Carga y Rango de Operación	Potencia Máxima	700 Hp
	Velocidad Máxima	120 Km/h
	Peso total del Equipo	2000 Kg
	Máxima carga por eje	1000 Kg

Gasolina de alto octanaje Sunoco Standard de 110 octanos.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de gasolina Sunoco Standard.

Sunoco Standard	Octanaje Unleaded (R+M)/2	110 octanos
	Octanaje RUC (Unleaded)	114 octanos
	Octanaje MON (Motor Octanaje)	100 octanos
	Relación Aromatización	14:8:1
	Alto Octanaje	111:0:5
	Relación de compresión	11:1 en estándar

Es menester puntualizar que, para el Swap del motor, se decidió apostar por un sistema de inyección electrónica de tipo secuencial; se optó por instalar un módulo EPM de AEM en el conjunto del árbol de levas, el que incorpora internamente la sincronización de los sensores CKP y CMP, imprescindible para el encendido e inyección secuencial.

Tabla 5. Especificaciones del módulo de posición del motor EPM de AEM.

EPM AEM			
Sensor (Efecto Hall)	Pulsos	Grados por Ciclo	Voltaje de operación
CKP	24	720°	(0-12) V
CMP	1	360°	(0-12) V

2.2 Métodos

Este artículo fue elaborado a través de un método experimental, con dos variables independientes

y una dependiente, interpretadas como causa y efecto respectivamente [9]. La primera variable independiente es el tiempo de inyección, la segunda el avance al encendido; dando como resultado la variable dependiente, que corresponde a la mejora de las prestaciones de potencia y torque del motor.

Conforme a la planificación establecida en función de la utilidad del vehículo, se elaboró un mapa, exclusivo para competir en la icónica carrera, Las Seis horas de Yahuarcocha, impulsado con gasolina Sunoco Standard de 110 octanos.

La programación se desarrolló en la ciudad de Otavalo, localizada a una altitud de 2536 msnm, a una presión atmosférica de 75,30 KPa y a una temperatura local de 26 °C.

2.2.1 Procedimiento

La programación de una ECU programable inicia con su respectivo seteo, en el que se configuran parámetros específicos relacionados con la operación del motor, tales como: tipo de inyección, sistema y orden de encendido, compresión, sensor principal (TPS o MAP) para las tablas de inyección e ignición, entre otros.

Una vez concluido el seteo, se obtiene un mapa inicial, también conocido como mapa base, cuyo objetivo es mantener la operación del motor estable en todas las condiciones, especialmente en ralentí. Se puede definir al mapa base como el origen de las programaciones, que dan como resultado un mapa final, en el cual se ha alcanzado la máxima potencia y torque del motor, a través de una serie de manipulaciones numéricas en los submapas de combustible e ignición.

Es importante mencionar que, para conocer y corroborar las mejoras obtenidas en el mapa final a través de las programaciones, se debe emplear un dinamómetro de rodillo inercial de chasis, el cual se rige por la normativa SAE J1349 [10], cuyas condiciones ambientales utilizadas como parámetro son las siguientes:

Tabla 6. Condiciones ambientales para ensayo en el dinamómetro estipuladas en la normativa SAE J1349.

Variable Atmosférica	Condición Estándar
Temperatura del Aire	25 °C ± 10 °C
Presión Barométrica	90-105 kPa
Humedad Relativa	50% ± 20%
Velocidad del Viento	Menor a 7 m/s
Superficie de Prueba*	Superficie pavimentada dura, nivelada y seca

*Incluida en el cuadro como *Variable Atmosférica*, a pesar de no serlo, por su relevancia en el ensayo.

Antes de profundizar en la programación de los submapas de combustible, así como de ignición; hay que tomar en cuenta que ambos son gestionados por dos variables. La primera variable corresponde a las revoluciones del motor monitoreadas por el sensor CKP; la segunda y más importante, al vacío del múltiple de admisión, el cual puede ser controlado por el sensor TPS o MAP.

La elección de la segunda variable depende principalmente de: la experiencia del programador, modo de conducción del piloto, sistema de admisión del motor, tipo de competición, perfil de levas del árbol, entre otras; sin embargo, se opta por el sensor TPS, acogiendo la recomendación estipulada por el fabricante de la ECU para motores con distribución variable, en este caso, la de VTEC.

2.2.1.1 Tabla (Submapa) de Combustible

La tabla de combustible maneja el ancho de pulso de inyección medido en milisegundos, ejecutado por la ECU a través de los inyectores; en función de una tabla previamente diseñada denominada **Sonda Objetivo**, cuyos valores -factores lambda- son tomados como referencia por el programador para ajustar el ancho de pulso óptimo en cada zona operativa del motor: ralentí, crucero, y máxima potencia.

Con el fin de entender detalladamente este procedimiento, es indispensable hacer hincapié en las cuatro sondas implicadas al momento de programar el submapa de combustible:

2.2.1.1.1 Sonda Objetivo (λ objetivo)

Sus valores dictaminan el factor lambda al que se desea llegar en cada zona operativa del motor.

2.2.1.1.2 Sonda Circuito Cerrado (λ real)

Sus valores indican el factor lambda real en cada zona operativa del motor, ya que, a pesar de haber establecido valores objetivos, en la operación del motor éstos difieren irrisoriamente.

2.2.1.1.3 Corrección Sonda (corrección porcentual, dispuesta en %)

Sus valores indican la corrección porcentual aplicada al factor lambda real en cada zona operativa del motor.

2.2.1.1.4 Sonda General (λ corregido)

Sus valores indican el factor lambda real, incluido el porcentaje de corrección; es importante mencionar que es ésta con la que se programa el ancho de pulso, y la que más se aproxima al factor lambda objetivo.

Los valores recomendados para la tabla Sonda Objetivo antes mencionada son los siguientes:

Tabla 7. Valores recomendados para la tabla Sonda Objetivo.

Zona Operativa del Motor	Factor λ Recomendado (Sonda Objetivo)	Rango rpm's	Rango TPS (%)
Ralentí	1	0	0
		a	a
		2000	20
Crucero	0,975 a 0,930	2000	20
		a	a
		5000	50
Máxima Potencia	0,920 a 0,880	5000	50
		a	a
		9000	100

La programación del submapa de combustible consiste en ajustar -aumentar o disminuir- el ancho de pulso de inyección en las tres zonas operativas del motor con el uso de la Wide Band; considerando que los valores de **Sonda General** limiten con los de **Sonda Objetivo**, manteniendo un buen ritmo de operación del motor, en especial a altas cargas, lo cual es posible siempre y cuando se haya afinado de manera

impecable las correcciones porcentuales **Corrección Sonda**, aplicadas sobre **Sonda Circuito Cerrado**.

Para las correcciones porcentuales **Corrección Sonda**, aplicadas sobre **Sonda Circuito Cerrado**, se recomiendan los siguientes valores:

Tabla 8. Valores porcentuales de corrección recomendados a aplicarse en Sonda Circuito Cerrado.

Zona Operativa del Motor	% de Corrección Recomendado	Rango rpm's	Rango TPS (%)
Ralentí	(40-50) %	0	0
		a	a
		2000	20
Crucero	20%	2000	20
		a	a
		5000	50
Máxima Potencia	10%	5000	50
		a	a
		9000	100

Conforme consta en la tabla anterior, a menor vacío se recomienda un menor rango de corrección porcentual, debido a que, al haber alta demanda de potencia, no es factible correr el riesgo de efectuar correcciones tan bruscas que puedan perjudicar la estabilidad del motor en esta condición.

Cabe mencionar que únicamente las modificaciones realizadas de izquierda a derecha influyen en la programación, ya que el motor se encuentra en plena aceleración y demanda de potencia, las modificaciones realizadas en dirección inversa a la mencionada, no. Además, hay que destacar que el ajuste de la zona de crucero es el más importante y complejo de programar, ya que marca la transición entre ralentí y máxima potencia.

Para las modificaciones realizadas en desaceleración, es aconsejable colocar valores con mezclas menos ricas que las de aceleración, con el fin de optimizar el consumo de combustible manteniendo altas prestaciones.

A continuación, se refleja la tabla Sonda Objetivo utilizada como modelo de programación para el submapa de combustible con su respectivo gráfico.

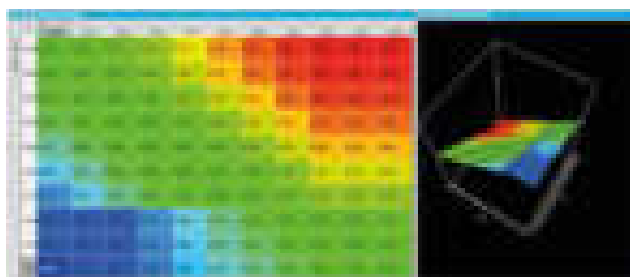


Figura 1. Tabla Sonda Objetivo.

2.2.1.2 Tabla (Submapa) de Ignición

La tabla de ignición gestiona el avance al encendido medido en grados en cada zona operativa del motor, ejecutado por la ECU a través de una señal enviada hacia cada una de las bobinas que conforman el sistema de encendido COP.

La programación del submapa de ignición se basa en la cantidad de grados adelantados en cada zona. Dicha cantidad es manipulada y afinada por el programador en función de un rango de valores recomendado y utilizado como patrón; tomando en cuenta que a nivel que aumentan las rpm's y desciende el vacío se debe establecer mayor adelanto, procurando no producir efectos de pre encendido o picado.

Los grados de adelanto recomendados son los siguientes:

Tabla 9. Grados de adelanto APMS recomendados en la programación del submapa de ignición.

Zona Operativa del Motor	Grados de Adelanto Recomendados	Rango rpm's	Rango TPS (%)
Ralentí	(10-15) ° APMS	0	0
		a	a
Crucero	(25-30) ° APMS	2000	20
		a	a
Máxima Potencia	(30-40) ° APMS	5000	50
		a	a
		9000	100

Es importante hacer hincapié en que, no siempre el último grado de adelanto antes de evidenciar pre encendido será el más efectivo. Dicho de otra manera, un motor puede alcanzar su máxima potencia con un avance de 32°, sin embargo, probablemente no experimente pre encendido hasta los 40°. De igual

manera, a nivel que aumenta la carga del motor, se debe disminuir los grados de adelanto, es decir, retardarlos; debido a que, al existir mezclas más ricas para compensar el esfuerzo, aumentan las probabilidades de pre encendido [11].

3. Resultados y Discusión

Una vez realizadas las programaciones de los submapas de combustible e ignición, en función del procedimiento detallado previamente, es fundamental analizar las diferencias más importantes entre los submapas base vs finales; previo a evidenciar su efecto sobre las prestaciones originales del motor.

3.1 Análisis de submapas de combustible

3.1.1 Base

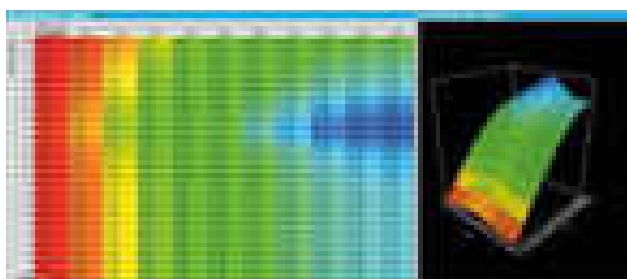


Figura 2. Submapa Base de Combustible.

3.1.2 Final

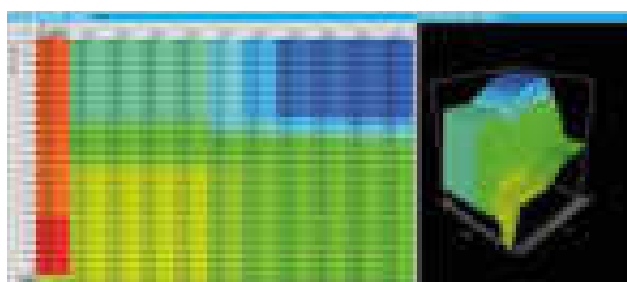


Figura 3. Submapa final -programación- de Combustible.

Como se puede observar en las tablas, el ancho de pulso en cada una de las zonas operativas, es más elevado en el submapa base que en el final; esto se debe a que el primero es el que se utiliza para encender por primera vez el motor, posterior a la conexión del cableado de la ECU y previo a las programaciones efectuadas. Este suceso generalmente provoca que no exista un ralentí estable, razón por la cual se inicia a manipular el ancho de pulso, e ir extrayendo poco a poco gasolina hasta hallar la sincronía perfecta entre rendimiento y eficiencia. De este modo, es menester aclarar que un excesivo gasto de combustible no

necesariamente asegura una mejora. La estrategia en la programación del submapa de combustible, consiste esencialmente en encontrar las máximas prestaciones de potencia y torque optimizando la mayor cantidad de gasolina, alcanzando un motor afinado en cada zona operativa.

3.2 Análisis de submapas de combustible

3.2.1 Base

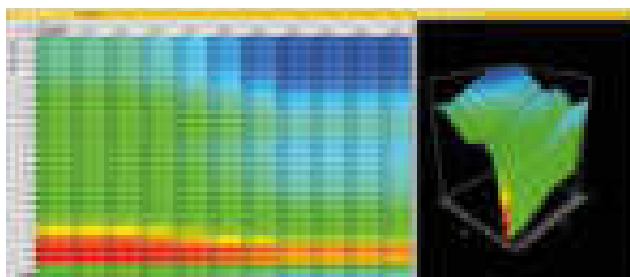


Figura 4. Submapa Base de Ignición.

3.2.2 Final

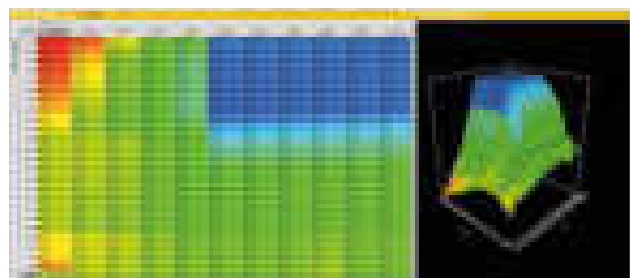


Figura 5. Submapa final -programación- de Ignición.

Como se puede apreciar en las tablas, el avance al encendido APMS en cada una de las zonas operativas es menor en el submapa base que en la programación; debido a que la ECU únicamente establece un adelanto ligero, lo suficiente para mantener el motor estable y, sobre todo, generar una armonía con el submapa base de combustible, cuyo ancho de pulso es de por sí elevado. En este punto entra la experticia del programador para hallar el avance idóneo buscando la mejora de las prestaciones. Cabe indicar que a las 400 rpm's, régimen establecido como partida y encendido del motor, existe un avance mayor que en el rango de (600 a 800) rpm's, con el fin de lograr arrancar el motor de manera inmediata y sin complicaciones.

3.3 Resultados

Después de analizar los aspectos importantes de los submapas de combustible e ignición base vs finales, es trascendental examinar la incidencia de

las programaciones sobre las prestaciones del motor; a través de la primera gráfica obtenida con el mapa base, así como la última con la programación, en la que es posible evidenciar la máxima potencia y torque alcanzados.



Figura 6. Gráfica de potencia y torque: mapa base vs programación.

De igual manera, una tabla comparativa entre las prestaciones iniciales del motor, y las logradas con la programación de la ECU.

Tabla 10. Tabla comparativa de prestaciones de potencia y torque, iniciales vs finales.

	Potencia	Torque
Mapa Base	196,0 CV	21,6 Kg*m
	@ 6551 rpm	@ 6361 rpm
Programación	240,1 CV	23,6 Kg*m
	@ 7790 rpm	@ 6565 rpm
Ganancia Neta	44,1 CV	2,0 Kg*m
Porcentaje de Ganancia	18,37%	8,47%

Como lo demuestra la tabla anterior, el porcentaje de ganancia en cuanto a potencia y torque es definitivamente considerable, lo cual permite afirmar que una buena programación en la gestión electrónica del motor, puede generar excelentes cambios en sus prestaciones.

Una vez realizadas las programaciones de los submapas de combustible e ignición, en función del procedimiento detallado previamente, es fundamental analizar las diferencias más importantes entre los submapas base vs finales; previo a evidenciar su efecto sobre las prestaciones originales del motor.

4. Conclusiones

La situación actual del Swag del motor B20Z y B16B tipo R con respecto a su desempeño, se remite al primer ensayo con el mapa base realizado en el dinamómetro, el cual generó una potencia corregida -normalizada- de 196,0 CV @ 6551 rpm's y un torque

de 21,6 kg*m @ 6361 rpm's.

Los conceptos básicos de la electrónica programable automotriz, se limitan esencialmente al avance al encendido medido en grados y al tiempo de inyección medido en milisegundos; cuya manipulación -programación- iniciada desde sus submapas base, permiten mejorar las prestaciones de potencia y torque del motor.

El modelo de implementación de un mapa es ejecutado a través de una programación adecuada, tomando en consideración ciertas condiciones: tipo de competencia, geometría de la pista, cargas sometidas al motor y tipo de conducción del piloto. Una vez analizadas dichas condiciones, la programación empieza con un submapa base, tanto de combustible como de ignición. En el primero se manipula en ancho de pulso de inyección en función de Sonda General mediante el uso de la WideBand. En el segundo se manipulan los grados de avance al encendido inspeccionando que no exista pre encendido. El orden de programación siempre inicia por el submapa de combustible y termina con el de ignición. Cabe mencionar que una mayor cantidad de gasolina y el máximo adelanto al encendido antes de evidenciar pre encendido, no necesariamente asegura mayor potencia y torque.

La programación de los submapas de combustible e ignición generó una ganancia neta de 44,1 CV de potencia y de 2,0 kg*m de torque, lo que corrobora que la mejor forma de mejorar las prestaciones de un motor de combustión interna es a través de la programación de su ECU.

5. Referencias

[1] R. Valle, J. Barros, J. Baeta and F. Pujatti, "Mapping Procedure Applied to General Engine Management System for Spark Plug Engines," SAE Technical Paper Series , pp. 1-10, doi: 10.4271/2004-01-3435, 2004.

D. Álvarez y D. Quinteros, Preparación y modificación de inyección electrónica programable con telemetría unidireccional de un motor para rally en un automóvil Mazda 323 (Tesis de grado de Ingeniería), Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba-Ecuador, 2011, pp. 281-283.

C. Hardie, H. Tait, S. Craig, J. Chase, B. Smith

and G. Harris, "Automated tuning of an engine management unit for an automotive engine," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 21, pp. 841-849, doi: 10.1177/095440700221600107, 2002.

FuelTech, Fueltech FT600, FT550, FT550LITE, FT450 Owner's Manual, Ball Ground, GA, Georgia, GA: FuelTech, pp. 8-9.

Honda Motor CO., Ltd., Honda Civic 1996-2000 Service Manual, Tokyo : Honda Motor CO, 1999, pp. 3-3,3-5.

MWD Bancos de Prueba, «Rodillo Inercial De Chasis MWD RR760i para Vehículos Livianos,» MWD, [En línea]. Available: <https://mwdyno.com/producto/rr-760i-2/>.

Sunoco LP, "Sunoco Race Fuels (Standard Gasoline)," 19 Octubre 2016. [Online]. Available: <https://www.sunocoracefuels.com/fuel/standard>.

AEM Performance Electronics, Instruction Manual P/N 30-2860 B Series COP Conversion Kit, Hawthorne, CA., California: AEM Performance Electronics, 2011, pp. 3-8.

R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y P. Baptista Lucio, Metodología de la Investigación, vol. 6ta Edición, México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores , 2014, pp. 127-130.

SAE Power Test Code Committee, "Engine Power Test Code—Spark Ignition and Compression Ignition—Net Power Rating," SAE Technical Standards, 2004.

M. Díaz, L. Sopa, G. Erazo y F. Salazar, «Reprogramación electrónica del vehículo Corsa Evolution 1.4, para elevar los parámetros característicos del motor de combustión interna,» Energía Mecánica, Innovación y Futuro, pp. 1-5; ISSN: 1390-7395, 2013.

6. Biografía



¹David Arturo Del Castillo Freire
– Ingeniero en Mecánica Automotriz (Universidad Internacional del Ecuador).



²Jorge Fernando Suárez Aimacaña
– Doctorando en Humanidades y Artes mención Ciencias de la Educación (Universidad Nacional de Rosario - Argentina), Magíster en Seguridad y Salud Ocupacional (Universidad Internacional SEK), MBA con mención en Gerencia de la Calidad y Productividad (Pontificia Universidad Católica del Ecuador), Ingeniero Mecánico (Escuela Politécnica del Ejército), Docente (Escuela de Ingeniería Automotriz – Universidad Internacional del Ecuador), Ingeniero de Procesos de Ensamblaje General (AYMESA S.A.), Vicecampeón Nacional de Rally Categoría 0-1500 cc. (Aneta 2009).

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	15 octubre 2021
Fecha aceptación	25 noviembre 2021

ANÁLISIS MECÁNICO ESTRUCTURAL DE PROTOTIPO PARA REHABILITACIÓN EN ADULTOS MAYORES CON PROBLEMAS DE TENDINITIS.

STRUCTURAL MECHANICAL ANALYSIS OF PROTOTYPE FOR REHABILITATION IN OLDER ADULTS WITH TENDINITIS PROBLEMS

¹Luis V. Gallo, ²Willam W. Tumbaco, ³Luis. E. Toapaxi, ⁴Marco A. Pilatasig, ⁵Pablo O. Mena

¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE,

e – mail: ¹vgallo@espe.edu.ec, ²wwtumbaco@espe.edu.ec, ³letoapaxi@espe.edu.ec, ⁴mapilatasig@espe.edu.ec, ⁵pomena@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 8 (09)

Resumen

En la última década se ha evidenciado la necesidad de incluir la tecnología en el área de la medicina, dado por las extensas ventajas que aporta incluir sistemas electrónicos en diferentes áreas de la salud. De esta manera ampliando y complementando las capacidades de personal médico, debido a que la ingeniería se integra de forma efectiva conjuntamente con diseños mecánicos que permiten mejorar los procesos de rehabilitación o fisioterapia de adultos mayores. Es por ello que en el presente trabajo se desarrolló una estructura mecánica que conjuntamente con un sistema electrónico permite monitorear el avance de la rehabilitación de personas que padezcan de tendinitis o en la prevención de dicha enfermedad. Dado que la estructura está dirigida a personas adultas se analiza la resistencia de la estructura mecánica y fluencia según Von Mises, conjuntamente con el factor de seguridad para determinar la vida útil estimada del prototipo utilizando herramientas como ANSYS y Solid Works.

Palabras Clave: Rehabilitación, Tendinitis, Análisis mecánico.

Abstract

In the last decade it has become evident the need to include technology in the area of medicine, given the extensive advantages of including electronic systems in different areas of health. In this way expanding and complementing the capabilities of medical personnel, because engineering is effectively integrated with mechanical designs that allow improving the processes of rehabilitation or physiotherapy of older adults. That is why in the present work a mechanical structure was developed that together with an electronic system allows monitoring the progress of the rehabilitation of people suffering from tendinitis or in the prevention of this disease. Since the structure is aimed at adults, the resistance of the mechanical structure and creep according to Von Mises, together with the safety factor to determine the estimated useful life of the prototype is analyzed using tools such as ANSYS and Solid Works.

Keywords: Rehabilitation, Tendinitis, Structural analysis.

1. Introducción

En los últimos años, gran parte de la investigación ha sido enfocada en temas de salud entre los cuales está la rehabilitación que, según la OMS, abarca un conjunto de intervenciones necesarias cuando una persona presenta limitaciones en su vida cotidiana debido a varios factores como el envejecimiento. Todo este tema del envejecimiento viene de la mano con diferentes problemas a nivel de rodillas por muchas causas como el sedentarismo, la dedicación laboral, sobrepeso, desencadenando diferentes afectaciones en los pacientes como la tendinitis conocida como la inflamación de un tendón mismo que entre sus síntomas se encuentra la sensibilidad y dolor fuera de las articulaciones (normalmente alrededor de los hombros y rodillas), que en este caso un tratamiento recurrente y de gran ayuda es la rehabilitación física [1, 2], por lo cual diferentes estudios se enfocan en el desarrollo de nuevas técnicas y prototipos para el desarrollo eficaz de las diferentes rehabilitaciones [3, 4] y también en el diseño de estructuras complejas que interactúan directamente con el paciente disminuyendo las tareas de los médicos profesionales en rehabilitación física [5].

Con el desarrollo y con el objetivo de mejorar la calidad de vida, y de limitar las horas de actividades de rehabilitación física, cognitiva u otras involucradas, se han implementado varias investigaciones relacionadas con el reconocimiento automático de la actividad humana, prestando mucha atención al campo de la tecnología, como entornos de vigilancia, entornos de entretenimiento y sistemas de salud enfocados también en problemas como la tendinitis [6, 7, 8], es por ello que en las últimas décadas se ha dado una gran importancia al estudio en salud y a las investigaciones efectuadas en rehabilitaciones cualesquiera que sean, orientadas a la tecnología y a la experiencia interactiva de multimedia inteligente que pueda realizar el intercambio de información y el amplio procesamiento interactivo [9, 10].

Dentro de otras técnicas para rehabilitación y seguimiento de tendinitis están: la electromiografía (EMG) [11] un sistema de bajo coste que beneficia a los grupos de investigación con poco financiamiento, electroestimulación transcutánea (TENS), ultrasonidos terapéutica (US) y crioterapia [12, 13]. La tendinitis también afecta a las manos, las cuales son esenciales en muchas actividades diarias, en [14] se presenta un guante que permite recuperar la función motora de la mano mediante el monitoreo de

ejercicios físicos. Incluso con los diferentes avances tecnológicos la IA (inteligencia artificial) participa en la investigación del diagnóstico de enfermedades logrando un 84% de precisión, [15, 16].

En este contexto el artículo tiene como finalidad diseñar un módulo que pueda ser utilizado por las personas adultas mayores del centro "Hogar de Adultos Mayores Saquisilí" para tratar afecciones en sus extremidades inferiores como por ejemplo tendinitis y artrosis.

2. Diseño Mecánico

El diseño mecánico ha tenido un papel importante para el desarrollo adecuado de componentes estructurales, comprendido de muchos factores como los materiales con que se construirán, los elementos, geometrías, dimensiones, tratamientos termoquímicos y superficiales, métodos de manufactura, costos, etc. Con los cálculos de la ingeniería mecánica se puede predecir con cierta exactitud los comportamientos de las estructuras y máquinas que deseamos diseñar, para las estructuras sometidas a cargas simples como es el caso, es de importancia considerar primeramente las propiedades de los materiales, particularmente las propiedades de resistencia mecánica, fragilidad y ductilidad, a su vez es de importancia el estudio de los conceptos de esfuerzo de diseño (o esfuerzo admisible) y factor de seguridad, la determinación de los puntos críticos de cada elemento o de toda la estructura que se puede observar en la Fig. 1, la cual está destinada a permitir la rehabilitación de miembros inferiores completando las diferentes etapas entre las que se encuentran: escalones, pasillo y rampa.



Figura 1. Estructura para rehabilitación de miembros inferiores

En el diseño de cualquier elemento de una estructura o máquina es necesario conocer las diferentes propiedades de los materiales como la resistencia a la tracción, compresión, torsión, dureza, resistencias

de fluencia, tenacidad, ductilidad y fragilidad, considerando las unidades que se detalla en la tabla 1.

Tabla 1. Unidades utilizadas en el análisis

Sistema de unidades:	Métrico (MKS)
Longitud/Desplazamiento	mm
Fuerza	N
Velocidad angular	rad/s
Presión/Tensión	N/mm ²

3. Información del prototipo

Para el diseño y la construcción del módulo de rehabilitación se realiza el estudio con el acero estructural A36 ya que este presenta altos valores de resistividad, como se indica en la siguiente Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero ASTM A36

Propiedad	Acero A36	
Densidad (kg/m ³)	7800	
Aceleración al alma	Tensión (MPa)	410
	Compresión (MPa)	410
	Cortante (MPa)	410
Fluencia	Tensión (MPa)	250
	Cortante (MPa)	140
Aceleración a punto codo (MPa)	280	
Módulo de elasticidad (GPa)	210	
Módulo de rigidez (GPa)	77	
Coefficiente de expansión térmica (10 ⁻⁶ /°C)	11.7	
Ductilidad, porcentaje de elongación al 50mm	23	

Para los cálculo de prueba se utiliza (1) que describe el momento flector, donde F representa la máxima fuerza aplicada y x longitud del perfil estructural con fuerza cortante máxima.

$$M = Fx \quad (1)$$

Esfuerzo de diseño

El diseño de elementos con base en su resistencia consiste en evitar que exista fluencia en los materiales entonces, para ello se utiliza la teoría de Esfuerzo de Von Misses, donde establece que existirá fluencia si se cumple la siguiente desigualdad.

$$\sigma \leq \sigma_y \quad (2)$$

Donde σ representa el esfuerzo de Von Mises por simulación y σ_y la resistencia a la fluencia del material. Utilizado en el cálculo del método de Von

Mises del módulo de rehabilitación debido al criterio de fallo elástico (3).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_x^2 - \sigma_x\sigma_y + \sigma_y^2) + 3\tau_{xy}^2} \quad (3)$$

Considerando, σ_x como el esfuerzo normal en el plano X, Y respectivamente y τ_{xy} como el esfuerzo normal en el plano XY con un valor de cero.

Para el diseño se establece que los esfuerzos que están directamente a lo largo del plano X, son los esfuerzos máximos flexionante σ_x .

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma$$

Puntos críticos

Flexión

En flexión el esfuerzo está dado por (3):

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

El punto crítico será donde al módulo de rehabilitación él sea máxima, lo cual tiende a ocurrir en puntos situados en secciones de gran momento flector, para este caso en las uniones de las estructuras en las que se tiene: el momento flector M; la magnitud máxima del Centroide C y el momento de inercia del perfil estructural I.

Canales American Standard (perfiles en C).

Por ser el más utilizado y por cuestión de precios se opta por un perfil estructural acero ASTM A36, tipo en G (ver Fig. 2.), para el previo diseño, ya que poseen el alma plana y los dos patines producen un perfil generalmente más rígido que los ángulos que resisten más la flexión y la torsión bajo carga.

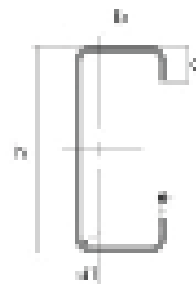


Figura 2. Perfil estructural tipo G.

En el cual se cuenta con los siguientes datos:

- $b = 80\text{mm}$
- $h = 140\text{mm}$
- $t = 10\text{mm}$
- $e = 20\text{mm}$
- $I_C = 35.25 \text{ m}^4$

Centroide

Para el cálculo de este parámetro se utiliza (4) tanto para la coordenada X como para la coordenada Y.

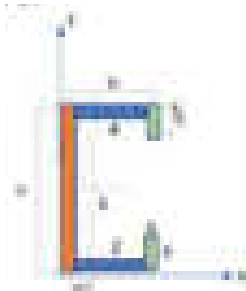


Figura 3. Centroide

Tabla 3. Cálculos para variables del centroide

N.	b	h	A	\bar{x}	\bar{y}	$\bar{x} \cdot A$	$\bar{y} \cdot A$
1	80	2	160	1	40	160	6400
2	2	76	72	20	1	1440	72
3	12	2	240	66	7.5	15840	180
4	2	76	72	20	79	1440	5688
5	12	2	240	66	72.5	15840	1710

$$A_p = 164 \text{ mm}^2$$

$$(\bar{Y} \cdot A)_p = 5380 \text{ mm}^3$$

$$(\bar{X} \cdot A)_p = 14560 \text{ mm}^3$$

$$C_x = \frac{(\bar{Y} \cdot A)_p}{A_p} \quad (4)$$

$$C_x = \frac{5380 \text{ mm}^3}{164 \text{ mm}^2}$$

$$C_x = 14.78 \text{ mm}$$

$$C_y = \frac{(\bar{X} \cdot A)_p}{A_p}$$

$$C_y = \frac{14560 \text{ mm}^3}{164 \text{ mm}^2}$$

$$C_y = 40 \text{ mm}$$

Factor de seguridad y ecuación de diseño

Los valores de resistencia de los materiales suelen tener cierto grado de imprecisión, los métodos de

cálculo normalmente asumen condiciones extremas en la práctica, los valores de las cargas son normalmente imprecisos, e incluso pueden existir cargas inesperadas en todo el sistema estructural.

Para eliminar la desigualdad entre la resistencia, el esfuerzo de diseño y definir qué tan pequeño debe ser este último comparado con la resistencia, se utiliza el concepto de factor de seguridad, también conocido como coeficiente de cálculo o factor de incertidumbre. Este factor se define en (5):

$$A_s = \frac{\text{Carga que produce falla}}{\text{Carga máxima aplicada}} \quad (5)$$

$$A_s = \frac{R_p}{\sigma}$$

4. Resultados del análisis

Al considerar una fuerza 1500 N con valores del peso promedio de adultos mayores tenemos como resultado un momento de 2250 Nm, teniendo que cuenta que el análisis de momento flector se realiza en el pasillo de la estructura (ver Fig. 4), debido a que es donde se presenta la mayor fuerza axial y fuerza cortante, observando un desplazamiento en dirección Y, de 0.0064mm, el cual se considera como un valor mínimo y despreciable.

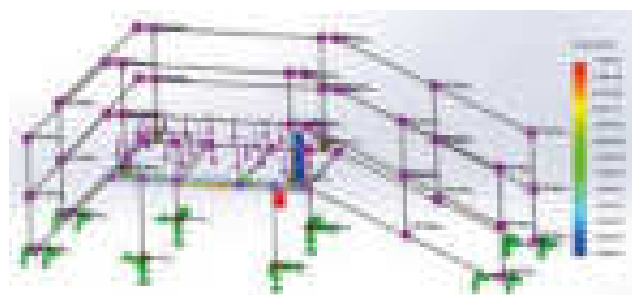


Figura 4. Análisis del momento flector.

$$\sigma = \frac{2250 \text{ Nm} \cdot 0.01478 \text{ m}}{3.525 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3}$$

$$\sigma = 94340423.53 \text{ N/m}^2 = 94.34 \text{ MPa}$$

Según la desigualdad del Esfuerzo Von Mises para verificar si existirá fluencia que establece (2) se tiene el valor obtenido por simulación:

$$\sigma = 3.84 \text{ MPa}$$

$$3.84 \text{ MPa} \geq 3.88 \text{ MPa}$$



Figura 5. Análisis del momento flector con el estrés equivalente.

El esfuerzo de diseño es el máximo esfuerzo que debe soportar un elemento para que efectúe su trabajo con seguridad, es decir, el de evitar su falla, al no cumplirse la desigualdad de Von Mises se verifica que no existirá fluencia y soportará la carga de 1500N en la estructura, si se diera el caso que existe fallas lo recomendable es manipular las dimensiones, las geometrías, los materiales, los tratamientos térmicos, entre otros factores de la estructura, y cumplir con la desigualdad de Von Mises.

Para evitar la falla la carga máxima aplicada debe ser menor que la carga que produce la falla, entonces, de (5) se infiere que N debe ser mayor que 1 para evitar dicha falla.

$$n = \frac{248MPa}{94,34Mpa}$$

$$n = 2,63$$



Figura 6. Factor de seguridad.

Según simulación el resultado es 15 valor sobredimensionado, pero cumple con lo calculado y estipulado por la relación de Von Mises que debe de ser mayor que 1.

5. Conclusiones

El diseño mecánico estructural, nace a partir del tipo de perfil y material que se ha de utilizar, para este caso el uso de un perfil tipo G de acero AISI A36, es

un perfil ampliamente utilizado para la construcción de estructuras de este tipo por sus grandes valores de propiedades mecánicas que presenta y por ser un material que al ser sometido a cargas máximas axiales y análisis estáticos garantizan el soporte de las diferentes variaciones de carga inmersas durante su usabilidad, adicional a ello el cálculo de la ingeniería mecánica y el uso de la teoría de Von Mises facilitan la comprobación de estas aseveraciones dando como resultado que la estructura al ser sometida a 1500N de carga no cede, es decir no da paso a que exista fluencia en los puntos más críticos, el análisis de falla de acuerdo a la misma teoría de Von Mises debe cumplir con valores mayores que uno, con cálculos y simulaciones el factor de seguridad que evita este tipo de fallas da como resultado un valor sobredimensionados, deduciendo así que la estructura diseñada para rehabilitación, soportara y garantizara la estabilidad y durabilidad durante su uso.

6. Referencias

- [1] Niering, M.; Muehlbauer, T. Effects of Physical Training on Physical and Psychological Parameters in Individuals with Patella Tendon Myopathy: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports* 2021, 9, 12. <https://doi.org/10.3390/sports9010012>.
- [2] Michael, E.; White, M.J.; Eves, F.F. Home-Based Stair Climbing as an Intervention for Disease Risk in Adult Females; A Controlled Study. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2021, 18, 603. <https://doi.org/10.3390/ijerph18020603>
- [3] Kosar, T.; Lu, Z.; Mernik, M.; Horvat, M.; Črepinšek, M. A Case Study on the Design and Implementation of a Platform for Hand Rehabilitation. *Appl. Sci.* 2021, 11, 389. <https://doi.org/10.3390/app11010389>
- [4] Moreno Naya, D.; Vazquez-Araujo, F.J.; Castro, P.M.; Vivas Costa, J.; Dapena, A.; González Doniz, L. Utilization of a Mobile Application for Motor Skill Evaluation in Children. *Appl. Sci.* 2021, 11, 663. <https://doi.org/10.3390/app11020663>.
- [5] Miao, M.; Gao, X.; Zhu, W. A Construction Method of Lower Limb Rehabilitation Robot with Remote Control System. *Appl. Sci.* 2021, 11, 867. <https://doi.org/10.3390/app11020867>

[6] R. K. Shian, U. T. Hoang Le, J. L. Yong, N. H. Jenq, H. Y. Jang y H. C. Kyoung, «A Review on Video-Based Human Activity Recognition,» Computers, 2013.

[7] S. Sanchez, D. Monekosso, P. Remagnino, D. Vallejo y C. González, «Automatic recognition of physical exercises performed by stroke survivors to improve remote rehabilitation» IEEE, 2019.

[8] O. Pastolache, «Remote sensing technologies for physiotherapy assessment,» IEEE, 2017.

[9] Q. Xu, X. Xiong, G.-L. Feng, M. Jing Guo y L. Wan, «Design of Intelligent Campus Multimedia Interactive System Based on Internet of Things Technology» IEEE, 2019.

[10] R. Aranha, L. Araujo, C. Monteiro, T. Da Silva y F. Nunes, «MoVEROffice: Virtual Reality for Upper Limbs Rehabilitation,» IEEE, 2016.

[11] Poo, T. S., & Sundaraj, K. (2010, May). Design and development of low cost biceps tendonitis monitoring system using EMG sensor. In 2010 6th International Colloquium on Signal Processing & its Applications (pp. 1-5). IEEE.

[12] Costa, J. G., Peixoto, L. R. T., Miosso, C. J., Macedo, F. S., Da Rocha, A. F., & Perez, F. S. B. (2014, April). Protocols for physiotherapeutic treatment of pain due to shoulder tendinopathies. In 2014 Pan American Health Care Exchanges (PAHCE) (pp. 1-5). IEEE.

[13] Choi, S., Lee, G. J., Lee, S., Cheong, Y., Kwon, E., Cho, H., ... & Park, H. K. (2011, October). Effect of extracorporeal shockwave therapy on nanostructural and property responses of the Achilles tendinitis rat model. In 2011 IEEE Nanotechnology Materials and Devices Conference (pp. 425-427). IEEE.

[14] Yeo, J. C., Lee, C., Wang, Z., & Lim, C. T. (2016, October). Tactile sensorized glove for force and motion sensing. In 2016 IEEE SENSORS (pp. 1-3). IEEE.

[15] Horng, M. H. (2008, May). Texture Characteristics for Classification of the Ultrasonic Images of Roator Cuff Disease. In 2008 International Conference on BioMedical Engineering and Informatics (Vol. 2, pp. 258-262). IEEE.

[16] Ren, Y., Wu, Y.N., Yang, C. Y., Xu, T., Harvey, R. L., & Zhang, L. Q. (2016). Developing a wearable ankle rehabilitation robotic device for in-bed acute stroke rehabilitation. IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, 25(6), 589-596.

7. Biografía



¹Vinicio Gallo. – Estudiante de Electrónica e Instrumentación (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE)



²Luis Toapaxi, estudiante de la carrera de Electromecánica (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE)



³Willam Tumbaco, estudiante de la carrera de Electrónica e Instrumentación (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE)



⁴Marco Pilatasig, Ingeniero en Electrónica e Instrumentación (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE),



⁵Pablo Mena. – Ingeniero en Eléctrico (Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE),

Autor para correspondencia:
lvgallo@espe.edu.ec

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	11 abril 2021
Fecha aceptación	28 mayo 2021

DECAIMIENTO ALFA: UNA REVISIÓN A LA TEORÍA DE GEORGE GAMOW**ALPHA DECAY: A REVIEW OF GEORGE GAMOW'S THEORY**¹José Guillermo Trujillo Jaramillo, ²Edison Ramiro Acurio Armas, ³José Ignacio Trujillo Galarza¹Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, ²Escuela Técnica de la Fuerza Aérea ETFA,³Universidad de Investigación de Tecnología Experimental Yachay Tech.e – mail: ¹jjgtrujillo1@espe.edu.ec , ²eracurio@espe.edu.ec , ³jose.trujillo@yachaytech.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 9 (09)

Resumen

La radiactividad es el proceso de desintegración y transformación espontánea de núcleos atómicos volátiles, seguido de la emisión de radiación. George Gamow fue capaz de utilizar la mecánica cuántica para explicar el fenómeno radiactivo del decaimiento alfa a través de un proceso llamado tunelización. Las partículas α son estructuralmente equivalentes al núcleo de un átomo de Helio y constan de dos protones y dos neutrones. Básicamente el argumento es que una partícula alfa no necesita tener suficiente energía para superar la barrera potencial del núcleo, simplemente tunelea a través de él. En este artículo se hace una revisión a los conceptos y se desentrañan los cálculos que utilizó Gamow para poder explicar su teoría de decaimiento.

Palabras Clave: Decaimiento alfa, radiactividad, tunelamiento cuántico, mecánica cuántica.

Abstract

Radioactivity is the process of spontaneous decay and transformation of volatile atomic nuclei, followed by the emission of radiation. George Gamow was able to use quantum mechanics to explain the radioactive phenomenon of alpha decay through a process called tunneling. The α -particles are structurally equivalent to the nucleus of a helium atom and consist of two protons and two neutrons. Basically the argument is that an alpha particle does not need enough energy to overcome the potential barrier of the nucleus, it tunnels through it. This article reviews the concepts and unravels the calculations that Gamow used to explain his theory of decay.

Keywords: Alpha decay, radioactivity, quantum tunneling, quantum mechanics.

1. Introducción

1.1. Radiactividad

La radiactividad es el proceso de desintegración y transformación espontánea de núcleos atómicos volátiles, seguido de la emisión de radiación [4]; también se le conoce como decaimiento nuclear. La radiactividad ha evolucionado mucho desde que fue descubierta por Henri Becquerel en 1896. Becquerel notó que las sales de uranio producían una radiación invisible que atravesaba metales y cuerpos opacos a la luz, así como vidrio y otras sustancias transparentes [4].

A principios del siglo XX, Marie y Pierre Curie lideraron el uso de Radio (Ra) para el tratamiento del cáncer [4]. En 1931, Ernest Lawrence construyó el primer ciclotrón funcional capaz de acelerar protones, deuterones o iones de helio (partículas α) a energías capaces de penetrar núcleos atómicos y producir, así, numerosos isótopos estables y radiactivos [4]. Ernest Rutherford y Paul Villard, entre 1899 y 1901, clasificaron la radiación según su poder de penetración en tres tipos: alfa (α), beta (β) y gamma (γ) [9]; siendo alfa y gamma la menos y más penetrante, respectivamente. Al principio, se desconocía la naturaleza de estas radiaciones, pero, después de todo, serían descritas. En 1900, Becquerel demostró que las partículas β son de hecho electrones [9]. En 1907, Rutherford y Thomas Royds concluyeron que las partículas α eran núcleos de helio doblemente ionizados, y William Henry Bragg demostró que los rayos gamma eran radiación electromagnética [9].

El estudio de la radiactividad, es decir, la radiación nuclear y las fuentes de radiactividad, es muy importante debido a sus abundantes aplicaciones pacíficas en los campos de la medicina, la biología, la agricultura, la industria y la generación de energía eléctrica que son indispensables en nuestra vida cotidiana [4].

1.2. Modelo Atómico de Joseph John Thomson (Modelo del Pudín de Ciruelas)

En la primera década del siglo XX, se consideraba que el átomo era un volumen esférico uniforme de carga positiva (pudín) con electrones incrustados (pasas) [8]. Esta descripción del átomo es el modelo atómico propuesto por J.J. Thomson. Dicha percepción del átomo se mantuvo hasta 1909, antes del famoso experimento de la lámina de oro realizado

por Johannes “Hans” Geiger y Ernest Marsden bajo la conducción de Rutherford. El experimento de la lámina de oro consistió en disparar partículas α , es decir, núcleos de helio obtenidos a partir de bromuro de radio, hacia una delgada pieza de lámina de oro [6]. Los resultados observados mostraron una desviación de las partículas, por esta razón, Rutherford concluyó que la mayor parte de la masa del átomo y toda su carga positiva se concentraba en una región pequeña y compacta llamada núcleo cuyo radio era menor a 10-14 m [6].

1.3. El Misterio del Decaimiento Alfa

¿Qué es el decaimiento o desintegración alfa? Puede definirse como el proceso de desintegración nuclear a través del cual el núcleo padre emite una partícula alfa [4]. Las partículas alfa son estructuralmente equivalentes al núcleo de un átomo de helio y constan de dos protones y dos neutrones [4], se emiten como productos de desintegración de muchos radionúclidos que poseen un núcleo grande, predominantemente de número atómico mayor que 81 [4]. La ecuación para la desintegración alfa es [5]:



Por ejemplo, el radionúclido americio-241 se desintegra por emisión de partículas α para producir el nucleído hijo neptunio-237 de acuerdo con la siguiente ecuación [4]:



Una vez que se entendió mejor la estructura del átomo, surgió una nueva pregunta: ¿Cómo se emiten las partículas α de las sustancias radiactivas? La idea de Rutherford era separar el potencial en la vecindad del núcleo en dos partes:

- Dentro del núcleo (distancias $<10\text{-}14$ m), una parte no Coulombica actúa como fuerza de unión atractiva.
- Fuera del núcleo, una parte Coulombica actúa como fuerza electrostática repulsiva

Estos dos potenciales deben coincidir en el borde del núcleo (r_0). Para probar su suposición, Rutherford realizó experimentos de dispersión con partículas α a partir de torio radiactivo C' (hoy en día conocido como polonio-212). De esta manera confirmó la existencia de la parte Coulombica en uranio hasta una altura

de al menos 8,47 MeV [7]. El hecho desconcertante era que se sabía que el uranio-238 emitía partículas α de menos de la mitad de la barrera potencial mencionada, exactamente 4,2 MeV. Bajo el marco clásico, es imposible que estas partículas escapen del núcleo. ¿Qué está pasando?, se inventaron muchas teorías tortuosas para intentar explicar este fenómeno; por ejemplo, el propio Rutherford postuló la idea de que quizá una partícula alfa en el interior del núcleo combinada con dos electrones se convertirá en un objeto neutro y, por lo tanto, podría escapar a través del potencial [7]. Sin embargo, es fácil ver las falencias de tal propuesta.

George Gamow entró en la historia cuando se encontró con el artículo de Rutherford de 1927 titulado "Estructura del átomo radiactivo y el origen de los rayos α ", en el que se discutía el misterio del decaimiento alfa. Gamow hizo uso de la mecánica cuántica para poder explicar que la probabilidad de que una partícula pase de una región, ambas separadas por una barrera de potencial finitamente alta, es diferente de cero [7]. La esencia de la solución de Gamow era que una partícula alfa no necesitaba tener suficiente energía para superar la barrera Coulombica del núcleo, simplemente tunela a través de él.

La intervención de Gamow fue la primera vez que la mecánica cuántica se aplicaba a la física nuclear utilizando el importante concepto de tunelización [7]. El tunelamiento ocurre en todos los sistemas cuánticos, de hecho, es crucial para la nucleosíntesis en las estrellas, y también puede haber jugado un papel esencial en la evolución del universo temprano [7]. Desde su comienzo, relatado aquí, la tunelación cuántica ha sido un tema de tendencia, con muchas aplicaciones hasta el día de hoy.

2. Cálculos Matemáticos

2.1. La Barrera Rectangular: Un Enfoque Simple

Para comprender el comportamiento general del sistema, es importante partir del caso simple de la barrera rectangular (Ver figura 1).

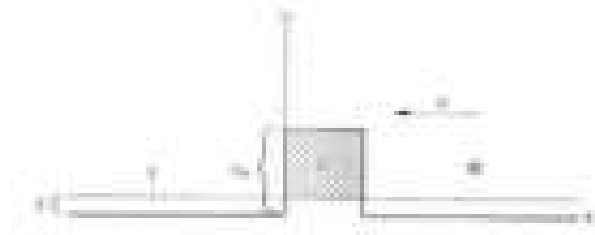


Figura 1. Esquema de Gamow para partículas α con energía E , incidentes desde la parte derecha, sobre una barrera cuadrada de altura U_0 y ancho l . Potencial $U(q)$. Tomado de [2].

Es evidente que solo existen "scattering states" en este sistema. Bajo este contexto, queremos encontrar la solución de la Ecuación de Schrödinger para una partícula, con energía $0 < E < U_0$, proveniente de la derecha. La solución será diferente para cada región del potencial.

- **Región I:** $q < 0$, la solución está dada por:

$$\psi_1(q) = Ae^{ikq} + Be^{-ikq}, \quad k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (3)$$

- **Región II:** $0 < q < l$, la solución es:

$$\psi_2(q) = Ce^{\kappa q} + De^{-\kappa q}, \quad \kappa = \frac{\sqrt{2m(U_0 - E)}}{\hbar} \quad (4)$$

- **Región III:** $l < q$, la solución es:

$$\psi_3(q) = Fe^{ikq} + Ge^{-ikq}, \quad k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} \quad (5)$$

Aplicando condiciones de frontera para $\psi(q)$ y $\frac{d\psi(q)}{dq}$ en $q=0$ y $q=l$, obtenemos las siguientes ecuaciones:

$$\psi = \psi_1 = \psi_2 \quad (6)$$

$$-i\hbar k \psi_1' = \psi_2' \quad (7)$$

$$Ce^{\kappa l} + De^{-\kappa l} = Fe^{ikl} + Ge^{-ikl} \quad (8)$$

$$\psi_2' = \psi_3' \quad (9)$$

Considerando a G como dato inicial (amplitud de la onda incidente), tenemos un sistema de cuatro ecuaciones con cuatro incógnitas (B, C, D, F).

Resolviendo para B , se obtiene el siguiente resultado:

$$T = \frac{e^{-2kx}}{\cosh(xl) + i \left(\frac{k^2 - k_0^2}{2kk_0} \right) \sinh(xl)} \quad (10)$$

Vamos a definir el coeficiente de transmisión de la siguiente manera:

$$T = \frac{J_B}{J_G} \quad (11)$$

donde J_B es la densidad de corriente transmitida y J_G la densidad de corriente incidente. Usando una fórmula más rápida para el cálculo de la densidad de corriente, definida en una dimensión como (12):

$$J(x,t) = \frac{\hbar}{m} \operatorname{Im} \left(\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial x} \right) \quad (12)$$

se obtiene para cada región:

$$J_G(q) = J_G(q_0) = -\frac{\hbar k}{m} |A|^2 \quad (13)$$

$$J_B(q) = 0 = \frac{\hbar k}{m} |B|^2 \cos 2kx \quad (14)$$

$$J_T(q) = J_B(q) - J_G(q) = -\frac{\hbar k}{m} (|A|^2 - |B|^2) \quad (15)$$

Observe que debido a que J_B y J_G tienen el mismo factor de proporcionalidad ($-\frac{\hbar k}{m}$) que de hecho es la velocidad de partícula clásica, se podría haber evitado calcular las corrientes de probabilidad al observar la simetría del potencial en las regiones 1 y 3 y expresar el coeficiente de transmisión simplemente como la siguiente relación:

$$T = \left| \frac{B}{A} \right|^2 \quad (16)$$

Finalmente; se obtiene una expresión exacta para el coeficiente de transmisión, reemplazando (10), k y m :

$$T = \frac{1}{1 + \frac{V_0^2 \sin^2(kl)}{4E(E - V_0)}} \quad (17)$$

Cuando la barrera de potencial es demasiada alta y amplia, esta probabilidad de transmisión depende esencialmente del factor exponencial, es decir:

$$T \approx e^{-2kx} \quad (18)$$

2.2. Refinando el Modelo

Debido a que no se está en el marco de la mecánica cuántica relativista, la probabilidad debe conservarse en todas las regiones. Sin embargo; en la desintegración de partículas, un número constante de partículas y, por lo tanto, la conservación de la probabilidad falla. El enunciado de conservación de la probabilidad está proporcionado por la ecuación mecánica-cuántica de continuidad:

$$\frac{\partial P(x,t)}{\partial t} + \frac{\partial J(x,t)}{\partial x} = 0 \quad (19)$$

Donde, $P(x,t)$ es la densidad de probabilidad ($\Psi^* \Psi$). $J(x,t)$ define la corriente de probabilidad, que es la tasa a la que la probabilidad está "fluyendo" dentro o fuera de la región en cuestión, y está dada por:

$$J(x,t) = \frac{\hbar}{2mi} \left(\Psi^* \frac{\partial \Psi}{\partial x} - \Psi \frac{\partial \Psi^*}{\partial x} \right) \quad (20)$$

El modelo anterior no era completamente realista, así que se hacen algunas correcciones. La siguiente propuesta de Gamow para un modelo de desintegración alfa fueron dos barreras potenciales simétricas (Ver figura 2).

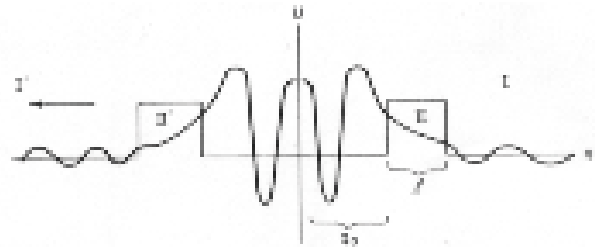


Figura 2. Siguiendo modelo de Gamow que consta de dos barreras potenciales rectangulares y simétricas. Tomado de [2].

Considerando soluciones para representar partículas que salen de la región central, se deduce:

- **Región I'**: $q < -(q_0 + l)$, la solución está dada por:

$$\Psi_{I'}(q,t) = A e^{i(k'x - Et)} \quad (21)$$

- **Región I**: $q > q_0 + l$, la solución es:

$$\Psi_I(q,t) = A e^{i(kx - Et)} \quad (22)$$

donde; $k = \frac{\sqrt{2m(E - V_0)}}{\hbar}$ y ϕ es el cambio de fase.

Sin embargo; las soluciones estacionarias (independientes del tiempo), para la ecuación de Schrödinger, no pueden representar un flujo de partículas que salen de la zona central del potencial porque $P(q,t)$ es, de hecho, independiente del tiempo, es decir, $P(q,t) = |\psi(x)|^2$. De esta manera, la ecuación de continuidad falla para las funciones de onda elegidas en las regiones I' y I , es decir, existe la probabilidad de encontrar partículas fuera de la zona central entre las dos barreras.

*Energías complejas

Ahora, ¿qué pasaría si se considera a la energía como un número complejo?, es decir, $E = E_0 + i\Gamma$. Con E_0 y Γ reales. De hecho, puede verse que la dependencia temporal de la probabilidad no será nula:

$$\begin{aligned}
 P(x,t) &= \Psi^*(x,t)\Psi(x,t) & (23) \\
 &= e^{-\frac{iE_0 t}{\hbar}} \psi^*(x) e^{-\frac{\Gamma t}{\hbar}} \psi(x) \\
 &= e^{-\frac{E_0 t}{\hbar}} e^{-\frac{\Gamma t}{\hbar}} \psi^*(x) \psi(x) \\
 &= e^{-\frac{E_0 t}{\hbar}} |\psi(x)|^2
 \end{aligned}$$

donde; $\frac{1}{\tau} = \frac{\Gamma}{\hbar} = \frac{\Gamma}{\hbar}$ es el inverso de la “vida útil”, y $\frac{1}{\tau_{med}} = \frac{E_0}{\hbar}$ es la “vida media”.

El análisis anterior (*) proporciona una forma de abordar el problema de las soluciones anteriores (21) y (22). El siguiente paso es asumir vibraciones amortiguadas desde la fuente de la onda (parte central) y también considerar soluciones complejas para las energías:

$$E = E_0 + i\frac{\hbar\gamma}{2} \tag{24}$$

donde; E_0 es la energía habitual de las partículas alfa y γ es la disminución amortiguada (constante de decaimiento).

De (23) y (24):

$$P(x,t) = e^{-\frac{E_0 t}{\hbar}} |\psi(x)|^2 \tag{25}$$

$$\rightarrow \gamma = \frac{1}{\tau} = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \tag{26}$$

La ecuación de continuidad, entonces, dicta:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{j} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} = -2\left(\frac{\partial \rho}{\partial t}\right) \tag{27}$$

De la cual se obtiene:

$$\begin{aligned}
 \gamma &= \frac{0.693 \sin^2 \theta}{m \left[1 + \left(\frac{E_0}{E}\right)^2\right] 2(E + E_0) \beta} e^{-\frac{2(E + E_0)(a-x)}{\hbar}} & (28) \\
 \sin \theta &= \left[1 + \left(\frac{E_0}{E}\right)^2\right]^{1/2}
 \end{aligned}$$

donde; β es una constante de primer orden.

Se ha derivado una expresión para la constante de desintegración, sin embargo, γ sigue dependiendo en gran medida del tamaño del pozo de potencial ($q0$ y l), así como de la altura de la barrera de potencial (E_0).

2.3. La Aproximación WKB

El método WKB (Wentzel, Kramers, Brillouin) es una técnica que permite obtener soluciones aproximadas a la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo (TISE, abreviación en inglés) en una dimensión, cuando $V(x)$ no es constante pero varía lentamente en comparación con $\frac{\hbar}{2m}$ o $\frac{\hbar}{4m}$ y es particularmente útil para calcular las tasas de tunelización a través de barreras potenciales [3].

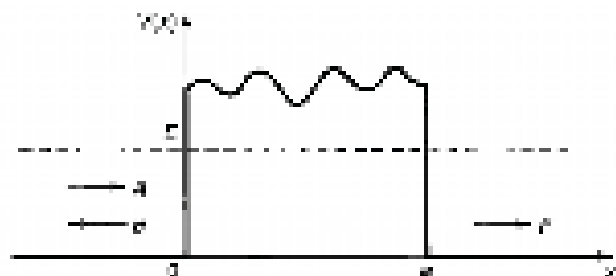


Figura 3. Dispersión de una barrera rectangular con una cima irregular. Tomado de [3].

Considerando una barrera potencial entre $x=0$ y $x=a$ con forma indeterminada (Ver figura 3) y estableciendo un escenario de tunelización que corresponde a la región no clásica ($E < V$), la siguiente solución es propuesta:

$$\psi(x) = \begin{cases} Ae^{ikx} + Be^{-ikx}, & x < 0 \\ C e^{-\kappa x} + D e^{\kappa x}, & 0 \leq x \leq a \\ Fe^{ikx}, & x > a \end{cases} \tag{29}$$

donde; ψ_{WKB} es la aproximación WKB para $\psi(x)$ en la región de la barrera:

$$\psi_{WKB} = \frac{1}{\sqrt{2m(V(x)-E)}} (C_1 e^{\int_0^x p(x) dx} + C_2 e^{-\int_0^x p(x) dx}) \quad (30)$$

y $p(x)$, que es imaginario, es el momento clásico de una partícula de energía E en un potencial $V(x)$.

$$p(x) = \sqrt{2m(V(x)-E)} \quad (31)$$

Si la probabilidad de tunelización es pequeña, es decir, la barrera es alta y/o ancha, entonces el coeficiente C de ψ_{WKB} tiende a cero. De este modo; las amplitudes relativas de las ondas incidentes y transmitidas son descritas, principalmente, por la disminución total del término exponencial en la región no-clásica, expresado en lenguaje matemático se tiene:

$$T = \left| \frac{B}{A} \right|^2 \approx e^{-2\gamma}, \quad \gamma = \frac{1}{\hbar} \int_0^a |p(x)| dx \quad (32)$$

¿Puedes notar similitudes entre las ecuaciones (32) y (18)? En efecto, durante la primera etapa se utilizó implícitamente la aproximación WKB en el cálculo del coeficiente de transmisión.

2.4. Juntando las Piezas

Pasando al caso de un núcleo real, la ecuación de onda correspondiente no puede ser resuelta porque el potencial exacto en sus alrededores es desconocido. Lo que hizo Gamow fue aproximar la energía potencial en el núcleo (Ver figura 4a) por un pozo cuadrado finito de ancho $2R_0$ (que representa la fuerza de unión nuclear), donde R_0 es el radio del núcleo, unido en cada extremo a una parte Coulombica de repulsión (Ver figura 4b).

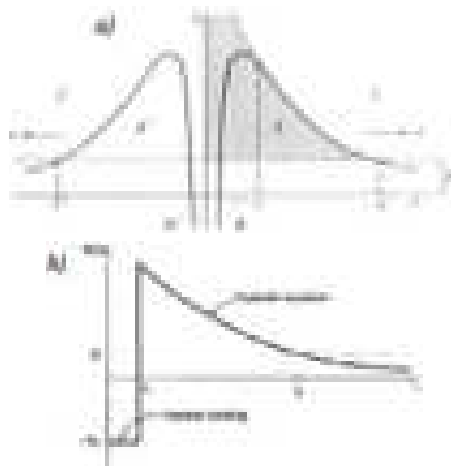


Figura 4. a) Representación del potencial alrededor del núcleo. Tomado de [2]. b) Modelo de Gamow para la energía potencial de una partícula alfa en el núcleo radiactivo. Tomado de [3].

Como se dijo, una partícula alfa está compuesta por dos protones y dos neutrones de ciertos núcleos radiactivos. Por lo tanto, estas partículas α tienen una carga positiva $2e$ siendo repelidas, cuando han alcanzado una cierta distancia requerida para escapar de la fuerza de unión nuclear, por el núcleo restante cuya carga es Ze . La energía potencial repulsiva de Coulomb entre una partícula alfa emitida y el núcleo hijo está dada por:

$$V(r) = \frac{ZZ'e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad (33)$$

Entonces, la energía que posee dicha partícula emitida es:

$$E_\alpha = V(r_2) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ZZ'e^2}{r_2} \quad (34)$$

donde; r_2 es la distancia del punto de inflexión, es decir, la distancia desde el centro del núcleo hasta donde α se convierte en una partícula libre (Ver Fig. 4b).

NOTA: Aquí $e = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ C}$ es la carga del protón, ¡no confundir con la función exponencial!

**La Ecuación de Einstein

En cuestión de cálculos, la energía de la partícula α emitida puede ser deducida a partir de la fórmula de Einstein ($E = mc^2$) de la siguiente manera:

$$E_\alpha = (m_p - m_d - m_\alpha)c^2 \quad (35)$$

donde; m_p , m_d , m_α son las masas del núcleo padre, núcleo hijo, y la partícula alfa, respectivamente.

Usando la ecuación (32), obtenida de la aproximación WKB, es posible calcular la constante de desintegración.

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{\hbar} \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{2m[V(r) - E_\alpha]} dr \\ &= \frac{1}{\hbar} \int_{r_1}^{r_2} \sqrt{2m \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{ZZ'e^2}{r} - E_\alpha \right)} dr \\ &= \frac{\sqrt{2mZZ'e^2}}{\hbar} \int_{r_1}^{r_2} \left(\frac{1}{r} - 1 \right) dr \end{aligned} \quad (36)$$

Usando la siguiente sustitución: $r = r_2 \sin^2 \theta$, se resuelve la integral anterior.

$$r = \frac{\sqrt{2mE_0}}{\hbar} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - \cos^2 \theta \right) \frac{1}{R_2} - \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} - \cos^2 \theta \right) \right] \quad (37)$$

Habitualmente, el radio del núcleo es mucho menor que la distancia hacia el punto de inflexión, es decir, $r_1 \ll R_2$. Entonces, se puede utilizar la aproximación de ángulo pequeño ($\sin \theta \approx \theta$):

$$r \approx \frac{\sqrt{2mE_0}}{\hbar} \left(\frac{1}{2} r_1 - \frac{1}{2} \sqrt{r_1 R_2} \right) \quad (38)$$

Reemplazando R_2 de la ecuación (34):

$$r \approx K_1 \frac{Z}{\sqrt{E_0}} - K_2 \sqrt{Z r_1} \quad (39)$$

Por lo tanto, la probabilidad de tunelización para un potencial nuclear será:

$$T \approx e^{-2(K_1 \frac{Z}{\sqrt{E_0}} - K_2 \sqrt{Z r_1})} \quad (40)$$

donde

$$K_1 = \left(\frac{2m}{\hbar^2} \right)^{1/2} \sqrt{2mE_0} = 1.988 \text{ MeV}^{1/2} \quad (41)$$

y

$$K_2 = \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar} \right)^{1/2} \frac{1}{\hbar} = 1.405 \text{ fm}^{-1/2} \quad (42)$$

*** Tamaño del Radio

Para el cálculo de r_1 , se considera que la densidad dentro del núcleo es constante, por lo tanto, r_1^3 es proporcional a la masa atómica (A). Por otro lado, el tamaño típico de un núcleo es un femtómetro o fermi (fm) que es 10-15m [3]. Así, empíricamente se tiene:

$$r_1 \approx 1.07 A^{1/3} \text{ [fm]} \quad (43)$$

Una vez que la probabilidad de tunelización (ecuación 40) y, por lo tanto, la constante de desintegración γ han sido calculadas, es necesario encontrar una expresión para la “vida útil” de un átomo radiactivo mediante un enfoque semiclásico. Supongamos que una partícula alfa se mueve dentro del núcleo con una velocidad media v , el tiempo medio entre colisiones será $\frac{2r_1}{v}$, por lo que la frecuencia de colisiones es $\frac{v}{2r_1}$. Sabiendo que la probabilidad de escape viene dada por $e^{-2K_1 \frac{Z}{\sqrt{E_0}}}$, entonces la probabilidad de emisión por unidad de tiempo es $\left(\frac{v}{2r_1} \right) e^{-2K_1 \frac{Z}{\sqrt{E_0}}}$, y por

lo tanto, la vida útil del núcleo padre es:

$$t = \frac{2r_1}{v} e^{2\gamma} \quad (44)$$

**** Velocidad de las Partículas Dentro del Núcleo

Desafortunadamente, la velocidad es desconocida, pero esto no importa mucho. Dado que el factor exponencial varía en veinticinco órdenes de magnitud a medida que pasamos de un núcleo radiactivo a otro, en comparación con esto, la variación en v es insignificante [3]. Sin embargo, ésta se la puede estimar usando $E = \frac{1}{2}mv^2$. Tal enfoque ignora la parte negativa de la energía potencial dentro del núcleo, subestimando así v , pero esto es lo mejor que se puede hacer por ahora.

2.5. La Ley de Geiger-Nuttall

La ley de Geiger-Nuttall es una relación empírica, documentada por primera vez por Hans Geiger y John Mitchell Nuttall en 1911, entre la constante de desintegración de los emisores alfa y la energía de las partículas emitidas. Esta ley tiene la siguiente forma:

$$\text{Log}_{10}(t_{1/2}) = a \frac{Z}{\sqrt{E_0}} + b \quad (45)$$

Tabla 1. Valores experimentales de E_0 y $t_{1/2}$ para algún núcleo. Datos cortesía de Leon van Dommelen [1].

Núcleo padre Z	E_0 [MeV]	$t_{1/2}$ experimental
^{210}Po	84 6,89	0,16 segundos
^{210}At	86 5,59	3,83 días
^{210}Ra	88 4,88	1622 años
^{210}Ac	90 4,05	$1,41 \cdot 10^{10}$ años

Usando la tabla 1, es posible encontrar las constantes a y b a través del montaje. De hecho, Geiger-Nuttall se convierte en:

$$\text{Log}_{10}(t_{1/2}) \approx 1.45 \frac{Z}{\sqrt{E_0}} - 47.29 \quad (46)$$

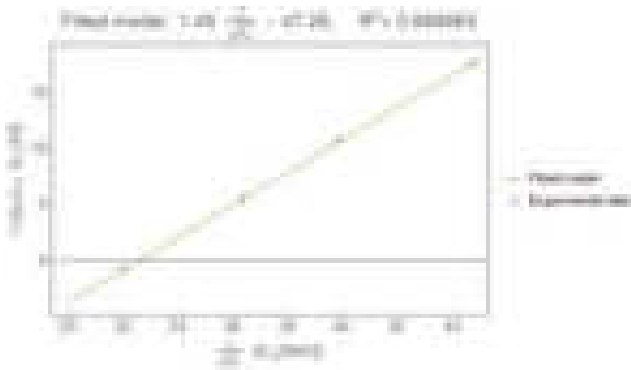


Figura 5. Ley de Geiger-Nuttall.

3. Resultados

3.1. “Vida Útil” Del Uranio 238

²³⁸U tiene la siguiente cadena de decaimiento:



de la cual se obtiene:

- Para uranio: $Z = 92, A = 238,$
 $m = 238,050784 \text{ u}$
- Para torio: $Z = 90, A = 234,$
 $m = 234,040952 \text{ u}$

Usando la ecuación (43), el radio del núcleo de uranio será:

$$r_1 = (1,07 \times 10^{-14}) 238^{\frac{1}{3}} = 10,5352 \text{ fm} \quad (48)$$

La fórmula de Einstein (35) predice que la energía de las partículas alfa emitidas es:

$$E_\alpha = (238,050784 - 234,040952 - 4,002602)(931) \text{ MeV} \\ = 4,26954 \text{ MeV} \quad (49)$$

Por otro lado; la velocidad a la que la partícula α es liberada, debido a (****), será:

$$v = \sqrt{\frac{2E_\alpha}{m_\alpha}} \quad (50) \\ = \sqrt{\frac{2(4,27)}{4,0026} \times 3 \times 10^8} \text{ m/s} \\ = 1,488567 \times 10^8 \text{ m/s}$$

De la ecuación (39), la constante de decaimiento es:

$$\lambda = 1,408 \frac{90}{\sqrt{1,27}} = 1,408 \sqrt{90(10,535)} \\ = 48,4042 \quad (51)$$

Finalmente; usando los resultados anteriores y la ecuación (44), la “vida útil” del uranio-238 es:

$$\tau_U = \frac{2(1,05352 \times 10^{-14})}{1,44 \times 10^7} e^{48,4042} \quad (52) \\ = 1,82377 \times 10^{11} \text{ segundos} \\ = 5,78215 \times 10^6 \text{ years} \\ \rightarrow t_{1/2} = \ln(2) \times \tau_U = 1,26414 \times 10^7 \quad (53)$$

3.2. “Vida Útil” Del Polonio 212

²¹²Po tiene la siguiente cadena de decaimiento:



de la cual se obtiene:

- Para polonio: $Z = 84, A = 212,$
 $m = 212,968242 \text{ u}$
- Para plomo: $Z = 82, A = 208,$
 $m = 207,976627 \text{ u}$

Si siguiendo la misma metodología que fue usada para el uranio, se puede obtener:

$$r_2 = 6,38 \times 10^{-14} \text{ m} \quad (55)$$

$$E_\alpha = 6,98 \text{ MeV} \quad (56)$$

$$v = 2,08 \times 10^8 \text{ m/s} \quad (57)$$

$$\lambda = 29,6 \quad (58)$$

De estos resultados se obtiene la “vida útil” para el polonio-212:

$$\tau_{Po} = \frac{2(0,38 \times 10^{-15})}{2,08 \times 10^7} e^{40,3} \quad (59) \\ = 8,2 \times 10^{-9} \text{ segundos}$$

La fórmula de Einstein (35) predice que la energía de las partículas alfa emitidas es:

$$E_{\alpha} = (200,050704 - 214,013593 - 4,002602)(931)MeV$$

$$= 4,284591 MeV \tag{49}$$

Por otro lado; la velocidad a la que la partícula α es liberada, debido a (****), será:

$$v = \sqrt{\frac{2E_{\alpha}}{m_{\alpha}}} \tag{50}$$

$$= \sqrt{\frac{2(4,28)}{4000}} \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$= 1,4805078 \times 10^7 \text{ m/s}$$

De la ecuación (39), la constante de decaimiento es:

$$\lambda = 1,418 \frac{90}{\sqrt{1,27}} = 1,418 \sqrt{90(10,535)} \tag{51}$$

$$= 49,4092$$

Finalmente; usando los resultados anteriores y la ecuación (44), la “vida útil” del uranio-238 es:

$$\tau_0 = \frac{2(1,05352 \times 10^{-24})}{1,44 \times 10^7} e^{0,0004} \tag{52}$$

$$= 1,42377 \times 10^{11} \text{ segundos}$$

$$= 3,78815 \times 10^6 \text{ años}$$

$$\rightarrow t_{1/2} = \ln(2) \times \tau_0 = 1,26414 \times 10^6$$

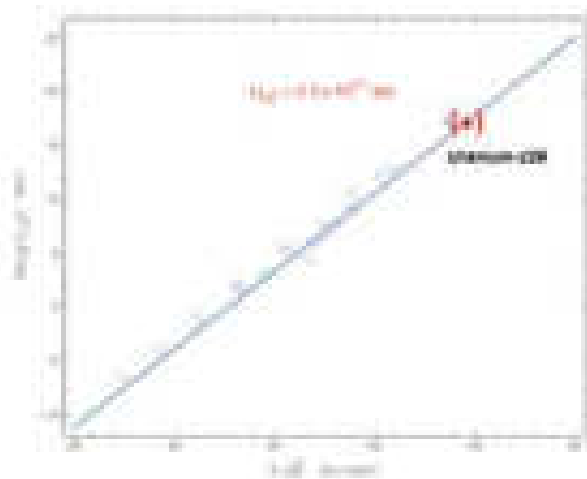


Figura 6. Representación del tunelamiento para Uranio-238.

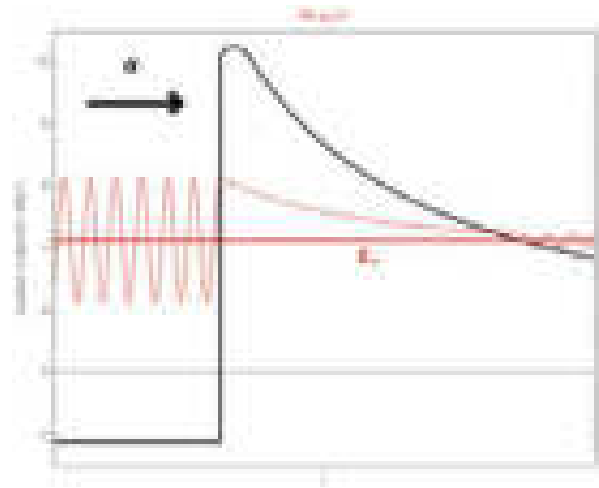


Figura 7. Ley de Geiger-Nuttall para Uranio-238.

4. Conclusiones

Se puede apreciar que la “vida útil” del uranio-232 y polonio-212 diferencian demasiado la una de la otra. Por lo tanto, existe una sensibilidad extrema a las masas nucleares: un pequeño cambio en m produce enormes cambios en τ .

Comparando la “vida media” del uranio 238 (ecuación 53) con el valor obtenido con la ley de Geiger-Nuttall (Ver figura 7) es posible apreciar diferencias en estos valores, sin embargo, las predicciones reproducen con éxito la tremenda gama de vidas medias y no se desvían mucho de los valores correctos en comparación con ese rango tremendo. Por lo tanto, es difícil imaginar otra teoría diferente al tunelamiento cuántico que podría hacer lo mismo.

5. Referencias

- [1] Leon van Dommelen. Quantum Mechanics for Engineers, Version 5.55 alpha. 2012.
- [2] G. Gamow. Quantum Theory of the Atomic Nucleus. 1928.
- [3] David J. Griffiths. Introduction to Quantum Mechanics (2nd Edition). 2nd. Pearson Prentice Hall. isbn: 0131118927.
- [4] Michael F L’Annunziata. Radioactivity: introduction and history, from the quantum to quarks; 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. url: <https://cds.cern.ch/record/2210635>.
- [5] W.E. Lee M.I. Ojovan. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation; 2nd ed. Elsevier, 2014.

- [6] A C Melissinos and Jim Napolitano. Experiments in modern physics; 2nd ed. New York, NY: Academic Press, 2003. url: <https://cds.cern.ch/record/897801>.
- [7] Eugen Merzbacher. “The Early History of Quantum Tunneling”. In: Physics Today 55.8 (Aug. 2002), pp. 44–49. doi: 10.1063/1.1510281. url: <https://doi.org/10.1063/1.1510281>.
- [8] Curt A. Moyer Raymond A. Serway Clement J. Moses. Modern Physics, Third Edition. David Harris, 2005.
- [9] Thaddeus J. Trenn. “Rutherford on the Alpha-BetaGamma Classification of Radioactive Rays”. In: Isis 67.1 (1976), pp. 61–75. issn: 00211753, 15456994. url: <http://www.jstor.org/stable/231134>.



³José Ignacio Trujillo.- Nació en Quito en 1999. Sus estudios primarios y secundarios fueron realizados en la ciudad de Latacunga. Ha obtenido reconocimientos académicos como abanderado de la ciudad de Latacunga en la Unidad Educativa N°5 de la FAE y Portabanderín del Pabellón Nacional en el Colegio Hermano Miguel. Sus estudios universitarios los está realizando en Yachay Tech habiendo culminado el séptimo semestre de la Carrera de Ingeniería en Nanotecnología.

Autor para correspondencia:
jgtrujillo1@espe.edu.ec

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	10 mayo 2021
Fecha aceptación	15 julio 2021

6. Biografía



¹Teniente Coronel Edison Ramiro Acurio Armas, GR. Administración Aeronáutica, Ingeniero Electrónico en Telecomunicaciones, Maestría en Educación/Jefe del Departamento de Ingeniería de Investigación de la Fuerza Aérea y Centro de Desarrollo, Director de Carrera de Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Subdirector de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea.



²José Guillermo Trujillo.- Maestría en Diseño y Fabricación Asistida por Computadora, Diploma Superior de Cuarto Nivel en Pedagogías Innovadoras, Diplomado Internacional en Gestión de Competencias, Ingeniero Mecánico, Docente tiempo completo/Instructor de la Escuela Técnica de la Fuerza Aérea y de la Carrera de Tecnología Superior en Ciencias Militares Aeronáuticas de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

**TÍTULO DE ARTÍCULO A SER PRESENTADO EN LA REVISTA ENERGÍA MECÁNICA
INNOVACIÓN Y FUTURO (EN ESPAÑOL)**

**TÍTULO DE ARTÍCULO A SER PRESENTADO EN LA REVISTA ENERGÍA MECÁNICA
INNOVACIÓN Y FUTURO (EN INGLES)**

¹Nombre Apellido Autor , ² Nombre Apellidos Autor, ³ Nombre Apellidos Autor,
¹⁻²⁻³ Institución o filiación , Dirección
E-mail : ^{1 2,3}

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, X Edición 2021, No. 1()

RESUMEN

Se presentan las instrucciones generales para presentar el artículo científico en la Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro Vol. 4 necesarios para ser considerada su publicación.

El resumen presenta el objetivo, alcance, resultados que sean fácilmente identificables por los lectores.

Debe contener de 150 a 250 palabras. Use la letra tipo Times New Roman en tamaño 11 en texto justificado.

Palabras clave:

Palabras que relacionan el contenido del artículo que se encontrarán en el resumen serán de 3 a 5 citándose en orden alfabético.

ABSTRACT

Redacción del resumen en inglés

Keywords:

Palabras claves en inglés.

1. INTRODUCCIÓN

Documento en plantilla de Microsoft Word para la preparación de artículos. Incluye una descripción de las fuentes, espaciados e información relacionada para generar la versión final, se adjunta archivo de ejemplo.

Redactado en página A4 , los márgenes deben ser: superior, inferior , izquierdo y derecho 25 mm.

La hoja debe estar dividida en dos columnas.

La versión final del artículo se debe enviar sin el nombre de los autores para su revisión por pares ciegos en un archivo en formato PDF con el fin de publicarlo en línea y en formato Word para su publicación impresa.

Para consultas dirigirse a:
wgerazo@espe.edu.ec ,
innovacion-el@espe.edu.ec

Instrucciones.

No exceder más de 7000 palabras entre 8 y 10 carillas máximo e incluir:

- Título en español e inglés
- Autores y su filiación institucional
- Resumen en español e inglés
- Palabras clave en español e inglés

Contenido del Artículo:

1. Introducción

- Fundamentación
- Definiciones
- Revisión de literatura
- Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis

2. Materiales, fuentes y métodos

- Recopilación de datos
- Tratamiento de las variables
- Análisis estadístico
- Material adicional
- Figuras
- Tablas

- Resultados
- Discusión
- Conclusiones
- Referencias bibliográficas

Material adicional

NORMATIVA:

Título principal

El título del artículo debe estar centrado y con fuente Times New Roman tamaño 14, escrito con letras mayúsculas y con la primera letra de las palabras mayores en mayor tamaño

Nombre del Autor(s) y afiliaciones

Los nombres del autor(es) deben estar centrados abajo del título y con fuente Times New Roman tamaño 8, sin negrita tal como se indica en la parte superior de este documento.

Se escribirá primero el nombre y luego el apellido.

Si el artículo tiene más de un autor, los nombres estarán separados por comas de manera que todos los nombres se los autores estén en una sola línea. Los detalles de los autores no deben mostrar ningún título profesional como PhD, MSc, Dr.

Utilizar editor de ecuaciones de Microsoft Word.

Enumere las ecuaciones consecutivamente colocando la numeración entre paréntesis y alineándola con el margen derecho.

La ecuación debe estar centrada.

Utilizar unidades del sistema métrico SI.

REFERENCIAS

Aquí se colocará la bibliografía utilizada.

Verificar las citas colocadas, considerar la norma:

APA
IEEE

Las referencias se presentan al final ordenadas numéricamente en corchetes [1] según el orden de aparición en el texto. Un punto debe seguir al paréntesis

[2].

Referencias múltiples pueden citarse con paréntesis separados por un guión [1]–[3]. Cuando se cite un libro indicar las páginas con la información relevante.

Al final del artículo liste y enumere todas las referencias bibliográficas con una fuente Times New Roman tamaño 12.

Usar “et al” si hay seis autores o más.

Resultados y Discusión

Analizar datos, valores curvas obtenidas en el proceso de desarrollo del artículo o investigación.

Conclusiones

Obtenidas de los datos obtenidos.

Biografía.

Incluir fotografía formal y actualizada, con estudios y títulos académicos, funciones en la institución.

El resto de artes y diseños se colocaran por parte de la editorial.

PROCESO DE EVALUACIÓN POR PARES

La revista Energía y Mecánica dispone de registro ISSN 1390-7395 conferido por la SENESCYT a petición de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE. Todo artículo debe ser inédito, el mismo que se enviará previa convocatoria al Comité Editor de la Revista, la cual siguiendo el proceso de calificación y arbitraje por pares especialistas a ciegas quienes considerarán su publicación.

Responsabilidades de los Revisores

a) Aporte a la decisión editorial

El proceso de revisión por pares ayuda al Editor de la revista a tomar decisiones editoriales y a través de la comunicación editorial con el autor también ayuda a mejorar la calidad y el texto de un manuscrito sometido a la revista. Los revisores se comprometen en realizar una revisión crítica, constructiva y honesta de la calidad científica de un manuscrito.

b) Respeto a los plazos de revisión

El revisor que no se sienta adecuado para realizar la tarea propuesta o que crea que no puede realizar la revisión en el tiempo requerido por la revista deberá informar al Editor de forma inmediata.

c) Confidencialidad

Cualquier texto asignado para su lectura será considerado confidencial. Por lo que dichos textos no deben discutirse con otras personas sin el permiso expreso del Editor.

d) Objetividad

La revisión por pares debe realizarse objetivamente. Cualquier juicio personal sobre el autor es inapropiado. Se requiere que los revisores justifiquen adecuadamente los juicios y comentarios realizados de un manuscrito.

e) Reconocimiento a fuentes de información

Los revisores se comprometen a indicar con precisión las referencias bibliográficas de trabajos fundamentales que el autor podría pasar por alto. Estas recomendaciones deben hacerse de manera transparente sin querer aumentar las citas a trabajos realizados por los mismos revisores. El revisor también debe informar al Editor de cualquier similitud o superposición del texto recibido para su revisión con otras obras que conozca.

f) Conflictos de interés y divulgación

La información confidencial o las indicaciones obtenidas durante el proceso de revisión por pares deben considerarse confidenciales y no pueden utilizarse para fines personales. Se requiere que los revisores no acepten revisar artículos para los que exista un conflicto de intereses debido a relaciones de colaboración o competencia con el autor y/o su institución de origen.

Responsabilidades de los Autores

a) Acceso y retención de datos

Si el Editor lo considera apropiado, los autores de los artículos también deberán hacer disponibles las fuentes o los datos en los que se basa la investigación desarrollada, para que puedan mantenerse durante un periodo de tiempo razonable después de la publicación y posiblemente hacerlos visibles.

b) Originalidad y plagio

Los autores deben garantizar que han escrito trabajos completamente originales y si los autores han utilizado el trabajo y/o las palabras de otros deberán indicarlo o citarlo correctamente en el manuscrito.

c) Publicaciones múltiples, repetitivas y/o concurrentes

El autor no debe publicar artículos que describan la misma investigación en más de una revista. Proponer el mismo texto a más de una revista al mismo tiempo es éticamente incorrecto e inaceptable.

d) Especificaciones de fuentes

El autor siempre debe proporcionar la indicación correcta de las fuentes y contribuciones mencionadas en el artículo. Un artículo debe contener suficientes detalles y referencias para permitir una respuesta.

e) Autoría de la obra

La autoría del trabajo debe ser correctamente atribuida y todos aquellos que han realizado una contribución significativa a la concepción, organización, implementación y reelaboración de la investigación que es la base del artículo deben indicarse como coautores. Si otras personas han participado significativamente en ciertas fases de la investigación, su contribución debe ser reconocida explícitamente. En caso de contribuciones de múltiples, el autor que envía el texto a la revista debe declarar que ha indicado correctamente los nombres de todos los demás coautores, que ha obtenido la aprobación de la versión final del artículo y su consentimiento para su publicación en la revista.

f) Conflicto de intereses y divulgación

Todos los autores deben indicar en su manuscrito cualquier conflicto financiero u otro conflicto de interés que pueda interpretarse de manera tal que influya en los resultados o la interpretación de su trabajo. Todas las fuentes de apoyo financiero para el proyecto deben ser divulgadas correctamente.

g) Errores en artículos publicados

Cuando un autor descubra un error significativo o una imprecisión en su trabajo publicado, debe notificar de inmediato al Editor de la revista para retirar o corregir el texto.

CÓDIGO DE ÉTICA

Energía Mecánica Innovación y Futuro es una revista científica revisada por pares, inspirada en el código de ética para publicaciones desarrollada por el Comité de Ética de Publicaciones (COPE – Committee on Publications Ethics).

Responsabilidades de los Editores**a) Decisiones de publicación**

El Editor de la revista es el responsable de decidir si publicar o no los artículos. El Editor se ampara en el Comité Científico de la revista y está sujeto a los requisitos de las leyes aplicables con respecto a la difamación, la infracción de derechos de autor y el plagio. El Editor de la revista puede comunicarse con otros editores o revisores para tomar sus propias decisiones.

b) Equidad

El Editor de la revista evalúa los artículos propuestos para su publicación en función de su contenido sin discriminación por motivos de raza, género, orientación sexual, religión, origen étnico, ciudadanía u orientación política de los autores.

c) Confidencialidad

El Editor y cualquier miembro del Equipo Editorial de la revista no pueden divulgar ninguna información sobre un manuscrito enviado para la evaluación de la revista a ninguna persona excepto al autor de correspondencia, revisores, revisores potenciales, consultor editorial y editores de sección según corresponda.

d) Conflictos de interés y divulgación

Los materiales no publicados contenidos en un manuscrito enviado no deben utilizarse en la investigación del Editor o un miembro del Equipo Editorial de la revista sin el consentimiento expreso por escrito del autor.

POLÍTICAS PLAGIO

Energía Mecánica Innovación y Futuro fomenta la honestidad de los autores y sus publicaciones. En este sentido, el Editor General de la revista una vez que recibe el envío de un nuevo artículo se encarga de pasarlo por el sistema de detección de plagio URKUND, sistema que analizará el contenido

completo de cada manuscrito y generará un informe completo acerca de su originalidad. Luego de este proceso, el Editor General analizará este informe y de acuerdo a los resultados presentados (porcentaje de similitud) y siempre al considerar que se respeten los derechos de autor de terceros trabajos, determinará si cada uno de los artículos sometidos a la revista Maskay puede continuar con el proceso de revisión por pares.

- Manuscritos que presenten un porcentaje de similitud menor al 20% y que hayan respetado los derechos de autor de terceros serán procesados directamente.
- Manuscritos que presenten un porcentaje de similitud menor al 20% donde se evidencia que los derechos de autor de terceros no han sido respetados serán devueltos a sus autores con los comentarios respectivos para que realicen las correcciones pertinentes.
- Manuscritos que presenten un porcentaje de similitud moderado, es decir entre el 20% y 50%, serán devueltos a sus autores con los comentarios respectivos para que realicen las modificaciones necesarias con el fin de reducir el porcentaje de similitud. Además, se solicitará a los autores que envíen una carta donde se justifique el moderado porcentaje de similitud.
- Manuscritos que presenten un porcentaje de similitud elevado, es decir mayor al 50%, serán rechazados y sus autores pasarán a formar parte de una lista de autores de riesgo de la revista. Una vez que los autores hayan sido ingresados en esta lista podrán solicitar salir de la misma siempre y cuando presenten una carta donde se justifique de manera extensa el alto porcentaje de similitud alcanzado.



**ENERGÍA MECÁNICA
INNOVACIÓN Y FUTURO**

Revista de Difusión N° 10
ISSN: 1390 - 7395
Publicación Anual / Diciembre 2021

RESPONSABLE LEGAL
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
Av. General Rumiñahui s/n
Sangolquí - Ecuador
P.O. Box. 171 -5 - 318
innovacion-ai@espe.edu.ec
wgenazo@espe.edu.ec

