



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Revista de difusión  
N°5 Vol. 1  
(2016)  
ISSN: 1390 - 7395

# N°5



# ENERGÍA MECÁNICA

## Innovación y Futuro



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

**GRAB. ROQUE MOREIRA CEDEÑO**  
Rector.

**CRNL. DE E.M. FREDDY JÁTIVA**  
Director .

**TCRN. ESP. RICARDO SÁNCHEZ C.**  
Subdirector

**ING. JOSÉ BUCHELI MSc.**  
Jefe Investigación Innovación y  
Transferencia de Tecnología

**ING. MARCO SINGAÑA A. MSc.**  
Director del Departamento de Ciencias de  
la Energía y Mecánica

**EDITOR GENERAL**  
Ing. Germán Erazo Laverde MSc.  
Docente Dpto. Ciencias de la Energía  
Mecánica

### ENERGÍA MECÁNICA , INNOVACIÓN Y FUTURO

Revista de Difusión No. 5  
ISSN : 1390 - 7395  
Publicación Anual  
500 EJEMPLARES

### RESPONSABLE LEGAL:

Universidad de Fuerzas Armadas ESPE  
Extensión Latacunga  
Quijano y Ordoñez 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. 4312  
2016  
500 ejemplares.

**Diseño de la revista:**  
Ing. Félix Javier Manjarrés Arias MSc.  
Ing. Ernesto Ramiro Santillán M.Sc.  
**Impreso en:**  
Editorial Universitaria.



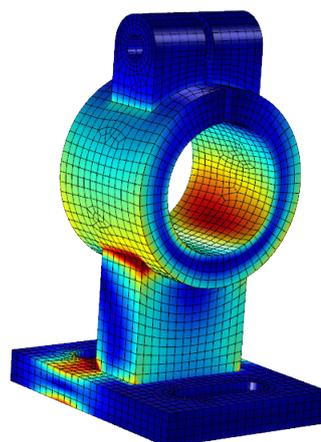
**Ing. Germán Erazo Laverde MSc.**  
Docente Tiempo Completo Dpto. Ciencias de la Energía  
y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

**PhD. Mónica Karel Huerta**  
Universidad Politécnica Salesiana  
Universidad Simón Bolívar  
Caracas - Venezuela  
Grupo de Redes y Telemática aplicada

**PhD. Ender Carrasquero C.**  
Director Académico del Centro Venezolano de estudios  
del trabajo y Ergonomía

**PhD. María Elena Villapolo  
CYA.**  
Docente Auckland  
University of Technology

**Ing. Luis Mena N. MSc.**  
Docente Tiempo Completo, Universidad de las Fuerzas  
Armadas ESPE



# ÍNDICE

Página

**SISTEMA AUTOMÁTICO SALVA ESCALERAS PARA SILLAS DE RUEDAS, EQUIPADO CON ORUGAS**

**AUTOMATIC SYSTEM SAVES STAIRS FOR WHEELCHAIRS, EQUIPPED WITH CATERPILLAR**

**Manjarrés Arias Félix Javier , Santillán Mariño Ernesto Ramiro, Morales Villegas Hernan**

10

**ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA EN LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOTOR QR25 DEL VEHÍCULO NISSAN X-TRAIL CUANDO SE UTILIZA EL VARIADOR DE AVANCE AL ENCENDIDO SPARK 11**

**ANALYSIS OF THE IMPACT ON THE QR25 ENGINE PERFORMANCE PARAMETERS VEHICLE NISSAN X-TRAIL WHEN USING THE TIMING ADVANCE PROCESOR SPARK 11**

**Quiroz Erazo Leonidas , Alvarado Corti Hugo , Quiroz Erazo José**

19

**ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN AL RUIDO EN EL PUESTO DE TRABAJO EN LA FABRICACIÓN DE SISTEMAS DE ESCAPE**

**ANALYSIS OF NOISE EXPOSURE IN THE WORKPLACE IN THE MANUFACTURE OF ESCAPE SYSTEMS**

**Laverde Albarracín Cristian Samuel , Peralvo Clavón Mario Alexander , Ramírez Idrovo Marco , Moreno Zulca Pedro Andrés**

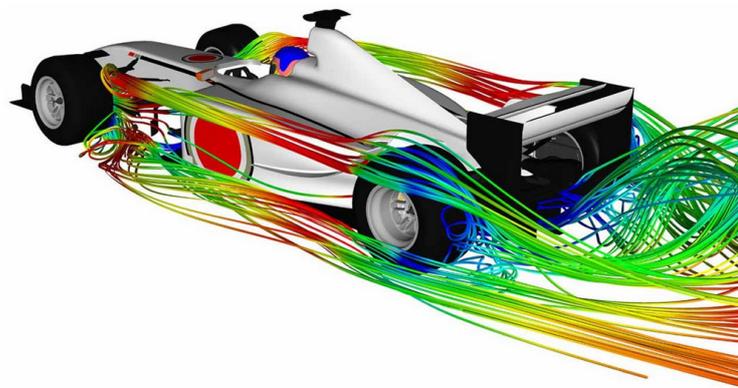
26

**SISTEMA DE DIRECCIÓN ASISTIDA HIDRÁULICAMENTE A LAS CUATRO RUEDAS EN VEHÍCULOS AUTOMOTORES**

**HIDRAULICALLY ASSISTED STEERING SISTEM FOR THE FOUR WHEELS ON AUTOMOTIVE VEHICLES**

**Carrera Tapia Romel David , Molina Molna Luis Fernando , Rocha Hoyos Juan Carlos , Zambrano León Victor Danilo**

33



43

**PROPUESTA DE CONTROL EFICIENTE DEL AIRE DE COMBUSTIÓN EN UNA PLANTA DE HORNO DE REDUCCIÓN**

**PROPOSAL THE EFFICIENT CONTROL OF COMBUSTION AIR IN THE PLANT OF REDUCTION FURNER**

**Santana López Enrique , Marrero Ramírez Secundino ,  
Vega Arias Orlando , González Palau Iliana A.**

53

**SIMULACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO EN LA CIUDAD DE AMBATO (ECUADOR) MEDIANTE COPERT 4**

**SIMULATION OF FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS OF THE PUBLIC TRANSPORTATION FLEET IN AMBATO (ECUADOR) WITH COPERT 4**

**Ceballos Marcillo John Jairo , Tinaut Fluixá Francisco Vicente**

69

**DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO EN MATLAB PARA EL ANÁLISIS Y EXPANSIÓN DE LAS SERIES DE TAYLOR Y LAURENT**

**DEVELOPMENT OF A DIDACTIC MODULE IN MATLAB FOR THE ANALYSIS AND EXPANSION OF THE TAYLOR AND LAURENT SERIES**

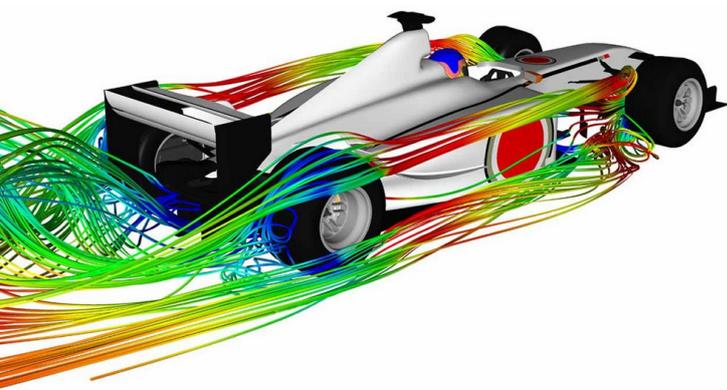
**Román Wilson , Barreno Norma**

77

**PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO TURBULENTO ORIENTADO A SUMINISTRO ENERGÉTICO PARA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE BAJA ESCALA**

**PROTOTYPE OF A TURBULENT FLOW WIND TURBINE ORIENTATED TOWARS THE ENERGY SUPPLY FOR AGRICULTURAL PRODUCTION OF LOW SCALE**

**Sinchiguano Molina Germánico , Córdova Vicente**



# ÍNDICE

Página

**MATERIALES COMPUESTOS AVANZADOS UTILIZADOS PARA EL BLINDAJE LIGERO DE VEHÍCULOS**

**ADVANCED COMPOSITES USED FOR LIGHT ARMOUR OF VEHICLES**

*Arteaga Oscar , Cruz Mauricio , Mena Euro , Zambrano Danilo ,  
Bonilla William*

91

**INFLUENCIA DE LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA BÁSICA (CaO-MgO) EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (EAF)**

**INFLUENCE OF BASIC SLAG (CaO - MgO) DECREASE IN POWER ON AN ELECTRIC ARC FURNACE (EAF)**

*Donoso Quimbita Caterine Isabel*

104

**ANÁLISIS DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS EN UN CAMIÓN EN ALTURAS SUPERIORES A 2500 MSNM**

**ANALYSIS AERODYNAMIC FACTORS IN A TRUCK, AT HEIGHTS OVER 2500 METERS ABOVE SEA LEVEL**

*Remache Coyago Abel , Tipanluisa Sarchi Luis ,  
Celi Santiago Fernando , Molina Osejos Jaime*

111

**PROTOTIPO DE INVERSOR MULTINIVEL MONOFÁSICO EN CASCADA**

**PROTOTYPE INVERTER SINGLE-PHASE MULTILEVEL IN CASCADE**

*Sarzosa Ante David de Jesús*

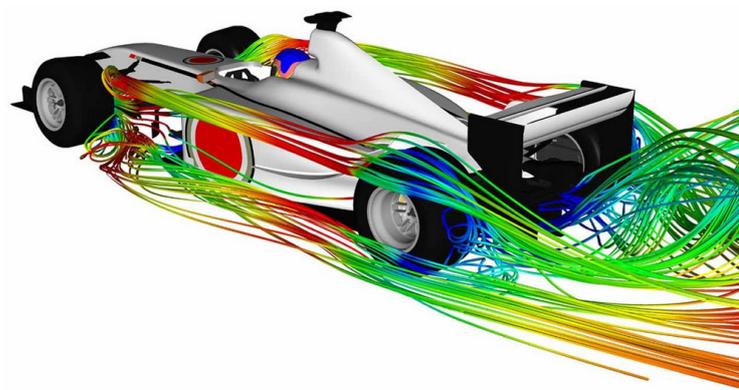
118

**IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL ABS PARA EL SISTEMA DE FRENOS NEUMÁTICOS**

**IMPLEMENTATION ABS CONTROL MODULE FOR THE PNEUMATIC BRAKE SYSTEM**

*Arellano Rodríguez Luis Marcelo , Tapia Carrillo María Gabriela*

126



Página

# ÍNDICE

133

**DIAGNÓSTICO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN EL PROCESO DE CALENTAMIENTO EN DISTRIBUIDORES DE ASFALTO MODELO ROSCO**

**DIAGNOSIS OF THERMAL EFFICIENCY IN THE WELDING PROCESS IN ASFALTO MODEL ROSCO DISTRIBUTORS**

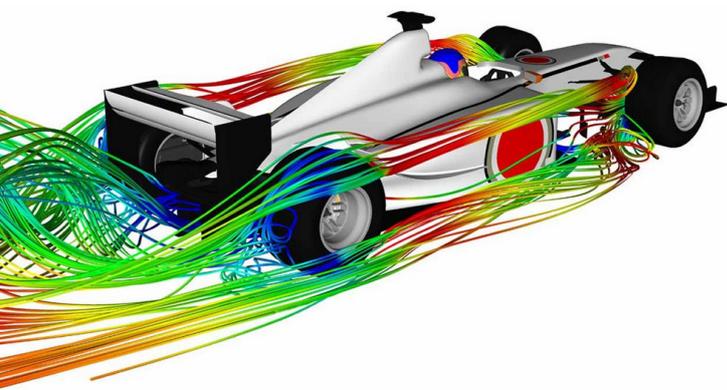
***Aimacaña Sánchez Emilia , Salazar Achig Roberto***

142

**COMPARACIÓN ENTRE ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DEL CÁLCULO DE CARGA SÍSMICA SEGÚN LA NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN**

**COMPARISON BETWEEN STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF SEISMIC LOAD CALCULATION ACCORDING TO THE ECUADORIAN CONSTRUCTION STANDARD**

***Novillo Andrade Geovanny Guillermo , Orna Chávez Javier Enrique***



## 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, 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.





***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 quinta edición de la revista de difusión científica ENERGÍA MECÁNICA, INNOVACIÓN Y FUTURO, que a través del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas –ESPE- se presenta a la comunidad universitaria y científica.

Se evidenciar 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 y 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 por quinta ocasión esta revista científica.

**Ing. FREDDY J. JÁTIVA C.**  
**CRNL. de E.M.**  
**Director**





La V 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, 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 con 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 para continuar innovando con excelencia.

**Ing. Germán Erazo Laverde MSc.**  
**Editor.**



**INGENIERÍA  
AUTOMOTRIZ**



**INGENIERÍA  
MECATRÓNICA**



**INGENIERÍA  
PETROQUÍMICA**

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

ING. FABIAN SALAZAR CORRALES Mgs	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
ING. ROBERTO BELTRAN REINA MSc.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
ING. ALEX CEVALLOS CARVAJAL MSc.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
ING. MARIO LARA NUÑEZ MBA	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
PHD. HEBERT MOLERO MORAN	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
ING. GALO AVILA ROSERO Mgs	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
ING. HECTOR TERAN HERRERA Mgs	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
ING. ADOLFO PEÑA PINARGOTE	Universidad Internacional del Ecuador – Guayaquil
ING. EDWIN PUENTEMOROMENACHO	Universidad Internacional del Ecuador – Guayaquil
ING. MARCELO GONZALEZ TORRES	Universidad Internacional del Ecuador – Guayaquil
ING. FABIO OBANDO M.Sc.	Universidad Politécnica Salesiana
ING. MARCELO ESTRELLA MSc.	Universidad Tecnológica Equinoccial
ING. ALEJANDRO ROJAS	Cise Electronics.
ING. DIEGO LOPEZ GUZMAN M.Sc.	Cise Electronics.
ING. FREDDY ROSERO OBANDO MSc.	Universidad Técnica del Norte
ING. XAVIER ROSERO CHANDY MSc.	Universidad Técnica del Norte
ING. FLAVIO ARROYO MOROCHO MSc.	Universidad Central del Ecuador
ING. RAMIRO ROSERO AÑAZCO MSc.	Universidad Técnica del Norte
ING. CELIN PADILLA ABAD MSc.	Escuela Politécnica de Chimborazo
ING. ALEX CALDERON MSc.	Universidad Técnica del Norte
ING. ESTEBAN LÓPEZ ESPINEL MSc..	Centro de Fomento Carrocero Tungurahua.
ING. LUIS SANTOS	Universidad Técnica del Norte
PhD. JULIO PINO	Universidad Laica Eloy Alfaro.
MSC. GABRIEL HERNANDEZ	Instituto Superior Metalúrgico MOA Cuba
ING. JUAN ROCHA MSc.	Universidad SEK
ING. HENRY IZA T.	Universidad de Fuerzas Armadas ESPE
ING. XAVIER ORBEA	Universidad Tecnológica Equinoccial



Fecha: \_\_\_\_\_  
Señores

Ing. \_\_\_\_\_

Director de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE

Ing. \_\_\_\_\_

Editor

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro ISSN 1390 – 7395  
Universidad de Fuerzas Armadas ESPE Latacunga

*\*\*\*nombre\*\*\*, titular del documento de identidad número \*\*\*\*\*, postuló el artículo titulado \_\_\_\_\_ para su publicación en la revista Energía Mecánica Innovación y Futuro ISSN 1390 – 7395 .*

*Con respecto a dicho artículo, declaro que es original e inédito, de la exclusiva autoría de los remitentes, y que no está en proceso de publicación por ningún otro medio; asimismo, me comprometo a no presentarlo para tales fines mientras dure el proceso de evaluación de la revista y previo a su publicación si fuera aceptado.*

*Dicho artículo se ajusta tanto a las POLÍTICAS EDITORIALES, como a la DECLARACIÓN DE ÉTICA de la publicación, las cuales conozco y acepto. A su vez, la totalidad de las citas, transcripciones y paráfrasis se encuentran referenciadas de conformidad con las exigencias que al respecto establece la GUÍA PARA AUTORES. En relación con el contenido, asumo la responsabilidad de todas las opiniones y los resultados.*

Cordialmente,

*\*\*\*Nombre\*\*\**

*Autor 1*

*<título académico>*

*<número del documento de identificación>*

*<institución o filial>*

*<e-mail>*

*<teléfonos>*

*\*\*\*Nombre\*\*\**

*Autor 2*

*<título académico>*

*<número del documento de identificación>*

*<institución o filial>*

*<e-mail>*

*<teléfonos>*

## SISTEMA AUTOMÁTICO SALVA ESCALERAS PARA SILLAS DE RUEDAS, EQUIPADO CON ORUGAS

### AUTOMATIC SYSTEM SAVES STAIRS FOR WHEELCHAIRS, EQUIPPED WITH CATERPILLAR

**Manjarrés Arias Félix Javier<sup>1</sup>, Santillán Mariño Ernesto Ramiro<sup>2</sup>, Morales Villegas Hernán Vinicio<sup>3</sup>**  
**<sup>1,2,3</sup> Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica,  
Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.**  
**e – mail: <sup>1</sup>fxmanjarres@espe.edu.ec, <sup>2</sup>ersantillan@espe.edu.ec, <sup>3</sup>hvmorales@espe.edu.ec**

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 1 (15)

#### RESUMEN

Se realiza la aplicación de un método de diseño mecánico y mecatrónico, así como el proceso de construcción de una estructura automatizada con orugas para movilizar una silla de ruedas a través de gradas, como una alternativa viable para transportar a personas con discapacidad motriz. Se aplica herramientas CAD, CAM, CAE, se proyecta la estructura y el sistema de control basado en el uso de un XBee Pro S1 y tarjeta Arduino.

#### Palabras clave

Salva escaleras, orugas, silla de ruedas, automatización.

#### ABSTRACT

The application of a method of mechanical and mechatronic design, as well as the process of construction of an automated structure with caterpillars to mobilize a wheelchair through stands, as a viable alternative to transport people with motor disabilities. It applies tools CAD, CAM, CAE, is projected structure and control system based on the use of an XBee Pro S1 and Arduino card.

#### Keywords

Saves stairs, tracks, wheelchair, automation.

#### 1. INTRODUCCIÓN

Las gradas existentes en los hogares y edificios sin duda alguna se constituyen en una barrera física para personas que tienen capacidades motrices especiales y que se trasladan generalmente en sillas de ruedas convencional.

En varios lugares esta problemática se resuelve con la implementación de ascensores, pero existen instituciones públicas o privadas que no disponen de esta máquina para que personas con capacidades especiales puedan movilizarse desde una planta a otra.

En vista de esta necesidad se optó por aplicar la metodología del diseño concurrente como base para el diseño e implementación de una estructura automática de orugas que pueda transportar a una persona con capacidades especiales en una silla de ruedas convencional, se considera el análisis estructural estático, dinámico, así como el diseño del sistema de control.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se considera los requerimientos técnicos del prototipo que se detalla en la Tabla 1 y que sirven de base para el desarrollo y la aplicación de una metodología adecuada de diseño.

Tabla 1. Especificaciones técnicas

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA AUTOMÁTICO DE ORUGAS	
Concepto	Descripción
Capacidad de carga	130 Kg
Peso del sistema	50 Kg
Velocidad	8m/min
Alimentación	DC mediante baterías
Potencia motores	300 W
Dimensiones	1.5m x 0.7m x 1m
Inclinación máx.	35°
Freno	Electromagnético
Mando	Control con botones de mando, leds indicadores, paro de emergencia.
Cargador de baterías	Automático
Portátil	Fácil desmontaje y montaje para su transportación
Mantenimiento	Sencillo

### Modelado geométrico

Con el empleo de herramientas CAD se realizó el modelado geométrico de las piezas que conforman la estructura automática de orugas y cuyo ensamble se observa en la Figura 1.

### Proceso de diseño

Con la finalidad de ejemplificar el presente análisis se determinó como elementos críticos el tubo de sujeción de la silla de ruedas y el eje que acopla la polea al motor, por ser los elementos que soportan mayor cantidad de carga. En este punto se establece: condiciones de frontera,

magnitudes de las cargas presentes, punto de aplicación y configuración de la calidad de mallado.

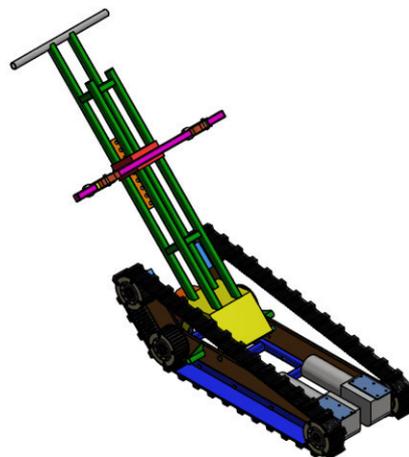


Figura 1. Modelado del sistema automático con orugas

La carga aplicada sobre el tubo del espaldar está constituida sobre la silla de ruedas anclada y asegurada al sistema de movilización que se encuentra a la altura de cada uno de los ganchos que sujetan la silla.

Se consideró una carga total por efecto del peso de la persona y de la silla de 1372 N, que se constituye en la fuerza resultante aplicada sobre el sistema al acoplar la silla de ruedas con el espaldar inclinado a 45 grados. Como se muestra en la figura 2.

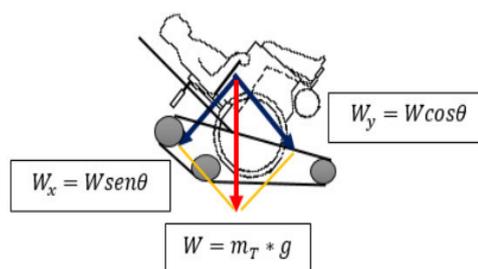


Figura 2. Diagrama de cuerpo libre del sistema

De lo cual se tiene:

$$W_x = (140Kg \cdot 9,8) \cdot \text{sen}45^\circ$$

$$W_x = 970,15N \quad \text{Ec.1}$$

$W_x$ , es la fuerza aplicada sobre el tubo del espaldar y al existir un soporte a cada lado del tubo se tiene:

$$W_y = (140Kg \cdot 9,8) \cdot \cos 45^\circ$$

$$W_y = 970,15N \quad Ec.2$$

$$p1 = p2 = 485N \quad Ec.3$$

Aplicando las ecuaciones de condición de equilibrio se obtiene como resultado:

$$R2 = 485N$$

$$R1 = -485N$$

El momento máximo flexionante

$$M_{\max} = -96 N.m$$

Para efectos del diseño y análisis en el elemento estructural denominado sujeción de la silla de ruedas, se selecciona un perfil de tubo cuadrado estructural de 25 mm y 1,5 mm de acero ASTM A500, con un módulo de resistencia para la sección cuadrada hueca es:  $S=0,97cm^3$ .

Partiendo de las ecuaciones:

$$\sigma = \frac{S_y}{n} \quad Ec.5$$

Se encuentra el momento máximo de flexión, y con el valor de S obtenido se tiene:

$$\sigma = \frac{96 N.m}{9,7 \times 10^{-7} m^3} = 98,97 \times 10^6 \frac{N}{m^2}$$

$$\sigma = \pm \frac{M_{\max}}{S} \quad Ec.4$$

Considerando que el límite a la fluencia para el acero ASTM A500 es de 315 MPa, se determina que el factor de seguridad es:

$$n = \frac{S_y}{\sigma} = \frac{315 \times 10^6 \frac{N}{m^2}}{98,97 \times 10^6 \frac{N}{m^2}} = 3.18$$

Para efecto de comprobar y validar el cálculo se utilizó el módulo "Static Structural" del programa ANSYS R14.5 versión estudiantil,

cuyas condiciones de borde y cargas aplicadas al sistema de sujeción del espaldar, así como el factor de seguridad obtenido se observa en la figura 3 y figura 4 respectivamente

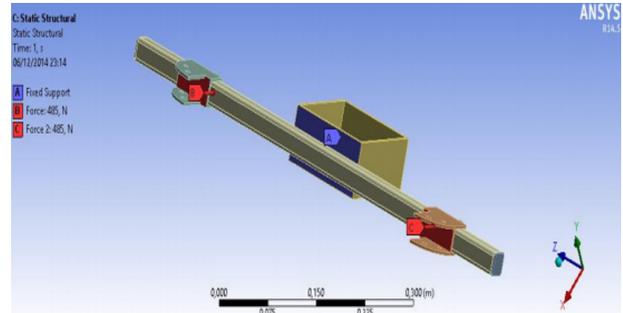


Figura 3. Condiciones de borde y cargas aplicadas al sistema de sujeción del espaldar

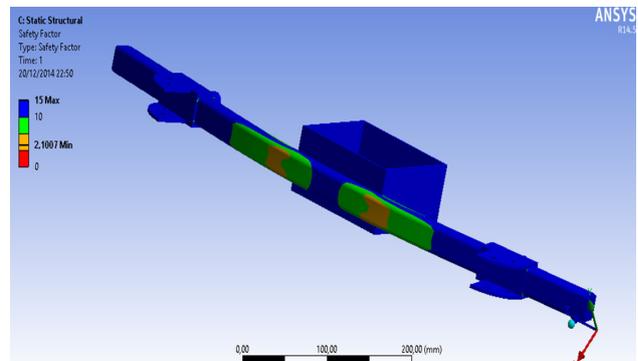


Figura 4. Factor de seguridad del tubo para espaldar

Para realizar el análisis dinámico, con el objetivo de determinar la mayor fuerza en el sistema de orugas, se establece tres escenarios de movimiento que tienen lugar en el sistema, primero cuando se desplaza en una superficie plana, segundo cuando el sistema supera el primer escalón y el tercero cuando el sistema se encuentra en plena marcha sobre las gradas, siendo en este último caso en donde se requiere la mayor fuerza para movilizar el sistema que fue de 2222.5 N

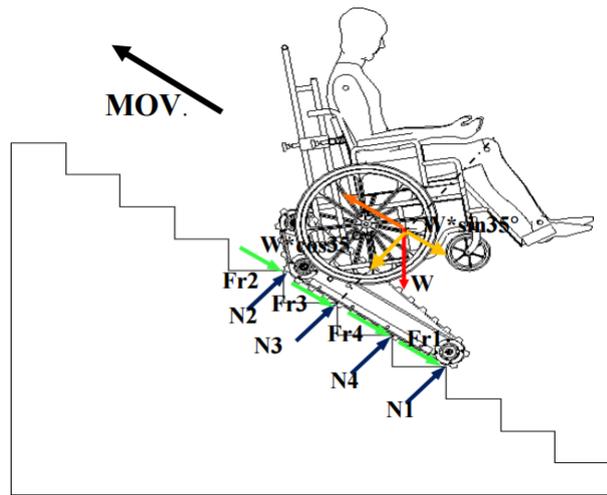


Figura 5. Fuerzas sobre el sistema al desplazarse sobre las gradas

### Cálculo potencia motores

Para que el sistema se desplace sobre las gradas la fuerza necesaria es de 2222,5 N, con esta fuerza se determinó que el trabajo necesario:

$$W = F \cdot d \quad \text{Ec.6}$$

La distancia se encuentra con la fórmula :

$$e = v \cdot t \quad \text{Ec.7}$$

Por tanto:

$$P = \frac{W}{t} \quad \text{Ec.8}$$

$$P = \frac{295,63 \text{ N} \cdot \text{m}}{1 \text{ s}} = 295,63 \text{ Watts}$$

Con el trabajo y la distancia se calcula la potencia:

$$e = 0,13 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 1 \text{ s} = 0,13 \text{ m}$$

$$W = 2274,09 \text{ N} \cdot 0,13 = 295,63 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Para que el motor logre movilizar el sistema de orugas en el caso más crítico debe tener 300 Watts.

### Cálculo para el eje acople del motor

El motor que genera el movimiento, posee un torque de 60 N x m, el material para la construcción del eje de transmisión es el AISI 1018.

El eje se encuentra sometido a una fuerza que ejerce la banda de transmisión al ser tensionada como se visualiza en la Figura 6:

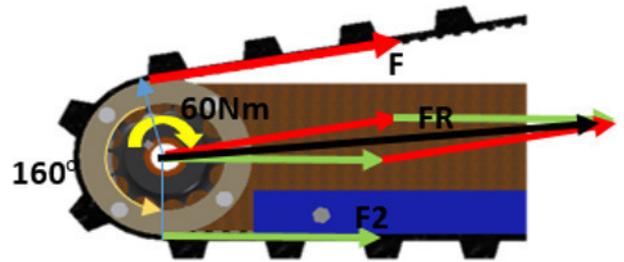


Figura 6. Diagrama de cuerpo libre del eje del motor

Al reemplazar el torque del motor  $M=60 \text{ N} \cdot \text{m}$ , el radio exterior de la polea  $r_{\text{extpolea}}=0.124 \text{ m}$ ., coeficiente de fricción entre nitrilo y aluminio  $\mu=0.22$  y el ángulo de contacto  $\theta=160^\circ \times \pi \text{ rad}/180^\circ=2.79 \text{ rad}$ ., en las siguientes ecuaciones:

$$M = (F_1 - F_2) \cdot r \quad \text{Ec.9}$$

$$\frac{F_1}{F_2} = e^{\mu\theta} \quad \text{Ec.10}$$

Se encuentra  $F_2 = 569,85 \text{ N}$  ,  $F_1 = 1052,51 \text{ N}$ , y la fuerza resultante de  $FR = 1599,91 \text{ N}$ .

### Diseño a fatiga del eje

Siguiendo el proceso de diseño a fatiga aplicado al eje, cuyo material es AISI 1018 ( $S_{ut} = 400 \text{ MPa}$  y  $S_y = 220 \text{ MPa}$ ) para garantizar que el mismo, soporte la carga se tiene:

$$se = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot \frac{1}{k_f} \cdot se' \quad \text{Ec.11}$$

$$se' = 0,5 S_{ut} \quad \text{Ec.12}$$

$$se' = 200 \text{ MPa}$$

Factor superficial,  $k_a = a \cdot S_{ut}^b$

Donde a y b son constantes a fatiga.

Acabado superficial maquinado o laminado en frío:

a=4,51 MPa  
b=-0,265 MPa

$$ka = 4,51MPa \cdot (400)MPa^{-0,265} = 0,9217$$

Factor de corrección por tamaño:

$$k_b = \left\{ \left( \frac{d}{7,62} \right)^{-0,107} \right\} \quad Ec.13$$

$$k_b = 1,24^{-0,107} \quad 2,79 \leq d \leq 51 \text{ mm}$$

d = diámetro del eje 32 mm

$$kb = \left( \frac{32}{7,62} \right)^{-0,107} = 0,85766$$

Factor de carga ,k<sub>c</sub>=1 Para flexión.

Factor de temperatura ,k<sub>d</sub>=1 Para

Temperatura ambiente:

Factor de confiabilidad k<sub>e</sub>=1

Factor de efectos diversos k<sub>f</sub>=1

$$se = 158,09 \text{ MPa}$$

$$se = 0,9217 \times 0,8576 \times 1 \times 1 \times 1 \times \frac{1}{1} \times se'$$

Aplicando la teoría de Goodman modificada: [2]

$$\frac{\sigma_a}{se} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n} \quad Ec.14$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{15,91 \text{ MPa} - 0}{2} = 7,95 \text{ MPa}$$

$$\frac{7,95}{158,08} = \frac{7,95}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

$$n = \frac{1}{0,0701} = 14,26$$

### Análisis Transitorio

Con el módulo Structural Transient del ANSYS Versión estudiantil se procede a realizar el análisis transitorio para comprobar el efecto dinámico en el eje del motor a las condiciones de funcionamiento.

Las soluciones obtenidas al realizar el análisis Transient con respecto al esfuerzo equivalente de Von Mises y el factor de seguridad, se presentan en las figuras 7 y 8 respectivamente.

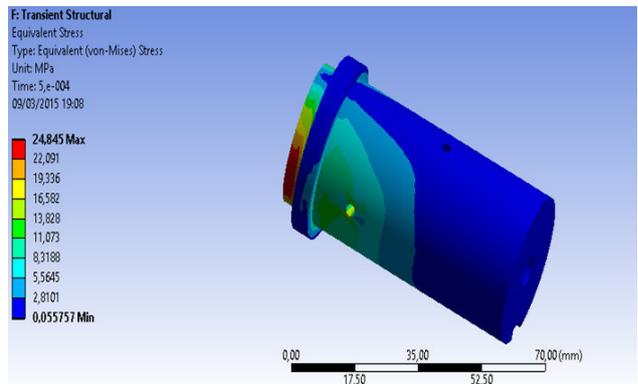


Figura 7. Esfuerzo equivalente de Von Mises

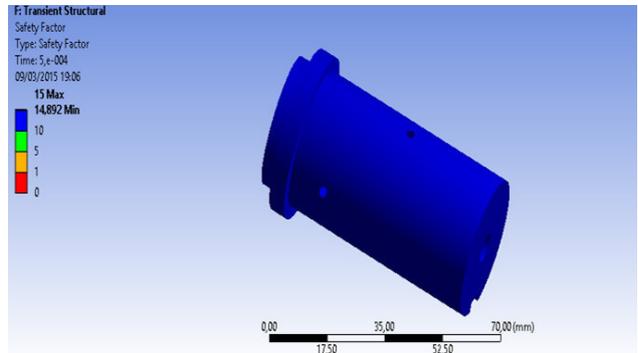


Figura 8. Factor de seguridad Análisis Transiente

El análisis Transiente establece un factor de seguridad en el eje de 14,89 valor muy similar al obtenido analíticamente mediante la ecuación de Goodman modificada. Al observar los dos factores de seguridad obtenidos se determina que el eje se encuentra correctamente diseñado para soportar cargas a fatiga.

El control automático que controla el movimiento de las orugas se realiza mediante un joystick de dos ejes, que envía las señales de posicionamiento hasta un XBee Pro S1 configurado previamente como

emisor.

El XBee Pro S1, envía las señales recibidas del joystick hacia un segundo XBee Pro S1 configurado previamente como receptor, una vez que recibe los datos del joystick, este comunica la información a la tarjeta de control Arduino Uno.

La tarjeta procesa la información recibida y la transforma en señales que serán interpretadas por la tarjeta Sabertooth 2x60.

Recibida la información en la tarjeta Sabertooth, esta se encarga de accionar a los motores DC (corriente directa), según los requerimientos y necesidades del usuario que opera el sistema produciéndose el desplazamiento del sistema.

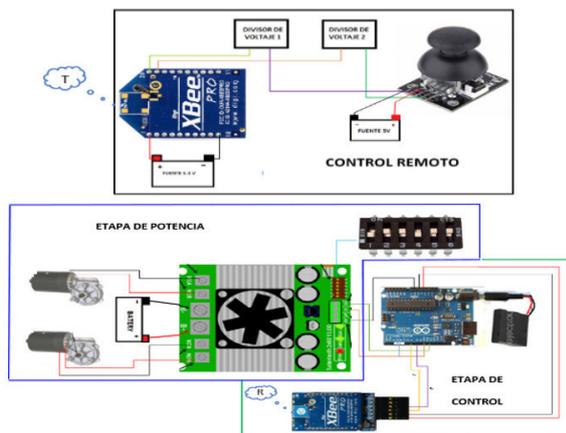


Figura 9. Control para el sistema de orugas

### Xbee Pro S1 como transmisor

Se configura uno de los XBee para que transmita los datos de manera inalámbrica hacia el control principal. Previo a esto se conecta el Xbee al computador, con la ayuda del cable de comunicación, y se verifica la conexión mediante el software X-CTU, una vez establecida la comunicación exitosa se configura el módulo transmisor empleando el software X-CTU y según los parámetros indicados en la tabla 2.

Tabla 2: Parámetros configuración Transmisor

PARÁMETRO	VALOR
PAN ID	100
DL	2
MY	1
D2	2
D1	2
D0	2
IT	5
IR	14

### Etapa de control

Es la encargada de recibir y procesar los datos para su posterior transferencia a la etapa de potencia.

En la etapa de control se encuentra el segundo XBee configurado previamente como receptor para recibir los datos enviados por el XBee Transmisor e ingresar los mismos en la tarjeta Arduino. El Xbee receptor se configura considerando los parámetros indicados en la tabla 3:

Tabla 3: Parámetros configuración XBee Receptor

PARÁMETRO	VALOR
PAN ID	100
DL	1
MY	2

La tarjeta Arduino Uno se constituye también en un dispositivo electrónico fundamental en la etapa de control, se encarga de tomar los datos que recibe el Xbee receptor para procesarlos y obtener datos que pueden ser interpretados por la Sabertooth.

La tarjeta debe ser programada mediante el software Arduino 1.6.0 para cumplir con este propósito.

### Etapa de potencia

En la etapa de potencia se encuentra la tarjeta Sabertooth 2x60 que controla los motores, esta recibe la señal de Arduino y según el valor que tenga la señal activa o desactiva a los motores, permite controlar

el sentido de giro y la velocidad de los actuadores.

La tarjeta sabertooth se configura para la aplicación a realizar y el tipo de señal. Se utiliza en diferentes modos al disponer de una placa con dip switches (DIP) para elegir el modo en el que se desea que opere [1].

El DIP es el elemento que permite la configuración del control y para el presente caso:

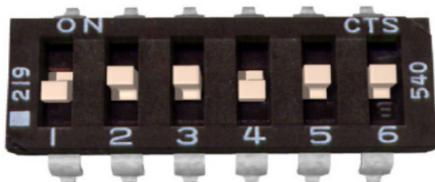


Figura 10. Configuración DIP

Cuando el switch 4 esta abajo la Saber se encuentra en modo independiente. En este modo la señal que ingrese en S1 controla directamente el motor 1 y la señal que ingrese en S2 controla el motor 2. Con el switch 1 abajo y el 2 arriba se configura el tipo de recepción de datos en control remoto.

Para energizar, la Saber y los motores se emplean baterías secas de plomo ácido de 12V a 7Ah.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se procede realizar las pruebas físicas para comprobar el funcionamiento correcto de los sistemas de control y sistemas mecánicos, para el efecto se realizó el ascenso y descenso por escaleras que comunicaban tres pisos durante tres veces consecutivas, con una carga máxima posible de 140 Kg, en dos diferentes tamaños de huella e inclinación en las gradas para verificar el correcto funcionamiento del sistema de control y tracción.



Figura 11. Sistema en protocolo de pruebas



Figura 12. Sistema puesto a prueba

Se confirmó el correcto funcionamiento de los sistemas mecánicos encargados de la trasmisión de potencia, de los elementos del anclaje y sujeción de la silla de ruedas al sistema, así como los elementos empleados en el control para manipular todo el conjunto y los elementos empleados en el freno del sistema. [3],[4]

#### 4. CONCLUSIONES

- Al calcular el factor de seguridad estático del sistema, obtener analíticamente un valor de 3,1, un valor de 2,1 de forma computacional se determina que el diseño del sistema es adecuado y soporta las cargas de diseño.
- El estudio dinámico del sistema considero tres escenarios de movimiento en superficie plana, al inicio del ascenso de las gradas y desplazamiento sobre las gradas, siendo este el escenario que requiere de la mayor fuerza para desplazamiento, a partir de la cual se proyectó el motor para el sistema de tracción.
- El análisis Transient y diseño a fatiga realizado sobre el eje permitieron obtener factores de seguridad bastante similares (14,89 y 14,26 respectivamente) validando el diseño del eje a las condiciones de carga consideradas para el diseño.
- El control automático permite generar posibilidades en el sistema para que una persona de capacidades especiales se adapte plenamente y pueda mejorar su calidad de vida al llevar una vida más normal.
- El control del sistema inalámbrico facilita su operación, permite que el espaldar del sistema pueda desmontarse para su transporte y almacenamiento.
- La selección de elementos electrónicos fue la más adecuada, se obtuvo el funcionamiento esperado por el sistema.

#### 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda el uso de orugas en un sistema salva escaleras, porque resulta ser idóneo para esta aplicación por su versatilidad y adaptabilidad a los escalones permitiendo el desplazamiento lineal a través de los mismos.
- Realizar un estudio de materiales compuestos que permitan reducir el peso del sistema sin disminuir la resistencia del mismo, tendiente a realizar una producción en serie.
- Utilizar el sistema automático con orugas en gradas que no superen los 35° de inclinación, de lo contrario se puede provocar inestabilidad del sistema.
- Ampliar el análisis de producción del sistema tendiente a optimizar, reducir los tiempos y costos de fabricación, garantizando la calidad de las piezas que conforman el sistema de transportación de silla de ruedas a través de escaleras.
- Al momento de operar la máquina se debe tomar muy en cuenta las características y restricciones del mismo para evitar daños permanentes, que afecten la vida útil del sistema de orugas.

#### 6. REFERENCIAS

- [1] QUINDE, J., & ULLOA, L.. «Diseño y construcción de dos Robots tipo Warbot» (2012) .
- [2] BUDYNAS, & J. K. Nisbett, Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. México, D. F.
- [3] RIBA ROMEVA, C. (2002). Diseño Concurrente. Cataluña: Ediciones UPC

[4] RIBA ROMEVA, C. (2002). Diseño para la Manufactura. En R. R. Carles, Diseño concurrente. Cataluña: Ediciones UPC.

## 7. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Félix Javier Manjarrés A.- es Ingeniero Automotriz e Ingeniero Industrial, Magíster en Gestión de Empresas , Magíster en Ciencias en Diseño, Producción y Automatización Industrial, Diplomado Internacional en Competencias Docentes

Instituto Tecnológico de Monterrey. Es consultor de proyectos de ingeniería mecánica e industrial. Docente tiempo parcial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga, profesor de posgrado en la Universidad Internacional SEK. Profesor a contrato en la Facultad de Mecánica en la EPN.



<sup>3</sup>Hernán Villegas, sus estudios superiores en Ingeniería Mecánica los desarrolló en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Posee título de cuarto nivel en Gestión de Energías Renovables de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Es Diplomado Superior en Gestión del Aprendizaje Universitario, título obtenido en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, actualmente se desempeña como Docente Tiempo Parcial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga.

### REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	22 junio 2016
Fecha aceptación	15 diciembre 2016



<sup>2</sup>Ernesto Ramiro Santillán M.- Ingeniero Mecánico, M.Sc en Diseño, Producción y Automatización Industrial. Magister en Dirección de Empresas Mención Proyectos. Diplomado Internacional en Competencias

Docentes Instituto Tecnológico de Monterrey, Docente tiempo parcial en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga. Consultor Individual en proyectos de desarrollo e inversión.

## ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA EN LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DEL MOTOR QR25 DEL VEHÍCULO NISSAN X-TRAIL CUANDO SE UTILIZA EL VARIADOR DE AVANCE AL ENCENDIDO SPARK 11

### ANALYSIS OF THE IMPACT ON THE QR25 ENGINE PERFORMANCE PARAMETERS VEHICLE NISSAN X-TRAIL WHEN USING THE TIMING ADVANCE PROCESOR SPARK 11

Leonidas Antonio Quiroz Erazo<sup>1</sup>, Hugo Ricardo Alvarado Corti<sup>2</sup>, José Quiroz Erazo<sup>3</sup>  
<sup>1,3</sup> Universidad de Fuerzas Armadas ESPE - Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.

<sup>2</sup> VIHAL Ambato

e - mail: <sup>1</sup>laquiroz@espe.edu.ec, <sup>2</sup>hralvarado@megavihal.com.ec, <sup>3</sup>jlquiroz@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 2 (15)

#### RESUMEN

La necesidad de la industria automotriz en encontrar métodos que permitan aumentar la potencia y torque del vehículo, así como también mejorar la calidad del aire reduciendo el consumo de combustible y disminuyendo la emisión de gases contaminantes, ha derivado en esta investigación, que considera la implementación de sistemas y dispositivos electrónicos de variación de avance al encendido, que optimiza el desempeño del motor de combustión, sin modificar el encendido original o cualquier otro elemento. El variador de avance Spark 11 fue implementado en el vehículo NISSAN X-TRAIL con el propósito de analizar su influencia en los parámetros característicos del motor QR25. Se obtiene y compara los distintos parámetros como son: torque, potencia, consumo de combustible y emisiones de gases a través de las diferentes pruebas en condición estándar y bajo la influencia del variador de avance al encendido programado en adelantos al encendido de 6°, 9°, 12° y 15°.

#### Palabras clave

Motor a combustión interna, variador de avance al encendido, parámetros característicos, emisión de gases contaminantes.

#### ABSTRACT

The need for the automotive industry to find methods to increase the power and torque of the vehicle, as well as improving air quality by reducing fuel consumption and reducing the emission of pollutant gases, has led to this research, which considers the Implementation of electronic ignition advance variation systems and devices, which optimizes the performance of the combustion engine without modifying the original ignition or any other element. The Spark 11 drive was implemented in the NISSAN X-TRAIL vehicle in order to analyze its influence on the characteristic parameters of the QR25 engine. It obtains and compares the different parameters such as: torque, power, fuel consumption and emissions of gases through the different tests in standard condition and under the influence of the advance drive to the ignition programmed in advance to the ignition of 6°, 9°, 12° y 15°.

#### Keywords

Internal combustion engine, timing advance processor, performance parameters, emissions of polluting gases.

#### 1. INTRODUCCIÓN

El variador de avance al encendido Spark

11 aumenta la potencia del vehículo, mejora la calidad de las emisiones, reduciendo el consumo de combustible [1].

La implementación del variador de avance al encendido Spark 11 en el vehículo NISSAN X-TRAIL tiene la función de corregir el punto de encendido, modificando la curva de avance y logrando un funcionamiento óptimo del vehículo, dicha corrección es calculada en función de parámetros almacenados en la memoria y modificadores externos como revoluciones por minuto, el sensor del árbol de levas y el sensor del cigüeñal. [2]

## 2. DESARROLLO

Para realizar la correcta implementación del dispositivo variador del avance al encendido Spark 11, se define las características del vehículo NISSAN X-TRAIL, obtener las señales de los sensores CKP y CMP figura 1 que son de efecto Hall a través del uso del osciloscopio automotriz, los mismos proporcionan el número de pulsos y posición de los cilindros así como también es necesaria la conexión eléctrica en función de la disposición de los terminales de cada uno de los sensores mencionados. [3][6]

El diagrama de conexión del dispositivo con los sensores y el pin-out, presentan la forma de conexión y función de cada terminal del mazo de cables. CMP (verde y verde/negro), CKP (amarillo y amarillo/negro), GND (negro) y alimentación (rojo).



Figura 1. Ubicación de los sensores e ignición

encendido debe ser de forma horizontal figura 2 con el propósito de observar los Leds indicadores los cuales muestran que el variador de avance Spark11 está correctamente instalado y funcionando [7].

El variador de avance Spark 11 se colocó junto a la carcasa del filtro de aire, para obtener una correcta ventilación

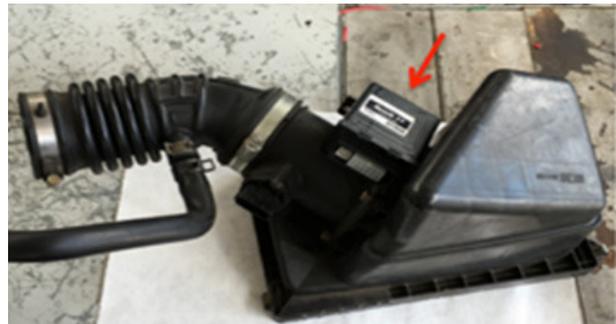


Figura 2. Instalación del variador Spark 11

Para la programación del variador, es necesario alimentarlo con 12 voltios VDC colocando el vehículo en contacto. El cable USB 700 se utiliza como interfaz de comunicación figura 3 entre el variador de avance Spark 11 y la computadora, con el fin de transferir los datos para la ejecución de las diferentes pruebas.

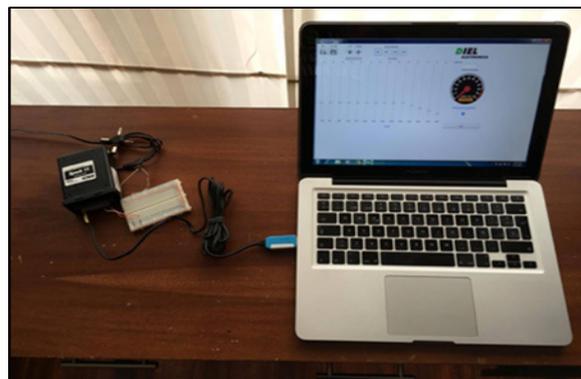


Figura 3. Cable interface de comunicación

Con el software S700 se personaliza y graba en el variador las curvas de avance estándar y modificadas de 6, 9, 12 y 15 grados de los variadores de la serie 700 figura 4.

La ubicación del variador de avance al

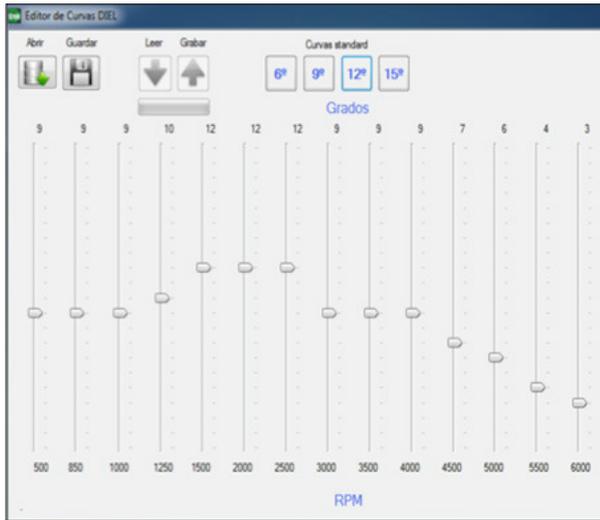


Figura 4. Programación con el software S700

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de determinar la incidencia del variador de avance al encendido Spark 11 en los parámetros característicos del vehículo NISSAN X-TRAIL se realizó diferentes pruebas que permiten obtener y comparar los distintos datos como son: torque, potencia, consumo y emisiones de gases contaminantes, conseguidos en condición estándar figura 5 y bajo la influencia del variador de avance al encendido programado en sus diferentes ángulos de adelantos al encendido como son (6°, 9°, 12° y 15°).



Figura 5. Prueba en el dinamómetro de rodillos

## 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

### Evaluación de torque.

En la tabla 1 están los resultados del torque, obtenidos en el dinamómetro. El torque máximo se consigue, cuando el vehículo no opera bajo la influencia del variador de avance al encendido Spark 11. Si el variador está activado a 15 grados se logra la menor lectura siendo 138,5 lbt.ft.

Tabla 1. Análisis de torque

TORQUE	
Estándar	156 lbt.ft
Variador 6°	143 lbt.ft
Variador 9°	140,33 lbt.ft
Variador 12°	143 lbt.ft
Variador 15°	138,5 lbt.ft

El torque del vehículo bajo por la influencia del variador de avance al encendido en 6, 9, 12 y 15 grados disminuyo de un 8 a 11 por ciento de acuerdo a la menor y mayor lectura en comparación con el torque obtenido sin la influencia del dispositivo figura 6.

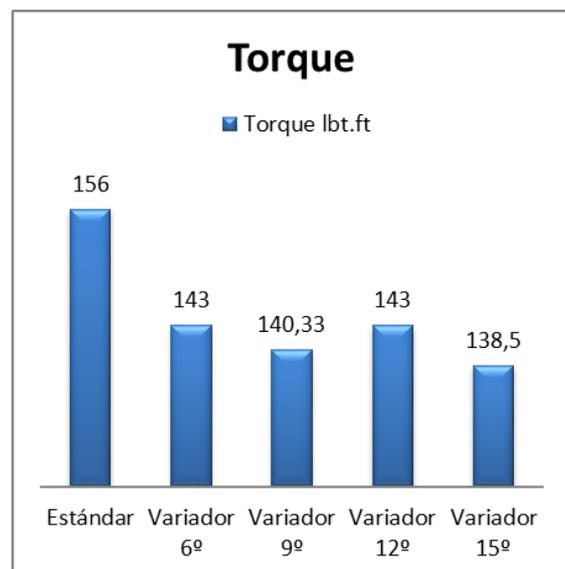


Figura 6. Comparación de torque

### Evaluación de potencia

Los resultados de potencia se muestran en la tabla 2. Obteniendo la mayor lectura

cuando el variador está programado a 15 grados y el de menor lectura cuando está programado a 9 grados.

Tabla 2. Análisis de potencia

POTENCIA	
Estándar	124,87 HP
Variador 6°	124 HP
Variador 9°	123,4 HP
Variador 12°	125,93 HP
Variador 15°	127,43 HP

[7] Las pruebas con el variador de avance al encendido activado en 9 y 15 grados dieron como resultado la disminución de la potencia en un 2,5 por ciento y un aumento de la potencia del 2 por ciento respectivamente en el vehículo NISSAN X-TRAIL.

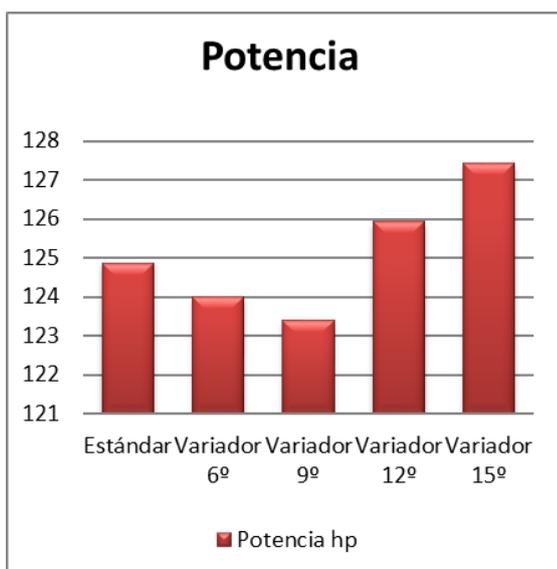


Figura 7. Comparación de la potencia

### Análisis de emisiones

Los resultados obtenidos por la prueba de análisis se obtuvieron siguiendo las normas NTE INEN 2 204:2002 (tabla 1 y 2 de la norma). [4] y la norma NTE INEN 2 203:2000. [5]. Que están en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis de emisiones de gases contaminantes crucero

POTENCIA	
Estándar	124,87 HP
Variador 6°	124 HP
Variador 9°	123,4 HP
Variador 12°	125,93 HP
Variador 15°	127,43 HP

Las emisiones de HC cuando el vehículo está sin el variador de avance Spark 11 son mayores con 149 ppm en comparación con las demás configuraciones, de igual manera los niveles de CO2 son los más altos alcanzando un 11,02 figura 8.

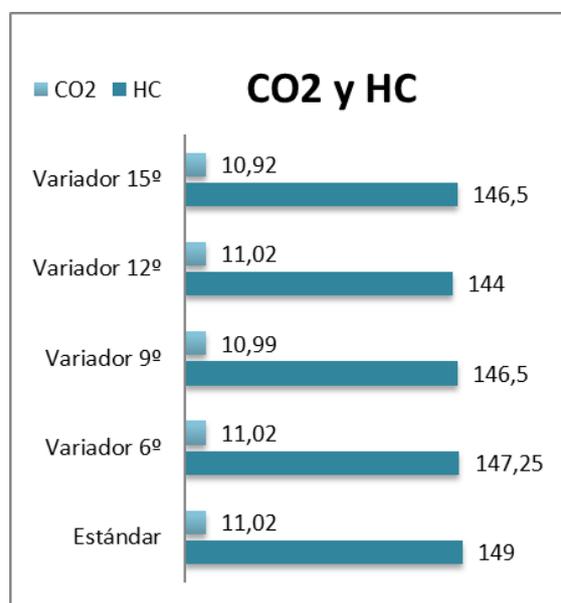


Figura 8. Comparación de CO2 y HC

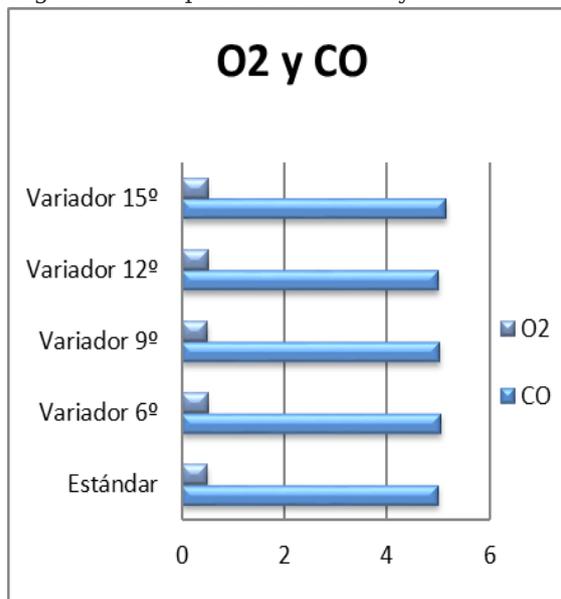


Figura 9. Comparación O2 y CO

Cuando el variador de avance al encendido Spark 11 esta configurado para 15º los niveles de CO y O2 son los más altos de todas las configuraciones figura 9.

### Evaluación de consumo de combustible

Cuando el vehículo esta bajo la influencia del variador de avance al encendido Spark 11 en 6, 9, 12 y 15 grados muestra una tendencia de ahorro de combustible consiguiendo un mejor rendimiento.

Tabla 4. Análisis de consumo de combustible

CONSUMO DE COMBUSTIBLE				
	Trip l/100 km	Total l /100 km	Fuel (l)	Fuel (l/h)
Estd.	9,50	9,5	2,75	1,75
6º	8,97	9,0	2,71	1,31
9º	8,94	8,9	2,69	1,34
12º	9,17	9,2	2,77	1,23
15º	9,24	9,2	2,79	1,30

[8] Cuando el vehículo NISSAN X-TRAIL tiene el variador de avance al encendido Spark11 activado; siempre tendrá un menor consumo de combustible 1,31 l/h a 6º, 1,34 l/h a 9º, 1,23 l/h a 12º y 1,30 l/h a 15º comparándolo con el valor del consumo calculado y con el valor estándar de 1,75 l / h. figura 10.

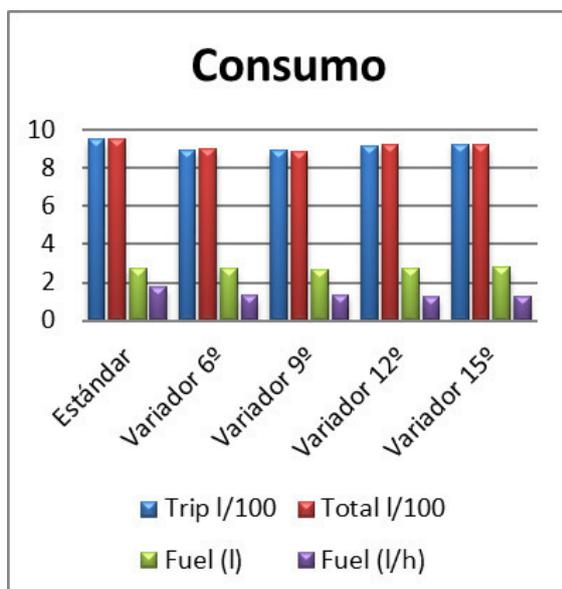


Figura 10. Comparación de consumo

## 5. CONCLUSIONES

Al finalizar la investigación, se establecen las siguientes conclusiones:

- Los resultados obtenidos de la potencia del vehículo NISSAN X-TRAIL, luego de ser sometido a la prueba en el dinamómetro de rodillos muestra que la potencia se redujo de 124,87 HP (estándar) a 124 HP con una variación al encendido de 6 grados y 123,4 HP con una variación al encendido de 9 grados.
- Las pruebas con el variador de avance al encendido activado en 12 y 15 grados dieron como resultado el aumento de la potencia del vehículo NISSAN X-TRAIL a 125.95 HP y 127,43 HP en comparación con 124,87 HP obtenido con el variador desactivado.
- En lo referente a los valores de torque obtenidos a través de la prueba en el dinamómetro de rodillos se determinó que el mayor torque se produce cuando el vehículo no opera con el variador de avance al encendido mostrando un valor de 156 lbf.ft.
- Los resultados obtenidos después de la prueba en el dinamómetro de rodillos con el uso del dispositivo, muestra una pérdida en el torque en todos los ángulos de encendido (6, 9, 12 y 15) que va desde 138,5 lbf.ft hasta 143 lbf.ft en comparación con el torque estándar.
- Se generó un registro de las variaciones de los parámetros característicos de torque y potencia en los cuales se observa que la potencia obtenida por medio de cálculos tiene una variación mínima (pérdida) de 0,93% en kW y 0,91% en HP, de igual manera se presenta una pérdida en el torque de 17% en N.m en comparación con la potencia que consta en la ficha técnica del vehículo, tomando en consideración

que la potencia y torque calculados se reducen por el factor de corrección.

- Luego de tabular los resultados de la prueba de consumo de combustible se obtuvo que el consumo de litros de combustible sobre hora se redujo en un 25,14% a 6º, 23,42% a 9º, 29,71% a 12º y 25,71% a 15º.
- En la prueba de análisis de gases las emisiones contaminantes se redujeron en un rango que va desde del 1,17% hasta el 3,36% cuando el variador de avance al encendido Spark 11 está activado.
- Con los resultados de la prueba de consumo de combustible y de análisis de gases se comprobó que cuando el vehículo tiene el variador de avance al encendido Spark11 activado en 6 , 9 , 12 y 15 grados; siempre tendrá un consumo menor de 1,4 l / h comparándolo con el valor del consumo calculado y con el valor obtenido de 1,75 l / h cuando está desactivado el dispositivo de igual manera sucede con las emisiones de HC y CO2 cuando el vehículo está sin el variador de avance Spark 11 las emisiones son mayores en un 149 ppm y un 11,02% respectivamente en comparación con las demás configuraciones.

## 6. REFERENCIAS

- [1] D. Freire, «Emisiones contaminantes en la combustión», 2013. [En línea]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5799/1/CD-4686.pdf>. [Último acceso: 20 Enero 2016].
- [2] Diel Electrónica, «Variadores de avance al encendido », 2016. [En línea]. Available: <http://electronicadiel.com/index.php/producto/variadores-de-avance>. [Último acceso: 12 Mayo 2015].
- [3] NISSAN, Service and Repair Manual, Japon, 2004.

[4] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION, NTE INEN 2 204:2002, Quito, Pichincha, 2002.

[5] INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACION, NTE INEN 2 203:2000, Quito, Pichincha, 2000. Sánchez Gutiérrez, M. (2013).

[5] Mantenimiento de motores térmicos de dos y cuatro tiempos. Málaga: IC Editorial.

[6] González Calleja, D. (2015). Motores térmicos y sus sistemas auxiliares. Madrid: Paraninfo.

## 7. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Leonidas Quiroz.- Ingeniero Automotriz, Magíster en Gestión de Energías, Diploma Superior en Autotrónica, Diploma Superior en Gestión para el aprendizaje universitario.

Jefe de Laboratorio de Mecánica de Patio, Docente de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE – Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.



<sup>2</sup>Hugo Alvarado Corti.- Ingeniero Automotriz, Asesoramiento en mecánica y electrónica del automóvil, Asesor en importaciones de autopartes en la empresa Corpal. Supervisor de pintura y enderezada en el Taller Mega VIHAL.



<sup>3</sup>José Quiroz , Ingeniero Automotriz, Magíster en Gestión de Energías, Diploma Superior en Autotrónica, Diploma Superior en Gestión para el aprendizaje universitario. Jefe de Laboratorio de Autotrónica,

Docente de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE – Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica.

---

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

---

Fecha recepción	6 junio 2016
Fecha aceptación	10 diciembre 2016

---

## ANÁLISIS DE EXPOSICIÓN AL RUIDO EN EL PUESTO DE TRABAJO EN LA FABRICACIÓN DE SISTEMAS DE ESCAPE

### ANALYSIS OF NOISE EXPOSURE IN THE WORKPLACE IN THE MANUFACTURE OF ESCAPE SYSTEMS

Cristian Samuel Laverde Albarracín<sup>1</sup>, Mario Alexander Peralvo Clavón<sup>2</sup>, Marco Ramírez Idrovo<sup>3</sup>, Pedro Andrés Moreno Zulca<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3</sup> Universidad Tecnológica Equinoccial. <sup>1</sup> Universidad Técnica de Babahoyo,  
<sup>4</sup> Instituto Tecnológico Superior Tecnoecuatoriano  
e - mails: <sup>1</sup>cristian.laverde@ute.edu.ec, <sup>2</sup>alexander.peralvo@ute.edu.ec, <sup>3</sup>marco.ramirez@ute.edu.ec, <sup>4</sup>pmoreno@tecnoecuatoriano.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 3 (15)

#### RESUMEN

El ruido es uno de los factores de riesgo predominantes en la industria metalmecánica. La exposición al ruido laboral en el puesto de trabajo en la fabricación de sistemas de escapes de vehículos, generó la información necesaria para establecer las medidas técnicas y administrativas de control para reducir este factor de riesgo físico. Con la caracterización de la exposición a ruido por puesto de trabajo se comprueba si los equipos de protección personal suministrados son los adecuados, ya que el ruido en el lugar de trabajo está en diferentes frecuencias por lo que es imprescindible disponer con información a fin de brindar al profesional en la rama una adecuada protección, lo cual debe ser complementado con las medidas administrativas a fin de que este factor de riesgo no desencadene en enfermedades de tipo ocupacional.

#### Palabras clave

Enfermedad ocupacional, exposición, factor de riesgo, ruido, sistemas de escapes.

#### ABSTRACT

Noise is one of the predominant risk factors in the metalworking industry. Exposure to occupational noise in the workplace in the manufacture of vehicle exhaust systems generated the necessary information to establish the technical and administrative control measures to reduce this physical risk factor. With the characterization of the exposure to noise by workplace, it is checked if the personal protective equipment supplied is adequate, since the noise in the workplace is at different frequencies, so it is essential to have information in order to provide To the professional in the branch an adequate protection, which must be complemented with the administrative measures so that this risk factor does not trigger in diseases of occupational type.

#### Keywords

Occupational disease, exposure, risk factor, noise, exhaust systems.



## 1. INTRODUCCIÓN

Los trabajadores están expuestos al ruido en el lugar de labores y a todos los riesgos que estos conllevan. Es más evidente en industrias como: La manufacturera y la construcción. Este antecedente plantea la inquietud a que factores hacen que en un trabajador que inicia su vida laboral con una audición sana, debido a la exposición a niveles elevados de ruido con riesgo de pérdida auditiva, comience un proceso paulatino de pérdida de la audición que dura años. [1]

El Ecuador carece de datos estadísticos que muestren a lo largo del desarrollo de la industria en el país la afectación debida a la exposición de los diferentes factores de riesgo menos aún si han existido enfermedades declaradas como de tipo ocupacional debido a la exposición a niveles elevados de ruido.

Se cuenta con registros que muestran de manera global tanto accidentes como enfermedades ocupacionales que han sido atendidas por el Seguro General de Riesgos del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social, a este antecedente se debe sumar que en el país existe un sub registro de los accidentes/enfermedades debido a que tanto empleadores como trabajadores son reacios a notificarlas en los trabajos conocidos como formales en los cuales todos los obreros cuentan con la afiliación a la seguridad social que en el país es de carácter obligatorio.

El tema es aún más preocupante cuando en el país existe una gran cantidad de subempleo y empleo informal lo que hace prácticamente imposible tener cifras reales de la afectación de los trabajadores que diariamente están expuestos a los factores de riesgo en sus distintas actividades.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con el informe de rendición de cuentas del año 2009 del Seguro General de Riesgos del Trabajo en ese año se presentaron 194 avisos de posibles enfermedades ocupacionales de los cuales 115 fueron presentados en la provincia de Pichincha, del total de avisos presentados se calificaron 131 a nivel nacional y 102 en la provincia de Pichincha lo que da cuenta que los contaminantes ambientales presentes en los centros de trabajo no se han controlado de una manera eficaz por parte de las empresas, a esto hay que sumar que en el país existe un sub registro tanto de accidentes de trabajo como de posibles enfermedades de tipo ocupacional. [2]

Lo que indica que la higiene industrial en las empresas ecuatorianas ha quedado relegada únicamente a un cumplimiento mínimo de entrega de equipo de protección individual y que en muchos casos no es el más apropiado. Dentro de estas afecciones a la salud un importante porcentaje corresponde a problemas generados por la presencia de ruido ocupacional.

El ruido es el contaminante ambiental más frecuente en el conjunto de todos los sectores de actividad, la exposición a ruido es la causa de alrededor de un tercio de los 28 millones de casos de sordera en Estados Unidos, y el National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) informa que el 14 % de los trabajadores norteamericanos está expuesto a niveles de ruido potencialmente peligrosos, es decir por encima de los 90 decibelios (dB). [3]

En 2011 el 34,8% de los trabajadores indica que en su puesto de trabajo el nivel de ruido al que están expuestos es molesto, elevado o muy elevado. Este porcentaje de trabajadores es inferior

al obtenido en 2007 (37,2%). (VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo INSHT).

Los trabajadores expuestos a un nivel de ruido elevado o muy elevado son el 10% del total, pero representan el 26,1% en industria y el 21,8% en construcción. La diferencia por sexo también resulta destacable ya que un 13,5% de los hombres está expuesto a estos niveles por un 6,1% de las mujeres. (VII Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo INSHT).

Las estadísticas mencionadas anteriormente corresponden a España (tomando en cuenta que el INSHT es el organismo regulatorio en ese país). Nuestro país carece de investigación en higiene industrial.

La ausencia de una normativa nacional que cite como realizar las mediciones de ruido ha sido otra circunstancia desfavorable para que se realicen estos estudios al interior de las empresas de una forma técnica.

La investigación se realizó al proceso de fabricación de sistemas de escape de la Línea Automotriz en la Empresa INDIMA S.A.

A partir de la determinación de la exposición al ruido por puesto de trabajo se establecen los controles adecuados tanto a los niveles de ruido presentes en el centro de trabajo así como también al tiempo de exposición que los colaboradores se ven sometidos a este factor de riesgo físico, haciendo énfasis en que dichas medidas de control prioricen la protección colectiva, medidas administrativas y que finalmente se desarrolle un análisis técnico para la correspondiente dotación de equipo de protección individual necesario para

atenuar esta exposición.

La norma UNE-EN ISO 9612:2009 especifica el método de ingeniería que permite medir la exposición al ruido de los trabajadores en su entorno laboral para calcular el nivel de exposición al ruido, en el puesto de trabajo. Esta norma trata niveles ponderados (A), aunque también es aplicable a niveles ponderados (C).

La norma detalla tres estrategias distintas para la determinación del nivel de ruido en el puesto de trabajo. Esta norma es muy útil para estudios relativos a un deterioro de la audición o de otros efectos nocivos. El proceso de medición requiere la observación y el análisis de las condiciones de la exposición al ruido, de manera que se controla la calidad de las mediciones.

Proporciona métodos que permiten estimar la incertidumbre de los resultados.

La norma UNE-EN ISO 9612:2009 no está destinada a la evaluación del enmascaramiento de la comunicación oral ni a la evaluación de los efectos de los infrasonidos, ultrasonidos, o de los efectos no auditivos del ruido. Los resultados de las mediciones realizadas, siguiendo las disposiciones de esta norma, pueden aportar información útil a la hora de definir las prioridades para las medidas de control de ruido. [4]

La estrategia de medición basada en la tarea es muy útil para trabajadores o grupos de trabajo homogéneos (grupos de trabajadores que están desempeñando la misma función laboral durante la jornada laboral) sometidos a evaluación durante la jornada nominal, (comprende la jornada laboral, incluyendo las pausas) en que la función se puede dividir en tareas. Cada tarea se debe definir de tal manera que el  $L_p, AeqT$

(nivel de presión sonora equivalente ponderado A sobre un período T) sea con probabilidad repetible. Es necesario garantizar que todas las contribuciones al ruido relevantes estén incluidas. La duración de las tareas es especialmente importante para aquellas fuentes con niveles de ruido elevados. [5]

Para obtener una correcta determinación de  $L_{p,AeqT}$  y del  $L_{p,Cpico}$  (nivel de presión sonora de pico ponderado C) es importante la identificación de las fuentes de ruido y de las tareas que provocan los niveles de pico más elevados (A). Duración de las tareas.

A continuación se detallan los pasos a seguir para realizar la investigación:

1. Análisis del trabajo
2. Definición de grupos de exposición homogéneos
3. Determinación de la jornada nominal
4. Medición basada en la tarea
5. Cálculo de incertidumbre
6. Determinación de la dosis de exposición
7. Nivel de riesgo en función de la dosis por puesto de trabajo. [6]

Es imprescindible recordar el concepto de tasa de intercambio que es la variación de la presión sonora en decibelios que supone una duplicación o reducción al doble o la mitad, respectivamente, del tiempo máximo de exposición. Si el límite está en 85 dB y una persona se encuentra expuesta constantemente a un nivel de presión sonora de 85 dB durante ocho horas, el resultado es un 100% de la dosis de ruido. Un nivel constante de 88 dB da como resultado un 200% de la dosis de ruido de acuerdo a la norma ISO, para las mediciones se utilizó el sonómetro de bandas de Octava CR: 162 C Cirrus Serie G061390. [7]

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis se realizó el cálculo de la dosis junto con el análisis de nivel de riesgo basado en la Norma ISO 9612:2009 mostrado en la Tabla 1.

Tabla 1. Nivel de riesgo en función de la dosis de ruido.

Dosis proyectada	Nivel de riesgo
$D < 50 \%$	Riesgo Bajo
$50 \% \leq D \leq 100 \%$	Riesgo medio, nivel de acción
$D \geq 100 \%$	Riesgo alto, nivel de control

Con la información obtenida de la medición basada en la tarea realizada en cada uno de los puestos de trabajo se muestra en la tabla 2, los niveles de riesgo de los puestos de trabajo (análisis de exposición al ruido) presentes en la línea de tubos de la fabricación de sistemas de escapes.

Tabla 2: Análisis de Exposición al ruido por puesto de trabajo

Puesto / Tarea	Nivel de Riesgo		Nivel de Riesgo
	LEX,8h	Dosis	
Corte (Plasma)	87,9	193%	Riesgo alto, nivel de control
Corte (Sierra Cinta 1)	85,7	119%	Riesgo alto, nivel de control
Corte (Sierra Cinta 2)	86,5	142%	Riesgo alto, nivel de control
Corte (Guillotina)	86,2	133%	Riesgo alto, nivel de control
Dobladora (Tejero 1)	84,2	84%	Riesgo medio, nivel de acción
Dobladora (CNC 2)	84,1	81%	Riesgo medio, nivel de acción

Dobladora (Zeziola 3)	81,4	44%	Riesgo bajo
Dobladora YLM	83,1	64%	Riesgo medio, nivel de acción
Nivel de Riesgo			
Puesto / Tarea	LEX,8h	Dosis	Nivel de Riesgo
Tronzado 1	91,8	483%	Riesgo alto, nivel de control
Tronzado 2	86,8	151%	Riesgo alto, nivel de control
Perforado (Punzonadora 1)	92,9	620%	Riesgo alto, nivel de control
Perforado (Punzonadora 2)	89,2	261%	Riesgo alto, nivel de control
Pre Pulido	90,4	350%	Riesgo alto, nivel de control
Suelda Roll Bar	86,7	150%	Riesgo alto, nivel de control
Pulido	86,2	130%	Riesgo alto, nivel de control
Engrafado	88,0	199%	Riesgo alto, nivel de control

FUENTE: Investigación de campo y resultados calculados.

En la figura 1 se evidencia de manera gráfica los puestos de trabajo que se encuentran sobre la dosis (100%) calculada y contrastada con la Norma ISO 9612-2009.

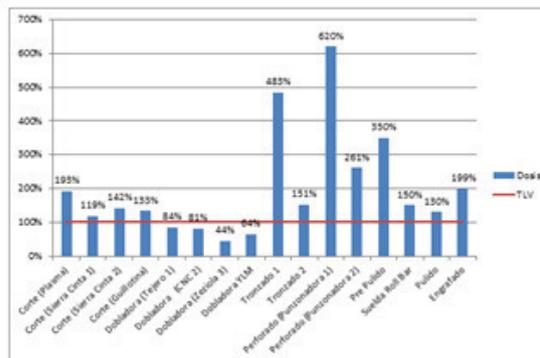


Figura 1. Exposición al ruido por puesto de trabajo

A través de la medición de la exposición a ruido ocupacional por puesto de trabajo se determina la dosis y por ende el nivel de riesgo a los que están expuestos los trabajadores de la línea de tubos de la fabricación de sistemas de escape, toda vez que la medición se realizó bajo los lineamientos establecidos por la Norma ISO 9612-2009 que avala los resultados obtenidos que son usados para la posterior evaluación y control de este importante factor de riesgo.

En relación a los resultados obtenidos se debe recordar que estos no contemplan la disminución de la exposición proveniente del uso de los equipos de protección auditiva, ya que una vez realizada la evaluación se debe seleccionar el equipo de protección auditiva requerida para los niveles de riesgo presentes.

De los resultados obtenidos se nota que únicamente los puestos de trabajo denominados: Dobladora tejero 1, dobladora CNC 2, zeziola 3 y dobladora YLM están por debajo del límite de exposición permisible, mientras que el resto de puestos de esta línea sobrepasan el límite permisible haciendo indispensable la aplicación de medidas tendientes a reducir la exposición a este factor de riesgo.

#### 4. CONCLUSIONES

- La presencia de ruido inherente a los trabajos realizados en la línea de tubos es alto en la mayoría de puestos de trabajo lo que hace indispensable la implementación de un programa de protección auditiva.
- El nivel de riesgo por ruido ocupacional presente en la línea de tubos es alta en el 75 % de los puestos de trabajo, existe un nivel de riesgo medio en el 19 % de los puestos de trabajo y en solo un 6 % de los puestos de trabajo existe un nivel de riesgo bajo.
- La mayoría de los puestos de trabajo de la línea de tubos requieren establecer niveles de acción y de control debido a la exposición al factor de riesgo encontrado durante el estudio.
- La existencia de un control administrativo, utilizando medidas organizativas, permite disminuir el tiempo de exposición al ruido de los trabajadores de la línea de tubos, además con el uso del equipo de protección personal se atenúa el nivel de presión sonora equivalente permitiendo precautelar la salud del trabajador. Sin embargo es necesario implementar los controles adecuados (en la fuente, en el medio de transmisión, y en el trabajador) determinados técnicamente para disminuir el nivel de presión sonora equivalente, y a posterior enfermedades ocupacionales provenientes del ruido en los procesos de la industria.
- No es suficiente medir y evaluar el ruido que existe en la línea de tubos de fabricación de escapes, es necesario contar con programas de vigilancia ambiental y de conservación auditiva que verifiquen constantemente la

efectividad de las medidas aplicadas en cuanto a la presencia de ruido ocupacional.

- Se necesita monitorear la capacidad auditiva de los trabajadores expuestos, para prevenir una posible hipoacusia laboral como resultado de la exposición a ruido durante el trabajo, con un programa de vigilancia de la salud adecuado y no solamente con exámenes audiométricos.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Cortés Díaz, J. (2007). Seguridad e Higiene en el trabajo. Madrid, España: Editorial Tébar.
- [2] Seguro General de Riesgos del Trabajo (2009), Quito, Ecuador: Editorial IESS.
- [3] Marcel-André Boillat (1998) Enciclopedia de Seguridad y Salud en el Trabajo OIT, Ginebra Suiza: Editorial Chantal Dufrense.
- [4] ISO 9612:2009. Acoustics. Guidelines for the measurement and assessment of exposure to noise in a working environment.
- [5] Fundación MAPFRE. (2003). Manual de Higiene Industrial. Madrid: MAPFRE.
- [6] Rubio Romero, C. (2004). Métodos de Evaluación de Riesgos laborales, Madrid, España: Editorial Días de Santos.
- [7] Creus Sole, A. (2012). Técnicas para la Prevención de Riesgos Laborales. Barcelona, España: Editorial Marcombo. Pgs: 528 – 539.

## 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Cristian Samuel Laverde Albarracín.- Ingeniero Automotriz en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE , Ingeniero Eléctrico en S.E.P de la Universidad Técnica de Cotopaxi. Magíster en Seguridad

y Prevención de Riesgos del Trabajo en la Universidad Técnica de Cotopaxi, Maestro en Administración de la Energía y sus Fuentes Renovables en el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Docente en la Universidad Tecnológica Equinoccial y en la Universidad Técnica Estatal de Quevedo.



<sup>2</sup>M. Alexander Peralvo Clavón Ingeniero Automotriz en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE . Magíster en Sistemas Automotrices en la Escuela Politécnica Nacional. Docente en la Universidad

Tecnológica Equinoccial.

<sup>3</sup>Marco Antonio Ramírez Idrovo. Ingeniero Industrial y de Procesos en la Universidad Tecnológica Equinoccial UTE. Magíster en Seguridad y Prevención de Riesgos del Trabajo Procesos en la Universidad

Tecnológica Equinoccial UTE, Consultor Independiente en Temas de Seguridad Laboral, Salud Ocupacional y Medio Ambiente.



<sup>4</sup>Pedro Andrés Moreno Zulca. Ingeniero Automotriz en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Maestrante de Diseño Mecánico de la Universidad Internacional SEK, Docente del Instituto

Tecnológico Superior Tecnoecuatoriano.

### REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	18 junio 2016
Fecha aceptación	5 diciembre 2016

## SISTEMA DE DIRECCIÓN ASISTIDA HIDRÁULICAMENTE A LAS CUATRO RUEDAS EN VEHÍCULOS AUTOMOTORES

### HIDRAULICALLY ASSISTED STEERING SYSTEM FOR THE FOUR WHEELS ON AUTOMOTIVE VEHICLES

Romel David Carrera Tapia <sup>1</sup>, Luis Fernando Molina Molina <sup>2</sup>, Juan Carlos Rocha Hoyos <sup>3</sup>, Víctor Danilo Zambrano León <sup>4</sup>  
<sup>1,2,4</sup> Universidad de Fuerzas Armadas ESPE - Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.  
<sup>3</sup> Universidad SEK del Ecuador  
e - mail: <sup>1</sup>rdcarrera@espe.edu.ec, <sup>2</sup>lfmolina@espe.edu.ec, <sup>3</sup>jcrocha@uisek.edu.ec, <sup>4</sup>vdzambrano@espe.edu.ec,

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 4 (15)

#### RESUMEN

La investigación tiene como objetivo disminuir el radio de giro del vehículo Volkswagen Santana, mediante la implementación del sistema de dirección asistida hidráulicamente a las ruedas posteriores, complementando la orientación de las ruedas delanteras, para proporcionar maniobrabilidad y agilidad al paso por curva en zonas concurridas u obstaculizadas, con capacidad de cambio de dirección y estabilidad, logrando que el viaje sea seguro y satisfactorio. Se implementó el sistema electrónico de reenvío de giro, que es el encargado de transmitir el par del volante de la dirección delantera, hacia un motor de pasos ubicado en la parte posterior del vehículo, al mismo tiempo que esta señal electrónica hará que las ruedas posteriores viren en sentido opuesto a las ruedas delanteras del vehículo, las señales electrónicas son proporcionadas por un PLC que recibirá información de sensores de velocidad del vehículo y giro del volante de la dirección. El motor eléctrico está acoplado con la válvula distribuidora del mecanismo de asistencia hidráulica en el eje posterior, para direccionar las ruedas posteriores.

#### Palabras clave

*Dirección asistida, vehículo automotor, PLC, estabilidad, hidráulica.*

#### ABSTRACT

The research aims to reduce the turning radius of the Volkswagen Santana vehicle, by implementing the hydraulically assisted steering system to the rear wheels, complementing the orientation of the front wheels, to provide maneuverability and agility when driving in crowded areas. Obstructed, with capacity of change of direction and stability, making the trip is safe and satisfactory. The electronic turn-over system was implemented, which is responsible for transmitting the pair of the steering wheel of the front direction, towards a stepper motor located at the rear of the vehicle, at the same time as this electronic signal will cause the rear wheels Turn in the opposite direction to the front wheels of the vehicle, the electronic signals are provided by a PLC that will receive information from vehicle speed sensors and turn the steering wheel. The electric motor is coupled with the distributor valve of the hydraulic assist mechanism for the rear axle to direct the rear wheels.

**Keywords**

*Power steering, automotive vehicle, plc, stability, hydraulic.*

**1. INTRODUCCIÓN**

En la ciudad de Latacunga existe el problema de circulación de los vehículos automotores debido a las dimensiones angostas de sus calles por ello es factible desarrollar un sistema automotriz que permita mejorar la maniobrabilidad en la conducción por las vías locales de la ciudad.

Al realizar la implementación de un sistema de dirección hidráulica integral se proporciona un vehículo que permite reducir los esfuerzos al conductor al circular por las vías de la ciudad y con esto garantizar un buen flujo de circulación por esta por medio de un control de dirección posterior realizada a un vehículo Volkswagen Santana.

El sistema de dirección a las cuatro ruedas disminuye los radios de giro de un vehículo, al paso por curva en espacios reducidos presentes en situaciones donde se requiere de precisión de la dirección y una gran destreza del conductor, es posible la capacidad para maniobrar en pequeños espacios y posibilidad de efectuar aparcamientos más sencillos.

**2. METODOLOGÍA**

**SISTEMA MECÁNICO**

Para plantear el diseño de la suspensión posterior del vehículo prototipo, se orienta hacia la fiabilidad, eficiencia y seguridad durante su funcionamiento. Estos factores son de gran importancia ya que ayudan a transmitir al conductor confianza y control, que son valores elementales para el buen desempeño del sistema.

El resultado obtenido en la carga, como se observa en la figura 1, sobre la fuerza que actúa en el eje posterior del vehículo prototipo es el valor que se ingresa en el asesor de cargas del software de simulación y que soporta la estructura del semi-chasis posterior.

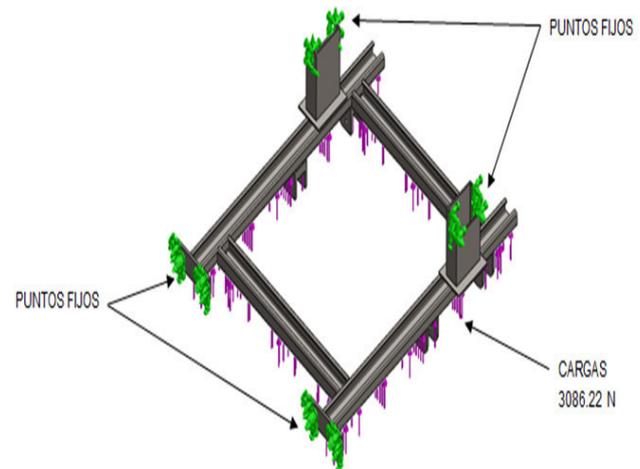


Figura 1. Cargas aplicadas a la estructura del semi-chasis posterior

En la figura 2 se observa que la fuerza aplicada es de 3086.22 Newtons distribuidas en la estructura del semi-chasis, para obtener un rendimiento óptimo se parte del diseño de la estructura para que pueda soportar las cargas a las que se va a encontrar sometida la misma. A través del software de simulación se puede conocer las características de la estructura del semi-chasis posterior diseñada y del material aplicado.

La tensión de Von Mises de la estructura en el semi-chasis posterior bajo cargas de fuerza sobre el eje posterior.

Se somete a la estructura del semichasis a estudios estáticos mediante el software solidworks.

Esfuerzo máximo: 94 Mpa.

ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO  
No. 5 Vol. 1 / 2016 (15) ISSN 1390 - 7395 (4/15)

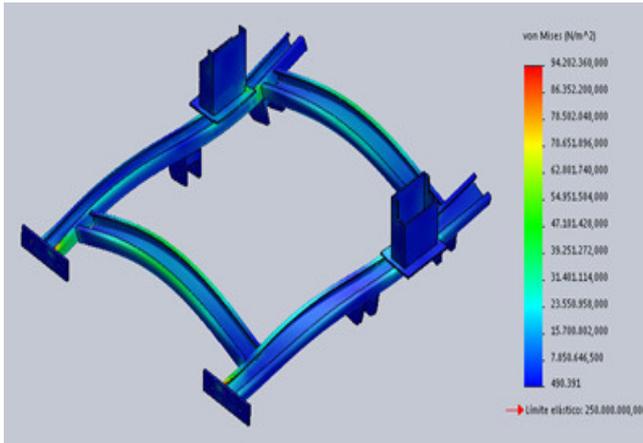


Figura 2. Tensión de Von Mises aplicada a la estructura posterior

La simulación entrega como resultado que la fuerza aplicada no supera la resistencia de fluencia del metal, concluyendo que el material es apto para su utilización. Cumple con la teoría de Von Mises, objetando la fiabilidad del material.

$$\sigma < \sigma_u$$

$$94M Pa < 250M Pa$$

Desplazamientos resultantes en el semichasis posterior

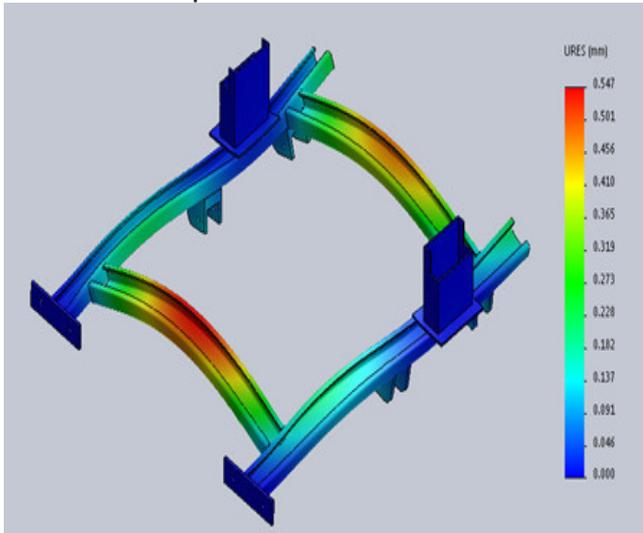


Figura 3. Desplazamientos aplicados a la estructura posterior

Sistema hidráulico circuito posterior.- Es el encargado de proporcionar la asistencia hidráulica a las ruedas del eje posterior para lograr la estabilidad del sistema.[2]

Cálculo de la bomba hidráulica de asistencia para la dirección posterior. [3]

Área del pistón del cilindro hidráulico de la dirección posterior.

$$A = r * r^2 \quad \text{Ec.1}$$

$$r = 3,5 \text{ cm}$$

Donde:

A = Área del pistón del cilindro hidráulico (cm<sup>2</sup>)

r = Radio del pistón del cilindro hidráulico. (cm)

$$A = r * (3,5 \text{ cm})^2$$

$$A = 38,48 \text{ cm}^2 = 5,96 \text{ in}^2$$

Fuerza generada por la bomba del circuito posterior.

Datos:

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{Ec.2}$$

Donde:

P = Presión. (lbf/in<sup>2</sup>)

A = Área del pistón (in<sup>2</sup>)

Presión de la bomba = 75 bar = 1080,4 psi

Díámetro = 7cm

Para conocer la fuerza se despeja de la ecuación 2, entonces:

$$F = P * A$$

$$F = 1080,4 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} * 5,96 \text{ in}^2$$

$$F = 6444,706 \text{ lbf}$$

Expresada la fuerza en Newtons se tiene:

$$F = 28771,01N$$

Esta fuerza es la que provee el mecanismo de asistencia hidráulica al sistema de dirección del vehículo, la cual es la necesaria para vencer la carga del eje posterior.

Ya que :

$$F_{\text{mecanismo de dirección}} = 28771,01N \approx 308622N$$

Es así que se debe disponer de una bomba con las características indicadas en la tabla 1:

Tabla 1 Características bomba de presión para dirección posterior.

Características	Valores
Presión de la bomba	75 Bar (1080.4Psi)
Caudal	2.4 Gpm
Revoluciones de la bomba	1700 Rpm

Mecanismo de dirección hidráulica de piñón y cremallera.

La fuerza que proporciona este mecanismo al varillaje de la dirección, es igual a la presión que provee la bomba hidráulica por el área de la sección transversal de su pistón hidráulico

$$F = P \cdot A$$

$$F = 1080,4 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \cdot 5,96 \text{ in}^2$$

$$F = 6444,706 \text{ lbf}$$

$$F = 28771,01 \text{ N}$$

Cálculo de las mangueras hidráulicas, los datos sugeridos para evitar la turbulencia en el flujo y pérdidas de presión [2]

$$v = 4,5 \text{ m/s}$$

Transformación de GPM a m<sup>3</sup>/s

$$Q = 2,4 \text{ GPM} (6,309 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}) / (1 \text{ GPM})$$

$$Q = 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = \frac{r \cdot D^2}{4} \tag{Ec.3}$$

Donde:

D = Diámetro de tubería. (m)

A= Área de sección. (m<sup>2</sup>)

$$Q = A \cdot v \tag{Ec.4}$$

Donde:

Q = Caudal. (m<sup>3</sup>/s)

A= Área de sección. (m<sup>2</sup>)

v = Velocidad sugerida (m/s)

Reemplazando se obtiene:

$$Q = v \frac{r \cdot D^2}{4} \tag{Ec.5}$$

Despejando el diámetro:

$$D_i = \sqrt{4 \cdot Q / r \cdot v}$$

$$D_i = \sqrt{(4 \cdot 1,51 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}) / (r \cdot 4,5 \text{ m/s})}$$

$$D_i = 6,54 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Conversión del diámetro a pulgadas

$$D_i = 6,54 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot (1 \text{ in} / 0,0254 \text{ m})$$

$$D_i = 0,25 \text{ in} \cdot 1/4$$

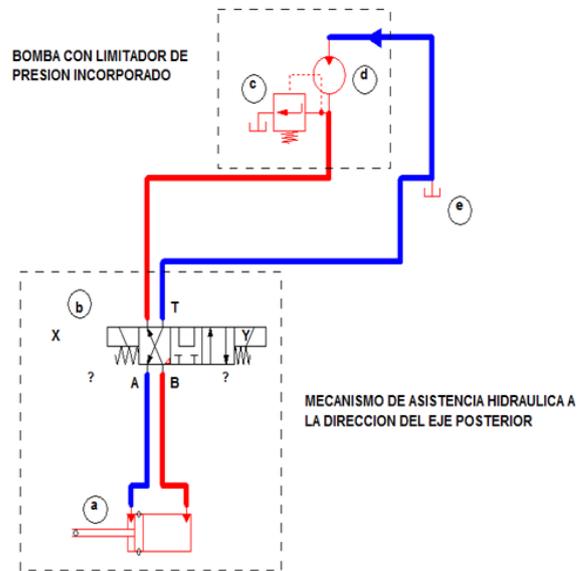


Figura 4. Circuito hidráulico posterior en recirculación

### SISTEMA ELECTRÓNICO PLC XINJE

Por su compatibilidad y bajo costo, sin dejar a un lado las prestaciones y beneficios que proporciona, es un dispositivo electrónico digital con una memoria programable para guardar instrucciones y llevar a cabo funciones lógicas[3] de configuración, secuencia, sincronización, conteo y funciones aritméticas, necesarias para el control de los actuadores instalados en el prototipo, figura 5.

ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO  
No. 5 Vol. 1 / 2016 (15) ISSN 1390 - 7395 (4/15)



Figura 5. PLC Xinje



Figura 7. Sensor magnético para velocidad del vehículo.

### **SENSOR DEL VOLANTE DE LA DIRECCIÓN**

Cumple la función de sensar el ángulo del volante de la dirección. Por esta razón se recurre a la selección de un encoder incremental bidireccional que tiene dos canales de salida A y B, que permiten detectar el sentido de rotación del eje, el canal B está desfasado en 90° eléctricos respecto al canal A, figura 6.



Figura 6. Sensor del Volante

### **SENSOR DE VELOCIDAD**

Se encarga de sensar la velocidad de circulación del vehículo, la información es necesaria para la desactivación del sistema de asistencia a la dirección posterior, es decir, que al llegar a una velocidad de 60 Km/h el sensor informa al PLC y este desactiva el funcionamiento del motor a pasos, figura 7.

### **ELEMENTOS MECÁNICOS EN EL EJE POSTERIOR.**

La suspensión posterior de este tipo independiente figura 8, permite un acople seguro en el sistema implementado, las medidas de los elementos corresponden a las deseadas para la adaptación; por la parte superior de la suspensión se acopla con el chasis de tal manera que no se hizo ningún tipo de ajuste y en la parte inferior de la misma se procede a la sujeción por medio de una mesa que va anclada al nuevo semi-chasis [4].



Figura 8. Semi - chasis posterior

De esta forma se finaliza la construcción y adaptación de la estructura del semi-chasis posterior y los elementos del sistema de suspensión en el vehículo prototipo, figuras 8 y 9.



Figura 9. Instalación de cañerías de fluido

Se adapta en el eje posterior el mecanismo de dirección hidráulica de piñón y cremallera que esta fijado al semi-chasis, a través de dos bases que se soldaron al mismo, sujetándolo firmemente evitando cualquier tipo de vibración[5].



Figura 10. Cilindro de dirección

En la figura 10 se presenta la forma en que se sujeta el actuador que acciona el sistema de dirección posterior sujeto al semi-chasis. [6]

El actuador está localizado en la parte posterior del vehículo en la cajuela, de forma que coincide verticalmente con la válvula rotativa del mecanismo de dirección hidráulica de las ruedas posteriores.



Figura 11. Fijación del actuador de la dirección posterior

El sensor de ángulo del volante ubicado sobre el eje de la columna de la dirección,

que en este caso es un tubo de hierro de 1/2 pulgada, se instala un engranaje que esta acoplado con otro ubicado en el encoder, el cual envia la señal eléctrica de posición del volante, es decir, hace la función de sensor de ángulo de giro para el control del actuador, figura 12.



Figura 12. Sensor de ángulo

Para el montaje del sensor inductivo se realizó una base pequeña para ubicar al contacto magnético fijo, el mismo que envia la señal mediante cables.

Se alinea entre el contacto fijo y el móvil para tener una buena señal. La holgura de separación entre contactos magnéticos es 10 mm para un perfecto funcionamiento del sensor, se ajusta las abrazaderas de plástico, se corta los pedazos sobrantes, se procede a realizar las conexiones respectivas, figura 13.



Figura 13. Ubicación del sensor de giro.

Una vez implementado en el vehículo Volkswagen Santana el sistema de dirección en el eje posterior se aprecia en la figura 14 la disposición del mismo a las cuatro ruedas.

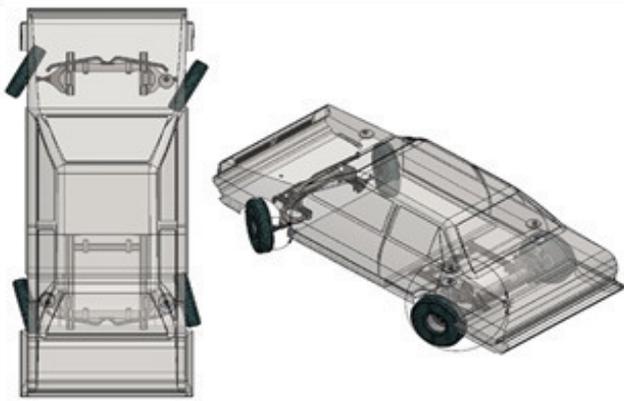


Figura 14. Vehículo prototipo implementado con el sistema de dirección a las cuatro ruedas.

### 3. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

Se presenta la geometría de giro implementada en el vehículo prototipo, figura 15 en la cual se aprecia la reducción del radio de giro, también la generación de viraje de las ruedas posteriores, sus ángulos opuestos a los ángulos de viraje de la dirección delantera, así como también las longitudes recorridas por las ruedas del vehículo durante la curva.

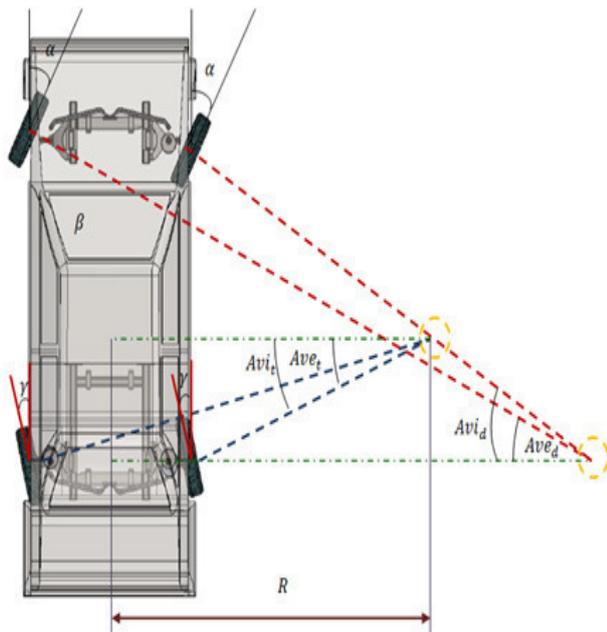


Figura 15. Geometría del sistema de dirección a las cuatro ruedas

El sistema de dirección posterior[6] fue evaluado en varias pruebas, entre ellas la prueba de parqueo como se ilustra en la figura 16.



Figura 16. Parqueo con el sistema de dirección a las cuatro ruedas.

De la misma forma se realiza pruebas [8] en las calles de la ciudad de Latacunga observando el óptimo rendimiento del sistema de dirección posterior especialmente en las curvas cerradas de las vías angostas, figura 17.



Figura 17. Curva con el sistema de dirección a las cuatro ruedas

En la tabla 2 y 3 se aprecia los valores obtenidos al efectuar las pruebas de conducción activado y desactivado el sistema de dirección a las ruedas posteriores del vehículo prototipo, con réplicas realizadas por 3 veces en las diferentes curvas expresadas.

Tabla 2. Pruebas realizadas sin la dirección de las ruedas posteriores

Curvas	ÁNGULO DE GIRO DEL VOLANTE DE LA DIRECCIÓN			Promedio (°)
	Prueba 1 (°)	Prueba 2 (°)	Prueba 3 (°)	
C1	535	546	539	540
C13	320	318	308	315
C14	627	629	634	630

Tabla 3. Pruebas realizadas activadas el 4ws

Tipo dirección	Diámetro de giro del vehículo prototipo		
	Dimensión	Reducción	% Reducción
2WS	11115 mm	2350mm	2114%
4WS	8800 mm		

En la tabla 4 se evidencia los resultados obtenidos en cada prueba con el sistema 4ws activado y desactivado, que proporciona los resultados deseados dejando ver la fiabilidad y eficiencia de la investigación, en cuanto a la reducción el radio de giro se disminuye en un 21% sobrepasando las expectativas y logrando así el objetivo deseado. [9]

Tabla 4. Reducción del diámetro de giro

Curvas	ÁNGULO DE GIRO DEL VOLANTE DE LA DIRECCIÓN			Promedio (°)
	Prueba 1 (°)	Prueba 2 (°)	Prueba 3 (°)	
C1	395	408	398	400
C13	248.5	249.5	252	250
C14	455	450	445	450

#### 4. CONCLUSIONES

- Se implementó el sistema de dirección asistida hidráulicamente a las ruedas posteriores de un vehículo automotor, para lograr reducir el radio de giro del vehículo, proporcionar mayor maniobrabilidad por falta de espacio.
- Se optimizó el sistema de dirección del vehículo prototipo en diferentes

situaciones y condiciones de conducción, mediante la reducción del radio de giro, en 21% lograda gracias al viraje de las ruedas posteriores en sentido contrario y en relación transmisión de viraje de 2:1 con respecto a las ruedas delanteras, para obtener mejor maniobrabilidad, agilidad, precisión y seguridad.

- Se obtiene un gran porcentaje de reducción en cuanto al giro del volante de la dirección, llegando a disminuir en un 26% al realizar un viraje en una curva angosta, un 21% en una curva normal, y un 29% al realizar un giro en U a 180°, que es el resultado de la aplicación del sistema de dirección en el eje posterior en sentido opuesto al viraje de las ruedas delanteras.
- Como mayor aporte del sistema de dirección posterior, se tiene que el diámetro de giro del vehículo se reduce en 21%, pasando de 11,15 m a 8,80 m, conseguido gracias a la configuración de viraje opuesto de las ruedas posteriores con relación a las ruedas delanteras, esto significa que entre mayor es el ángulo de viraje de las ruedas posteriores, menor es el diámetro de giro del vehículo.
- Se consiguió incorporar en el sistema electrónico que permita controlar el funcionamiento del sistema de dirección a las ruedas posteriores, dependiendo de los requerimientos del usuario: la velocidad de desactivación del sistema es de 60 Km/h.

## 5. REFERENCIAS

- [1] Cengel, Y. & Cimbala J. (2011). Mecánica de Fluidos. México : Mc Graw Hill.
- [2] Creus, N. E. (2011). Hidráulica. México: Alfaomega.
- [3] H. Kindler & M. Kynast (2005). Cálculos técnicos para el automóvil. México: Reverte
- [4] Mott, R. L. (2006). Mecánica de Fluidos. México: Pearson Education.
- [5] Mott, R. L. (2007). Diseño de elementos de máquinas. México: Pearson Education.
- [6] Mott, R. L. (2006). Resistencia de Materiales. México: Pearson Education
- [7] Selección y aplicación de motores eléctricos WEG (13 de Julio de 2014) obtenido de : <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-selección-y-aplicación-de-motores-electricos-articulo-tecnico-espanol.pdf>
- [8] Sistema de dirección a las 4 ruedas (25 de Julio de 2014) obtenido de : <http://www.aficionadosalamecanica.net/4ws-dirección-4-ruedas.htm>
- [9] Cuatro ruedas directrices. (04 de agosto de 2014) obtenido de: <http://cuatro-ruedas.blogspot.com/2011/07/4-ruedas-directrices.html>

## 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Romel Carrera Tapia nació en Latacunga Ecuador, es Ingeniero Automotriz, Docente Tiempo Completo, de la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE – Latacunga



<sup>2</sup>Luis Molina, nació en Latacunga Ecuador, es Ingeniero Automotriz, Docente Tiempo Completo, de la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE –

Latacunga.



<sup>3</sup>Juan Carlos Rocha, nació en, Quito Ecuador, es Ingeniero Automotriz, dispone Posgrado en Sistemas Automotrices, Autotrónica, Docencia Universitaria, Docente en la Universidad Internacional SEK. Imparte servicios de asesoramiento y capacitación en mecánica automotriz.



<sup>4</sup>Danilo Zambrano León Nació en la ciudad de Quito, Ecuador. Ingeniero Automotriz, Magíster Sistemas Automotrices, Magíster en Gestión de la Producción, Diplomado en Autotrónica, Docente tiempo completo en la

Universidad de Fuerzas Armadas ESPE –  
Latacunga.

---

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

---

Fecha recepción            27 junio 2016

---

Fecha aceptación        12 diciembre 2016

---



## PROPUESTA DE CONTROL EFICIENTE DEL AIRE DE COMBUSTIÓN EN UNA PLANTA DE HORNO DE REDUCCIÓN

## PROPOSAL THE EFFICIENT CONTROL OF COMBUSTION AIR IN THE PLANT OF REDUCTION FURNER

Enrique Santana López<sup>1</sup>, Secundino Marrero Ramírez<sup>2</sup>, Orlando Vega Arias<sup>3</sup>, Iliana A. González Palau<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Camagüey, Cuba- Dpto. de Ing. Eléctrica, Circunvalación Norte Km 5 ½, Camagüey, Cuba

<sup>2,4</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi, Dpto. de Ing. Eléctrica, Av. Simón Rodríguez s/n Barrio El Ejido Sector San Felipe

<sup>3</sup> Departamento de Mantenimiento, Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, Moa. Holguín

e-mail: <sup>1</sup>enrique.santana@reduc.edu.cu, <sup>2</sup>secundino.marrero@utc.edu.ec, <sup>3</sup>ovega@ecg.moa.minem.cu,

<sup>4</sup>iliana.gonzalez@utc.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 5 (15)

### RESUMEN

El trabajo analiza la ineficiencia del control manual en el sistema de aire de combustión utilizado en los hornos de una planta de reducción de níquel a través de la estrangulación de un dámper y el uso de válvulas manipuladas por el operador, donde los ventiladores del sistema de suministro de aire, trabajan a plena capacidad todo el tiempo, lo que produce un gasto innecesario de energía eléctrica. Por otra parte, la demanda es variable y difícil de programar, por ello se propone una alternativa que consiste en controlar el accionamiento de los ventiladores a través de variadores de velocidad y diseñar un lazo de control que permita establecer la demanda de aire a partir de una medición indirecta del flujo, usando la presión como variable controlada. Se analiza la factibilidad de la inversión a partir de ahorro de energía eléctrica.

### Palabras clave

Aire, ventiladores, control, combustión, algoritmo.

### ABSTRACT

The inefficiency of the current combustion air control system, that uses this Plant for the reduction of Nickel, is demonstrated. It is manual; the unnecessary air is strangled through valves that are manipulated by the worker, while the fans work to full capacity the whole time, producing unnecessary electric power consumption. On the other hand, the demand is variable and difficult of programming. An alternative is proposed that consists on to control the working of the fans through motor speed controllers and to design and to implement an algorithm that allows to establishing the demand of air using an indirect mensuration of the flow and the pressure like output variable. The feasibility of the investment is analyzed.

### Keywords

Air, fans, control, combustion, algorithm

### 1. INTRODUCCIÓN

En las plantas productoras de níquel con tecnología carbonato amoniacal, la sección de hornos de reducción permite la liberación de los óxidos presentes en el mineral laterítico alimentado, que luego de ser reducido, continúa

el proceso tecnológico en la planta de lixiviación amoniaca. En el caso particular de la empresa estudiada, se cuenta con un total de 24 hornos agrupados en tres losas de 8 hornos cada una, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores.

El proceso de reducción se efectúa en hornos de hogares múltiples tipo PM 17 K-6, 8, de 23,5 m de alto y 6,8 m de diámetro, con 17 hogares o soleras.

Para alcanzar el perfil de temperatura requerido y lograr una atmósfera reductora, existen 10 cámaras de combustión en cada horno, donde se quema el petróleo con un nivel de aireación del 60% para lograr una combustión incompleta y garantizar la presencia de una atmósfera reductora (compuesta por CO e H<sub>2</sub>) con los niveles requeridos del perfil de temperatura a todo lo largo del horno en los diferentes hogares pares.

El aire de combustión es generado en cada una de las tres losas por una batería de 3 ventiladores centrífugos accionados por motores de 220 kW cada uno (de los cuales siempre trabajan dos y uno está de reserva) y entregan el aire a las cámaras a través de un ducto colector.

Se analiza el sistema actual de regulación del flujo de aire en función de los niveles de demanda que presentan las cámaras, donde la tecnología de control actual establece el flujo de aire con la regulación del caudal a partir de un dämpner (válvula electrohidráulica), que de forma manual se utiliza para fijar la presión en el colector principal

El problema abordado en la investigación se relaciona con la ineficiencia en el uso de la energía eléctrica asociada a los motores asincrónicos que están acoplados a los ventiladores centrífugos,

debido al empleo del dämpner y el estrangulamiento del flujo de aire para establecer el caudal requerido en el sistema, accionado manualmente, lo que regularmente requiere el empleo de un ventilador a toda capacidad y un segundo ventilador con un flujo variable, debido a que no siempre están trabajando todos los hornos, ni todas las cámaras, esto pone de manifiesto que la demanda es variable y resulta difícil de programarla con antelación. [1]

La regulación de las prestaciones de los ventiladores en la actualidad se realiza mediante los siguientes sistemas:

- Regulación por compuertas.
- Regulación por By-Pas.
- Regulación de velocidad.
- Variación del ángulo de los álabes.

Escoger uno u otro de estos sistemas depende de un conjunto de criterios relacionados con la zona de regulación, el ahorro energético, coste de la inversión, y ruido entre otros.

La tabla 1, presenta los tipos de regulación más usados y las zonas de trabajo recomendadas para cada uno de los sistemas mencionados [3]. Como se puede observar, existen tres tipos de regulaciones aplicables al ventilador centrífugo, destacándose la regulación de velocidad que posee la ventaja de permitir una mayor zona de regulación. Esto hace que el uso de variadores de velocidad sea una de las vías más utilizadas en la actualidad para obtener un mayor rango de regulación y reducir de forma considerable el consumo de energía en los accionamientos de las turbomáquinas.

Tabla 1. Comparación de los tipos de ventiladores.

Ventilador	Sistema de regulación	Zona de regulación posible %				Zona recomendada %	
		de	a	de	a	de	a
Centrífugo y helicoidal	Compuerta	100	70	100	90		
	BY-PAS	100	0	100	80		
	Regulación de velocidad	100	20	100	20		
Helicoidal	Ángulo de álabes	100	0	100	0		

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### Control del flujo de aire a través de la regulación de velocidad en el ventilador.

Si se realiza una comparación entre la regulación del flujo de aire por dâmpers y la regulación de flujo por medio de variadores, se pueden obtener las curvas mostradas en las figuras 1 y 2, donde se puede deducir que el control con variadores de velocidad es más factible que las compuertas dâmpers ya permite una regulación más eficiente al lograr una mejor utilización de la potencia de entrada como lo muestra la función exponencial con relación al flujo de la figura 2. [2]

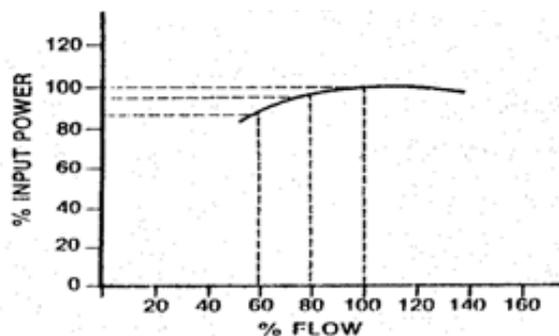


Figura 1. Requerimiento de potencia utilizando dâmpers.

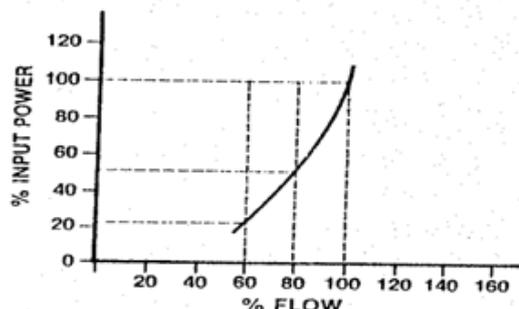


Figura 2. Requerimiento de la potencia utilizando variador de velocidad.

En [1] y [3] se plantea la regulación de la velocidad en los ventiladores centrífugos con variadores de velocidad, proponiéndose utilizar un sensor de presión para controlar el aire que llega a la red sin definir el intervalo posible de trabajo de esta variable, ni los puntos de medición en la red para sintonizar el variador y establecer el flujo según la demanda del sistema, que como se afirma anteriormente, no permanece constante en la red que presenta un conjunto de ramales y válvulas para alimentar las diferentes cámaras de combustión de los hornos de una losa. [1]

El objetivo del presente trabajo es evaluar un sistema de control para regular de forma eficiente el flujo de aire generado por los ventiladores en la planta y demostrar que, entre las alternativas factibles antes mencionadas, el uso de variadores de velocidad para el accionamiento, trae consigo un conjunto de ventajas tales como: flexibilidad en el manejo, facilidad de mantenimiento y ahorro en consumo de energía, por lo que su empleo produce un notable incremento de la eficiencia energética y reduce costos del sistema de suministro de aire.

Además, se defiende la hipótesis que el diseño de un sistema de control para el accionamiento, con el uso de variadores de velocidad acoplados

a los ventiladores permitirá en una segunda etapa, incorporar un algoritmo inteligente, que pueda establecer la demanda a través de la medición del flujo de aire, el número de cámaras en funcionamiento y la presión para así optimizar el consumo de energía y asegurar el aire demandado en cada momento.

Para evaluar la factibilidad del control de velocidad y el algoritmo de regulación del flujo de aire se procederá a utilizar la modelación y simulación en MATLAB. 2016.

### 3. ESTUDIO DE CASO

La instalación a evaluar tiene el control de los ventiladores a través de la regulación manual por compuertas (dámper) a la entrada. Estas compuertas hacen que el aire, se mueva en más de una dirección, creando unos remolinos que no siempre se mueven en la misma dirección de los álabes del ventilador y esto influye en el funcionamiento eficiente del conjunto compuerta-ventilador.

En el sistema de aire de combustión de la planta se encuentran 9 motores asincrónicos trifásicos de inducción de rotor bobinado con las características mostradas en la tabla 2.

Tabla 2. Características de los motores.

Datos de los motores en los ventiladores					
Tipo de motor	Pn; [kW]	Un [V]	In [A]	N r.p.m	F.P
3AFP315M-4	359	220	440	1775	0.87

Los ventiladores centrífugos poseen como principales parámetros: la velocidad de rotación, el diámetro de la hélice o rodete, las presiones totales estática y dinámica, el caudal, la densidad del gas, la potencia absorbida, el rendimiento y el nivel sonoro. En general estas turbomáquinas son

capaces de manejar presiones altas con caudales más bien bajos. En la figura 3 se observa una curva característica de un ventilador centrífugo y se observa como la suma de la presión estática ( $P_o$ ) y dinámica ( $P_d$ ) define la presión total del sistema ( $P_t$ ).

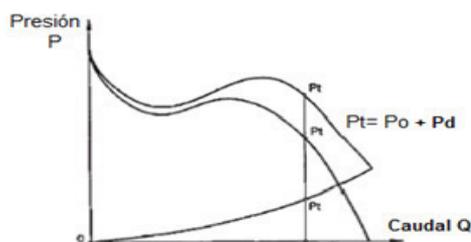


Figura 3. Curvas características de un ventilador

Para trazar la curva característica de un ventilador y disponer de los distintos caudales que él puede manejar, se ensaya el mismo variando la carga desde el caudal máximo al caudal cero. Todos los pares de valores obtenidos caudal-presión se llevan a unos ejes de coordenadas, obteniéndose la curva característica. La figura 4 representa una curva típica donde se muestran gráficamente las presiones estáticas, que representan las pérdidas de carga totales, dinámicas y también se observa una curva de rendimiento mecánico [3]. La característica de un ventilador indica su capacidad en función de la presión que se le exige.

Tomando como referencia la figura 4, la zona de trabajo idónea de un ventilador es el tramo A-B de su característica. Entre B y C su funcionamiento es inestable, el rendimiento desciende de forma rápida y aumenta notablemente el ruido; por ello en muchos catálogos se representa sólo el tramo eficaz de funcionamiento obviando el tramo hasta la presión máxima.

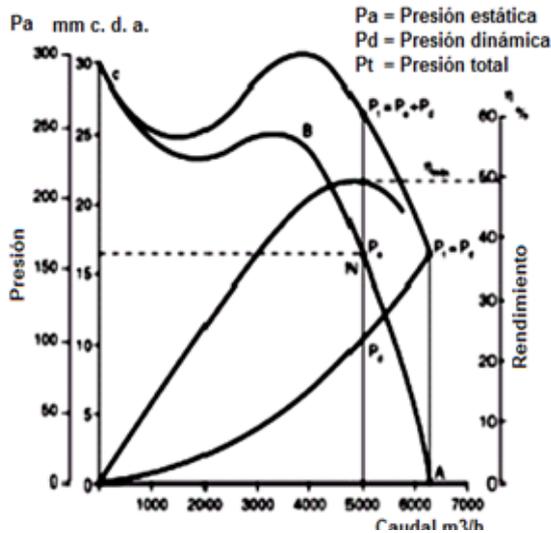


Figura 4. Representación de las presiones estáticas

Para definir el punto de trabajo del ventilador es necesario tener la característica de red de tuberías y seleccionar el valor de la presión del flujo requerido para poder fijar el punto de trabajo del sistema. En la figura 5 se muestra la red del sistema de tuberías de la planta de horno en estudio, las cuales presentan diferentes diámetros por secciones, lo que resulta necesario para evitar caídas de presión, por otro lado, en la tabla 3 se muestran los datos geométricos de las mismas.

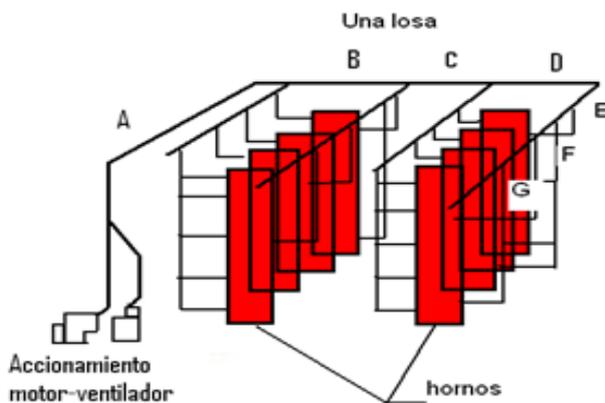


Figura 5. Diagrama de tuberías con diferencias de diámetro en una losa de 8 hornos.

Tabla 3. Datos geométricos de las tuberías

Tipo de sección	Diámetro (m)	Longitud (m)
A	1.22	36.20
B	1.02	11.40
C	0.820	370
D	0.63	41.40
E	0.53	3.48
F	0.426	18.70
G	0.325	294.00
TOTAL		405.88

**Análisis de factibilidad del uso de variador de velocidad.**

Si se dispone de la característica resistente del sistema, se puede encontrar el punto de trabajo de un ventilador acoplado al mismo, al superponer las curvas características del ventilador y la resistencia del conducto. [4].

Para construir la característica resistente del sistema se debe partir del hecho que, en las instalaciones de ventilación, la pérdida de carga que se origina, varía proporcionalmente al cuadrado del caudal que fluye a través de la canalización. Entonces para conocer el punto de funcionamiento de un ventilador es indispensable disponer de las curvas características del ventilador. [5], [6].

Para definir el flujo de aire del ventilador estudiado en relación al punto de trabajo teórico recomendado, se analizaron las mediciones realizadas por [6] en el colector principal para los casos en que trabajan 3 y 2 ventiladores con diferentes combinaciones de estos en una losa sin variar el estado de las válvulas de la red. Un resumen de los resultados obtenidos en las mediciones es mostrado en la tabla 4, donde se observa que los valores de presión se encuentran entre 11 y 13 kPa. [1].

También se realizó mediciones en otros puntos de la red para determinar las presiones de trabajo y poder establecer la relación entre presión y flujo de aire del sistema que permite el buen funcionamiento de las cámaras de combustión, acorde con el balance de oxígeno requerido en los quemadores de combustión incompleta. Para registrar las caídas de presión se utilizó un medidor de presión diferencial de la firma SIEMENS, modelo SITRANS con lectura digital y rango de medición de 1 - 2,56 mbar, los resultados de las mediciones realizadas en 5 tramos de la red son mostrados en la tabla 4 .

Tabla 4. Valores de velocidad obtenidos 5 tramos de diferentes transiciones de la red

		Valores de velocidad obtenidos en las diferentes transiciones de la red (m/s)				
P(kPa)	Q ( m3/s)	Tubo	Tubo	Tubo	Tubo	Tubo
		1	2	3	4	5
		[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
		v1	v2	v3	v4	v5
Tres ventiladores funcionando acoplados en paralelo	14,47					
		24,23	17,88	17,88	24,23	17,33
	28,31					
Dos ventiladores funcionando acoplados en paralelo	12,06					
		19,38	14,31	14,31	19,38	13,86
	22,65					

La desviación del valor nominal de trabajo de la red se presenta debido a la regulación del dámper en relación a la cantidad de hornos trabajando en el

sistema, el flujo de mineral y el ajuste de la relación aire combustible en los quemadores, también esto se relaciona con la cantidad promedio de cámaras que trabajan en una losa, que puede oscilar entre 70 y 80 como máximo, cuando trabajan todas las cámaras en los hornos

Tabla 5. Mediciones de presión en la salida del ducto colector.

Prueba No	Presión en el colector principal (Kpa)	Cantidad de ventiladores trabajando en la losa # 2
1	13,45	3
2	13,65	3
3	13,54	3
4	11,5	2
5	11,52	2
6	11,36	2
7	11,75	2
8	11,8	2

Para el análisis del punto de trabajo se consideraron las curvas obtenidas por la firma PRIOR durante la instalación del sistema, donde se realizó pruebas del sistema con la operación de uno a tres ventiladores para realizar los ajustes de la red y establecer los parámetros de trabajo asociados con la presión en los diferentes puntos del sistema la red y el caudal de aire necesario, estas curvas son mostradas en la figura 6. Como resultado del trabajo [6] se obtuvo experimentalmente la relación lineal existente entre el flujo de aire y la potencia que se observa.

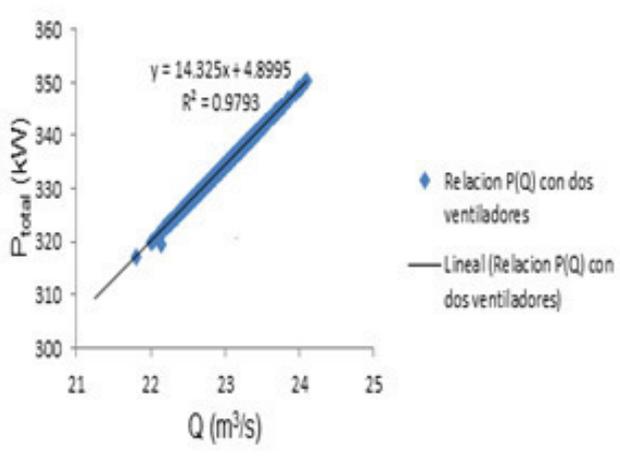


Figura 7. Relación (Ptotal) y (Q) para dos ventiladores

A partir de las mediciones del consumo de energía de los ventiladores que registra el sistema de supervisión de la planta y considerando para los cálculos de las pérdidas de energía, el valor promedio de la potencia del ventilador requerida que oscila entre 165 kW y 170 kW en su régimen de trabajo continuo, entonces la cantidad de energía promedio desperdiciada diaria para el caso del ejemplo de un ventilador (en la figura 8) puede ser reducida en aproximadamente 960 kWh. Con esta valoración se concluye la viabilidad del uso del variador si se considera que el costo del kWh en la empresa es de 0,15 USD y que los dos ventiladores trabajan 24 horas de forma continua todo el año.

También se debe señalar que las reservas de energía son aún mayores, si además de sustituir el dämpen se optimiza el flujo requerido por el sistema, diseñando e implementando un algoritmo que permita establecer la demanda de aire a partir de una medición directa o indirecta del flujo, usando la presión como variable de salida. Esto conllevaría a una reducción mayor de la potencia entregada por el variador. [8], [9]

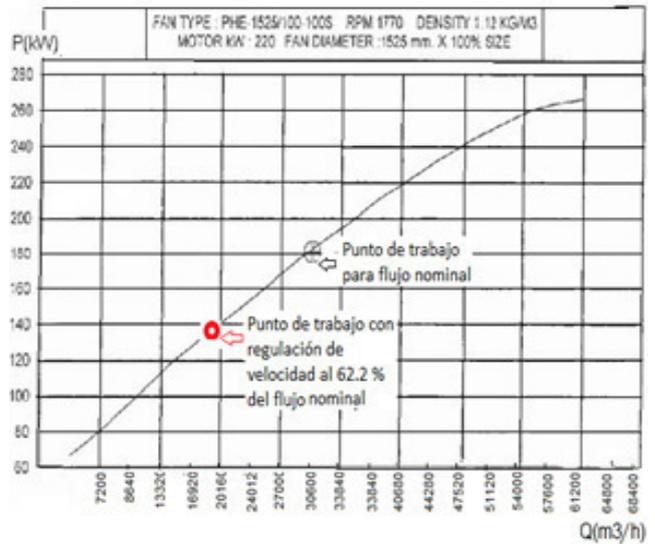


Figura 8. Curva del punto de trabajo para determinar potencia de entrada con relación al flujo

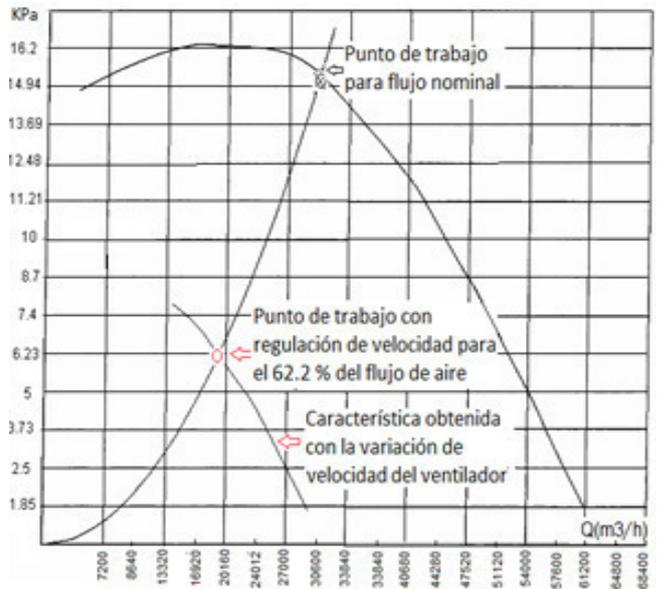


Figura 9. Curva del punto de trabajo del sistema red- ventilador

Para evaluar la viabilidad del control automático se realizó una simulación en MATLAB con el esquema mostrado en la figura 10, donde el ajuste de la velocidad requerida se realiza mediante un variador con un regulador PI para establecer las diferentes demandas de flujo de aire, que se determinaron a través de los modelos obtenidos de las curvas red – ventilador y potencia - flujo de aire del sistema mostradas en las figuras 8 y 9. En la selección del algoritmo de control se consideran los

estudios realizados por [6], [9] donde se determina la característica del sistema red – ventilador para fijar el punto de trabajo y se compara la efectividad en el uso de diferentes algoritmos de regulación para controlar un ventilador centrífugo con variador de velocidad, aquí se demuestra la efectividad de la regulación PI y PID. Utilizando la relación presión – flujo se determinaron diferentes velocidades para la tarea del sistema de control simulado de la figura 10.

Para la simulación también se asume un torque constante de 900 rad/s a partir de 0,5 segundos, donde la velocidad angular comienza en 500 r.p.m, para variar en los instantes 1, 3, 4 y 7 segundos en los valores de 600, 700, 400 y 900 r.p.m respectivamente. Estos resultados son mostrados en la figura 11, mientras que el comportamiento de la potencia y el flujo de aire se observan en la figura 12, que refleja cómo se puede reducir la potencia de entrada en función de la velocidad requerida para establecer el flujo necesario. [10], [12], [13].

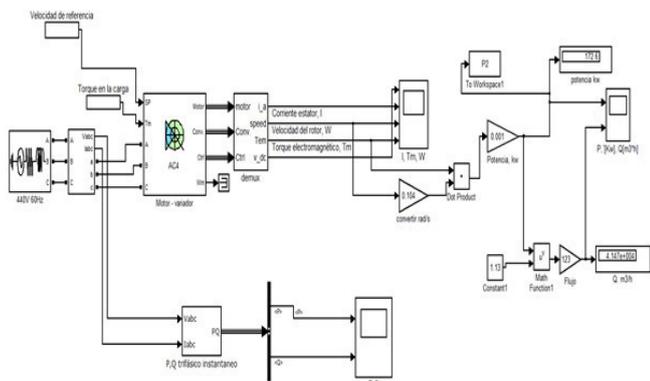


Figura 10. Esquema de simulación del accionamiento motor – ventilador con un control de velocidad P I



Figura 11. Variaciones de la velocidad y torque en el sistema.

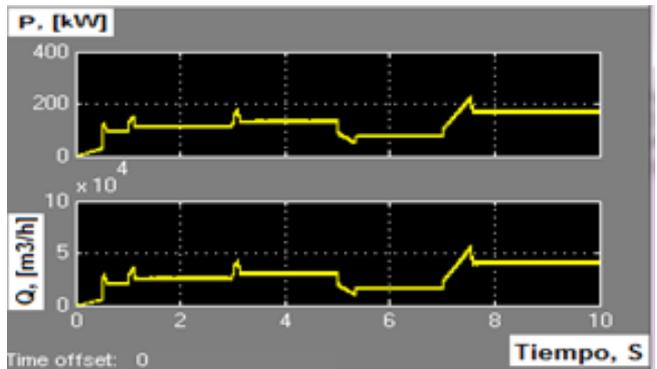


Figura 12. Variaciones de potencia y flujo de aire para los valores de velocidad establecidas por el variador.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar la reserva de energía existente con relación al punto de trabajo del sistema ventilador – red de suministro de aire en presencia del variador de velocidad, se confirman los resultados ya obtenidos por [12], [14] en un banco de prueba experimental. En relación al tipo de control, se pudo comprobar en la simulación que con la incorporación del lazo de regulación PI es posible estabilizar el flujo de aire en función de la demanda, considerando como variable de control la presión a la salida del ducto colector y esto es posible por la relación existente entre estos parámetros siempre y cuando no varié el estado de la válvulas y accesorios de red que conllevarían a una variación de la curva de resistencia de la red. Entonces al poder fijar los valores de

velocidad del ventilador en función de la demanda de flujo del aire, se podrá incrementar la eficiencia energética de este sistema.

El lazo de control puede suplir las dificultades del control manual, al poder variar on line la velocidad requerida y esto representa sin dudas una reserva más que existe en este sistema, producto del comportamiento variable de la demanda de aire.

## 5. CONCLUSIONES

- El control de flujo de aire actual en los ventiladores con dámper presenta reservas de energía en valores superiores al 22% del consumo actual en comparaci3n con el uso de un variador de velocidad para regular el flujo de aire.
- El régimen de trabajo de la planta tiene una dinámica variable en cuanto al funcionamiento de las cámaras de combusti3n y los hornos, que en ocasiones trabajan con diferentes productividades. Esto justifica la necesidad de implementar un control automático para establecer el flujo de aire requerido en cada momento y así hacer un uso racional de la energía consumida por el accionamiento en el sistema de aire de combusti3n.
- Es posible alcanzar en un ventilador un ahorro diario del 22,2 % del consumo nominal por concepto del cambio de regulaci3n. Estas reservas en la planta son superiores si tenemos en cuenta que en la misma existen 6 ventiladores que trabajan en régimen continuo.
- El uso de un controlador PI es factible para regular el flujo de aire en funci3n de la presi3n existente en el ducto colector a la salida de los ventiladores.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Santana L3pez Enrique, Marrero Ramírez Secundino, "Control del flujo de aire de combusti3n en hornos de reducci3n", en: memorias de la
- [2] Conferencia Internacional CYTDES 2013 "Ciencia y Tecnología por un desarrollo sostenible", Universidad de Camagüey, 3 a 5 de junio 2013, ISBN 972-959-16-1380-6.
- [3] Vedernikov M. I. Rudoy I.V. Manutenci3n de las instalaciones para transportar fluidos químicos. Puig Torres José(trad.), URSS: Ed. MIR, Moscú, 1967. 443p. ISBN UDC 621.51.004.3-542.77.004.5.
- [4] Salvador Escoda S.A. Manual Práctico de Ventilaci3n (2da Edici3n). Provenca, 392 pl.1y2 08025 Barcelona, España, 2009. Disponible: [www.salvadorescoda.com](http://www.salvadorescoda.com).
- [5] Nicotra Gebhardt S.p.A, ABN: 61 002 883 623. Fan/tastic solutions: Ventiladores Centrífugos, Waldenburg, Alemania. Edici3n 1, 2010. Disponible: [www.nicotra-gebhard.com](http://www.nicotra-gebhard.com).
- [4] Prior Industries Australia PTY LTD, ABN: 61 002 883 623. Energy solutions: Curves PDF, Sydney, Australia. ISO 9001, 2008. Disponible: [www.priorindustries.com](http://www.priorindustries.com).
- [6] Vega A. O. Evaluaci3n de los parámetros operacionales del suministro de aire de combusti3n en los Hornos de Reducci3n.
- [7] Tesis de Maestría. Facultad Metalurgia Electromecánica. ISMMM. Cuba. 2015 Bishop Robert H. "The

Mechatronics Handbook”, University at Austin, Texas, 2010. Disponible: www.isa.org. ISBN 0-8493-0066-5.

AADECA. 2010. Gaité D. L. Eficiencia Energética Drives&Motors. ABB. 2012.

[8] Richard [7] Schreiber Robert. “Air Flow Control using Fuzzy Logic” Microchip Technology Inc. ISO 9001-QS 9000 certified 2012. DS00600B-pages 20. Disponible: www.microchip.com.

[9] L. Peñalba and J. Pardo, “Gestión Energética de los motores eléctricos: mejora de la eficiencia de los accionamientos con el uso de variadores de velocidad,” Asociación Española para el Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (AEDIE), p. 8, 2005.

[10] Álamo Cantarero Teodoro. Introducción al Simulink. Modelación y simulación de sistemas dinámicos. Departamento de Ingeniería de sistemas de automática, Sevilla 2011, ISBN 84-88-783-43-4.

[11] González J. et al. Modelo numérico para estudio del flujo en un ventilador centrífugo de pequeñas dimensiones, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, Área de Mecánica de Fluidos. Departamento de Energía. Universidad de Oviedo, España, 2010. Disponible: www.uniovi.es.

[12] M. Pilatásig L. Mena E. Pruna I. Escobar Evaluación Energética en Motores de Inducción en el Accionamiento de Ventiladores Centrífugos. Revista Técnica “energía”. No 11, 2015. Pp. 85-91. ISSN 1390-5074.

[13] Lencinas A. P. Control de velocidad V/Hz bidireccional de un motor de inducción monofásico utilizando MC68HC908MR32. XXII Congreso Argentino de Control Automática.

## 7. BIOGRAFÍA

<sup>1</sup>Santana L. E. Ingeniero en Automática, Telemecánica y Comunicaciones, Moscú, URSS, 1983, Master en Ciencias Técnicas, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Cuba

<sup>2</sup>Marrero R. S., graduado de Ing. Electrónica Industrial en 1983 del Instituto Politécnico de Kiev. PhD. en automatización, graduado en 1989 de la Universidad Estatal de Minas de Sant Petersburgo, Rusia. Docente de tiempo completo de la Carrera de Ing. Eléctrica en la UTC, Ecuador. Investiga en eficiencia y calidad de la energía eléctrica, optimización y automatización industrial

<sup>3</sup>Vega A. O, Ingeniero Mecánico, Moa, ISMMM, 1997. Profesor Adjunto del Dpto. Mecánica ISMMM. Posgrado de MSc. en Electromecánica graduado en el ISMMM. Trabaja en el Departamento de Mantenimiento, Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, Moa. Holguín, Cuba.

<sup>4</sup>González P. I., Graduada de Ing. Electricista del Instituto de Minas de Moscú 1983. Es graduada de PhD. en Ing. Eléctrica en 2011 de la Universidad Estatal de Minas de Sant Petersburgo, Rusia. Actualmente es docente de tiempo completo de la Carrera de Ing. Eléctrica en la UTC, Ecuador. Su área de interés incluye optimización de sistemas eléctricos, eficiencia energética y calidad de la energía eléctrica.

### REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	26 junio 2016
Fecha aceptación	18 diciembre 2016

## **SIMULACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES DE VEHÍCULOS DE TRANSPORTE PÚBLICO EN LA CIUDAD DE AMBATO (ECUADOR) MEDIANTE COPERT 4**

### **SIMULATION OF FUEL CONSUMPTION AND EMISSIONS OF THE PUBLIC TRANSPORTATION FLEET IN AMBATO (ECUADOR) WITH COPERT 4**

**John Jairo Ceballos Marcillo<sup>1</sup>, Francisco Vicente Tinaut Fluixá<sup>2</sup>,**  
<sup>1,2.</sup>Universidad de Valladolid Uva – Escuela de Ingenierías Industriales – Paseo del Cauce, 59, Valladolid - España  
e – mail : [ceballos@eii.uva.es](mailto:ceballos@eii.uva.es), [tinaut@eii.uva.es](mailto:tinaut@eii.uva.es)

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 6 (15)

#### **RESUMEN**

Se simula el consumo de combustible y emisiones de una flota de vehículos de transporte público a partir de información de circulación bajo configuraciones de relieve y orografía específica de la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, en la República de Ecuador, mediante la utilización del Software COPERT 4

Se parte del señalamiento de un caso modelo inicial, donde se aplica el cálculo informático para un vehículo en un recorrido de un kilómetro, posterior a lo que se procede a la realización del ajuste de la metodología para aplicarlo al caso específico de la ciudad de Ambato, cuya estructura está compuesta por dos enfoques principales: una configuración de recorrido plano sin aplicación de la orografía característica de la urbe, y una conformación que incluya la orografía irregular partiendo de porcentajes de afección dentro del recorrido tipo que satisfaga los requerimientos característicos de un circuito general de transporte público local.

Se concluye el desarrollo con la presentación de proyecciones de emisión en escenarios hipotéticos de actualización o reforma completa de la flota hacia tecnologías con aplicación

de legislaciones de control con una mayor eficiencia, pudiendo así apoyar la toma de decisiones políticas iniciales por parte de los gobiernos locales hacia la transformación de la matriz de transporte eficiente y con menor índice de contaminación medioambiental.

#### **Palabras clave**

*COPERT, transporte público, consumo de combustible, emisiones contaminantes.*

#### **ABSTRACT**

Simulate fuel consumption and emissions of the fleet of public transport vehicles from information on specific configurations of relief and topography of the city of Ambato, Tungurahua Province, Republic of Ecuador, by using the Software COPERT 4.

The investigation starts from the assignment of an initial model case that represents the earliest computer calculations for only one vehicle at one kilometer of road. From this initial procedure, the investigation proceeds to the methodological adjustment of the COPERT model to apply in the specific case of Ambato, which structure is composed from two main perspectives: one plain road configuration analysis

without the influence of the typical urban topography, and another configuration that includes this irregular relief obtained from affection percentages of road inclination, satisfying the main requirements of the local public transportation circuit.

In the final chapter the future hypothetical effects of emissions in two different scenarios are presented: the update of one half of the fleet or the complete change of the entire fleet to technologies with highest efficiency control standards, providing the starting support for initial political decisions from local governments towards the transformation of a superb transportation matrix with less environment contamination levels.

### Keywords

*COPERT, Public Transportation, Fuel Consumption, Pollution Emissions.*

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, bajo un modelo de sociedad económicamente activa y productiva, los medios de transporte de tipología pública y privada son uno de los ejes principales de manutención de la esfera sostenida de movilización continua necesaria para la humanidad. La realización de la denominada “movilidad urbana” conlleva una serie de responsabilidades con respecto a temas de una relevada importancia global, el consumo de combustible y su relación directa con las emisiones contaminantes resultantes de los procesos de transformación energética propios de los procesos mecánicos que se llevan a cabo.[1]

Bajo este marco inicial, el desarrollo de un estudio investigativo sobre estimación de consumo de combustible y emisiones contaminantes a la

atmósfera [2] para la ciudad de Ambato, provincia de Tungurahua, en la República del Ecuador, parte de la necesidad de la ciudad de establecer de forma específica el desarrollo estimado de dichos parámetros en la movilidad de tipo pública, con la finalidad de poder realizar una serie de políticas de control y regulación a nivel local que propongan una agenda ambiental de control por parte del Gobierno Autónomo Descentralizado del Municipio de Ambato (GADMA), adjunto en el futuro al presente desarrollado por la municipalidad, cuyos ejes estratégicos son:

- Reducción de la contaminación ambiental.
- Consolidación de la autoridad para la prevención y el control de la contaminación y fortalecimiento de la institucionalidad ambiental.
- Reducción de las emisiones contaminantes, de fuentes estáticas y móviles.
- Optimización de las capacidades de conformación en políticas ambientales.
- Información y registros estimados de evolución de los sistemas originarios de la contaminación. [3]

Las normativas Euro (categoría de contaminantes) son un conjunto de requisitos que fijan los valores límite de las emisiones de los vehículos nuevos al momento que se encuentre válida la revisión actual de dicha norma. Acorde a [8], “en la fiscalidad de un vehículo, las emisiones de gases contaminantes tienen un papel muy importante porque el tipo impositivo depende también de la clasificación que establecen las diferentes normas Euro.” [3], [7], [8].

Estas limitaciones de emisiones se encuentran resumidas en las figuras 1 y 2.

Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor de gasolina						
	válido a partir de	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	PM
Euro I	12/92	2,72	-	-	0,97	-
Euro II	01/97	2,20	-	-	0,5	-
Euro III	01/00	2,30	0,20	0,15	-	-
Euro IV	01/05	1,00	0,10	0,08	-	-
Euro V	09/09	1,00	0,10	0,06	-	0,005*
Euro VI	08/14	1,00	0,10	0,06	-	0,005*

\* con inyección directa

Limitaciones a las emisiones para vehículos con motor de gasolina

Figura 1. Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor de gasolina.

Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor diésel						
	válido a partir de	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)	HC+NOx (g/km)	PM
Euro I	01/92	3,16	-	-	1,13	0,14
Euro II	01/96	1,00	0,15	0,55	0,70	0,08
Euro III	01/00	0,64	0,06	0,50	0,56	0,05
Euro IV	01/05	0,50	0,05	0,25	0,30	-
Euro V	09/09	0,50	0,05	0,18	0,23	0,005
Euro VI	08/14	0,50	0,09	0,08	0,17	0,005

El nivel de emisiones para vehículos con motor diésel

Figura 2. Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor diésel.

Con la finalidad de poder estimar y documentar las emisiones anuales nacionales y su evolución dentro del espacio temporal, se han desarrollado una serie de modelos, principalmente de tipo informáticos, como el propuesto dentro del presente artículo científico: COPERT (Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport). [4][5][6]

COPERT 4 en su última versión es una herramienta informática de utilidad práctica dentro del sector del transporte en carretera, ya que permite el cálculo del consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas, y el cálculo de emisiones de todos los contaminantes regulados (CO, NO<sub>x</sub>, COV y PM) emitidos por diferentes categorías de vehículos (coches de pasajeros, vehículos ligeros y pesados, ciclomotores y motocicletas) además de estimar las emisiones de otros compuestos como CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, NH<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, metales pesados, HAP (hidrocarburos aromáticos policíclicos) y COP (contaminantes orgánicos persistentes). [7] [8]

Se evalúan los consumos y las emisiones de la flota de vehículos de transporte público de la ciudad de Ambato, con la

mayor exactitud posible a partir de la información disponible, para los años 2000, 2007 y 2015.

Predice escenarios posibles de consumo de combustible y emisiones de la flota a en situaciones hipotéticas de transformación de la misma hacia normas regulatorias más restrictivas en emisiones.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

El programa informático COPERT 4 parte de un enfoque de tipología “top-down”, el mismo que ofrece un volumen general de consumo o emisiones para todo el conjunto de la actividad del transporte o para alguno de sus modos, dados mediante regresiones en la que las variables se alimentan de estadísticas ya elaboradas.

El software mencionado, específicamente en el campo de previsión de estimaciones para el sector de autobuses toma en cuenta una serie de categorías de estratificación específica de las flotas:

- Según tipo de combustible (Diésel, GNC, Biodiésel)
- Según forma estructural (Midi <= 15 tons, estándar 15 tons, articulates > 15 tons, entre otros)
- Según tipo de tecnología de control de emisiones (convencional, Euro I, II, III, IV, V, VI).

Para la estimación de emisiones el programa informático además utiliza una formulación de patrones de conducción dependiente de la velocidad, desarrollado de forma empírica a través de análisis y comprobación estadística e múltiples tests reales mundiales bajo diferentes condiciones de manejo [7] [8]. Estos patrones de conducción son tres: conducción urbana (velocidad < 50 km/h), conducción rural (velocidad entre 50 – 100 km/h) y conducción en

autopista (100 – 120 km/h).

Tomadas en cuenta características de la flota, forma estructural, tipo de tecnología de control de emisión, además de los patrones de conducción anteriormente mencionados [10] [11], COPERT establece el cálculo final mediante la suma de tres fuentes distintas de emisiones: aquellas obtenidas cuando el motor se encuentra en una fase térmica estabilizada (hot emisión), aquellas recabadas durante la fase de calentamiento del sistema (cold emissions) y finalmente las obtenidas por evaporación del combustible (fuel evaporative emissions) según se indica en la siguiente ecuación:

$$E_{TOTAL} = E_{HOT} + E_{COLD} + E_{EVAP} \quad Ec. 1$$

De esta manera dentro del desarrollo estructural de modelo de estimación de emisiones expuesto por COPERT 4 se distingue 3 tipos de patrones de conducción:

- Patrón de conducción urbana. Se identifica por tener velocidades en un rango inferior a 50 km/h, con parada y arranques frecuentes del vehículo, siendo aplicada especialmente en centros característicos de ciudad.
- Patrón de conducción rural. Engloba la tipología de carretera externa a las ciudades, la misma que en ocasiones puede ser interrumpida por cruces o semáforos. El rango de velocidades se encuentra entre 50 km/h y 90-100 km/h.
- Patrón de conducción en autopista. Se caracteriza por incluir las velocidades en vías de recorrido rápido y de gran capacidad, donde por naturaleza no existen interrupciones en el tráfico. El rango de velocidades está entre 100-120 km/h.

Al ser COPERT 4 un software informático, con la finalidad de calcular la contaminación generada por cada categoría bajo las circunstancias de entrada que introduce el usuario, dentro de su esquematización de programación tiene que cumplir una serie de procesos en secuencia determinados a continuación:

- Cálculo de factores de emisión en caliente (Hot emission factors calculation). El factor de emisión en caliente es una expresión numérica para la cantidad de figura 3, contaminación que un vehículo genera por kilómetro en condiciones normales. Para este cálculo se utilizan los siguientes parámetros:
  - ▶ Parámetros del motor.
  - ▶ Año de producción del vehículo.
  - ▶ Modo de conducción.
  - ▶ Velocidad promedio.

#### **Cálculo del factor de emisión en frío (Cold emission factor calculation).**

Este factor de emisión representa la contaminación producida por Km por los vehículos cuando no están en estado térmico estable. Sucede en el principio de cualquier viaje. Dentro de esta medición, a parte de los parámetros utilizados en el cálculo de factores de emisión en caliente se utiliza:

- ▶ Registro de temperatura del país.
- ▶ Parámetros típicos del motor.
- ▶ Año de producción.
- ▶ Modo de conducción.

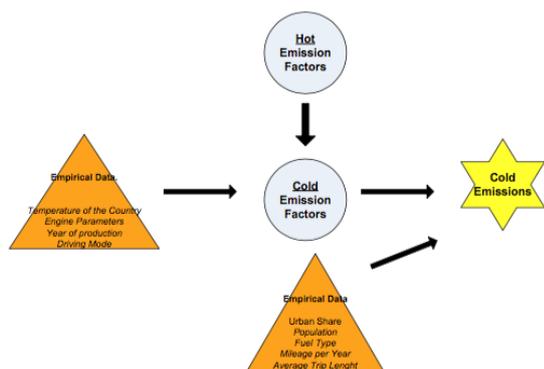


Figura 4. Cálculo de emisiones en frío en COPERT 4

### Cálculo de emisiones en frío

Este valor representa la contaminación producida en un año por una categoría de vehículos en un país mientras llega el sistema a su estabilización térmica. Para realización de este cálculo la programación informática de COPERT 4 utiliza:

- ▶ Recorrido del vehículo en ciclo urbano.
- ▶ Recorrido total de la flota por año.
- ▶ Total de unidades contenido en la flota por categoría.
- ▶ Tipo de combustible.
- ▶ Longitud promedio del viaje.

### Cálculo de efecto del combustible

Este factor participa en el cálculo de los factores de emisión en caliente para ayudar a la obtención de una mayor precisión, ya que se supone que dependiendo de la tecnología el vehículo va a responder de mejor manera a la producción de contaminantes del combustible.

### Cálculo de degradación por kilometraje

La influencia de degradación se obtiene por el estado del vehículo con el pasar del tiempo. Este proceso toma en cuenta las millas realizadas por el vehículo desde su construcción, la velocidad realizada

en diferentes tramos del camino además de factores inclusivos acerca de los rangos de velocidades. Para autobuses se evidenció que no se toma en cuenta la degradación por kilometraje, comprobado posteriormente.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### INTRODUCCIÓN DE DATOS EN COPERT

Caso inicial modelo (1 vehículo- recorrido 1 km)

Selección de país y año

Para la ciudad de Ambato, desde un enfoque inicial modelo donde se buscan, conocer el comportamiento del programa en un análisis de un solo vehículo por cada tipología de flota existente en los tres años que se pretende realizar (2000, 2007 y 2015), en la selección de país y año se introduce la información mostrada en la Tabla 1.

Tabla 1. Recorrido medio y tiempo de recorrido

		Recorrido medio	Tiempo de recorrido
		Ltrip (km)	t_trip (h)
Caso inicial modelo	1		0.05

### Información específica de la ciudad

Posterior al ingreso de ciudad y los años que se van a realizar los análisis específicos, COPERT 4 brinda la posibilidad de ingresar información propia de la ciudad, siendo estos valores de tipo meteorológicos (temperatura registrada, humedad relativa) y el valor de presión de vapor Reid (Reid vapor pressure) del combustible. (Figura 5)

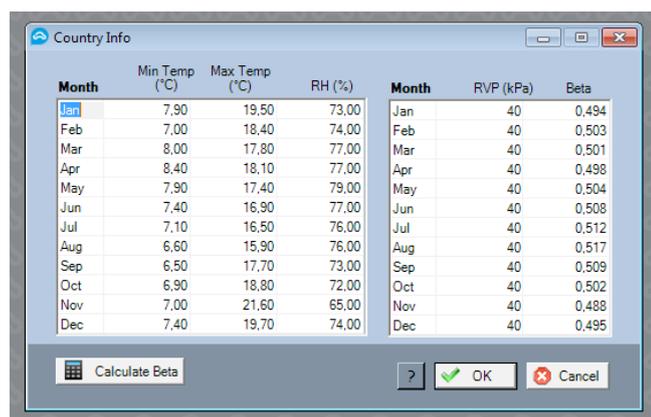


Figura 5. Cálculo de emisiones en caliente en COPERT 4

### Información técnica del combustible

De forma definida para el Diesel, combustible común utilizado en los autobuses en la región ecuatoriana, se ingresa los valores de densidad del combustible ( $\text{kg/m}^3$ ), porcentaje de componentes aromáticos PCA (%v/v), el número de Cetano CN, el T95 o temperatura a la que el 90% - 95% del diésel se evapora y el contenido de azufre en el combustible ( $\text{mg/kg}$ ).

Tabla 2. Características de Diesel para Ecuador

Año	Densidad ( $\text{kg/m}^3$ )	PCA (% v/v)	CN	T95 ( $^{\circ}\text{C}$ )	Azufre ( $\text{mg/kg}$ )
2000	840	7	53	330	450
2005	835	5	53	320	450
2009	835	5	45	288	450

### Ingreso de valores de la flota de vehículos

En el caso inicial modelo, se verifican el comportamiento de software únicamente para las características del espacio temporal utilizadas posteriormente en el caso indicado para la ciudad de Ambato, tanto en su enfoque plano completo y el correspondiente enfoque real con participación activa del porcentaje de pendiente positiva y negativa, por lo que al ser empleado el software para estudios estadísticos amplios se

requiere ingresar una flota amplia y posteriormente de forma manual dividir el valor de emisiones para la flota ingresada, según el ejemplo propuesto en la tabla 3.

Tabla 3. Datos de entrada flota caso inicial

Subsector	Legislation Standard	Population	Mileage (km/year)	Mean fleet mileage (km)
Urban buses standar 15 t.	HD Euro I - 91/542/EEC Stage	1000000	1000	15000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro II - 91/542/EEC Stage	1000000	1000	8000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro III - 2000 standars	1000000	1000	5000

El valor de "Mean fleet mileage" se obtiene a partir de la multiplicación de los kilómetros/año por el número de años que está la flota a ese momento, siguiendo como ejemplo valores expuestos en la tabla 4.

Tabla 4. Datos Mean Fleet Mileage caso inicial

Subsector	Legislation Standard	Mileage (km/year)	Años activos flota	Mean fleet mileage (km)
Urban buses standar 15 t.	HD Euro I - 91/542/EEC Stage	1000	15	15000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro II - 91/542/EEC Stage	1000	8	8000
Urban buses standar 15 t.	HD Euro III - 2000 standars	1000	5	5000

### Datos de entrada velocidad de circulación

En el caso del transporte público de la ciudad de Ambato se especifica una velocidad media de 25 km/h, con un porcentaje de participación de 100% de ciclo urbano (Figura 6). Dentro del análisis del caso inicial modelo, se añaden 2 posibilidades más (velocidades a 20km/h, y 35km/h) para poder visualizar el comportamiento del consumo de combustible y emisiones con respecto al cambio de la velocidad media del vehículo.

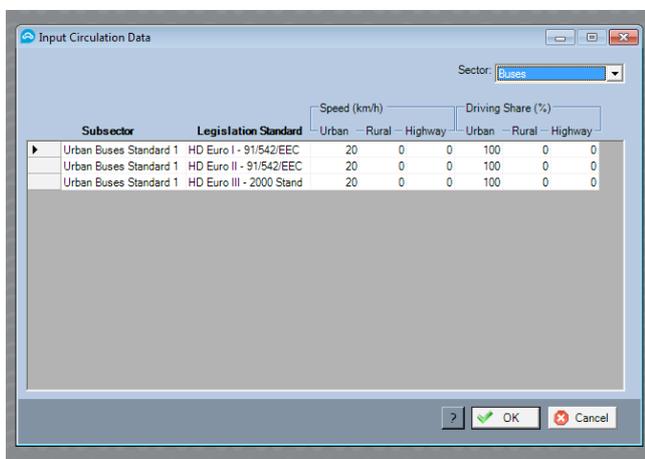


Figura 6. Información velocidad circulación COPERT 4

### Emisiones CO<sub>2</sub> por el aceite lubricante

Al estar el aceite en continuo proceso de lubricación de los componentes estructurales del motor en la combustión interna, estos también producen una cantidad de emisiones por su consumo. COPERT 4 toma en cuenta este proceso de emisiones y lo agrega a las emisiones de CO<sub>2</sub> generales del proceso mismo de la combustión, cuyos factores de emisión los calcula por defecto el mismo software, dando además la posibilidad de incluir un valor propio del usuario.

Tabla 5. Factores de emisión por consumo de aceite.

Subsector	Legislation Standar	Emission Factor (g/km)		
		Urban	Regular	Highway
Urban	Conventional	2.65	2.65	2.65
Buses	HD Euro I -	2.05	2.05	2.05
Standar.	HD Euro II -	1.46	1.46	1.46
15 tone-ladas	HD Euro III	0.861	0.861	0.861

### Caracterización de las simulaciones de copert en condiciones de referencia

#### Resultados caso modelo inicial

Los resultados del caso inicial modelo presentados a continuación son obtenidos para una primera configuración, detallada a continuación:

- Velocidad media de recorrido: 20 km/h.
- Vehicle load / axles: 100% / 2.
- Road Slope: 0% (sin road slope).

### Consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>

A continuación se presenta el comportamiento del consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub> para un vehículo, por kilómetro realizado, correspondiente a la configuración de presencia de la normativa de acuerdo a los años medidos, así como su evolución en el tiempo con respecto a la presencia de la normativa (Conventional, Euro I, Euro II y Euro III) dentro de las especificaciones características de Ambato.

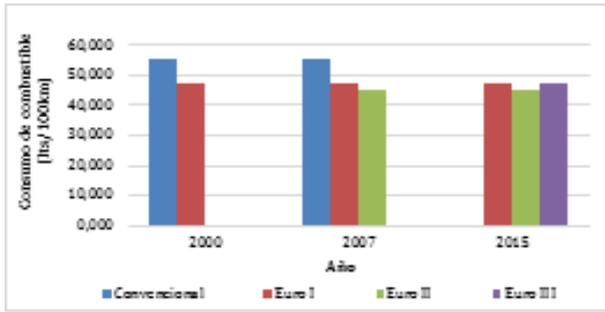


Figura 7. Comportamiento del consumo de combustible

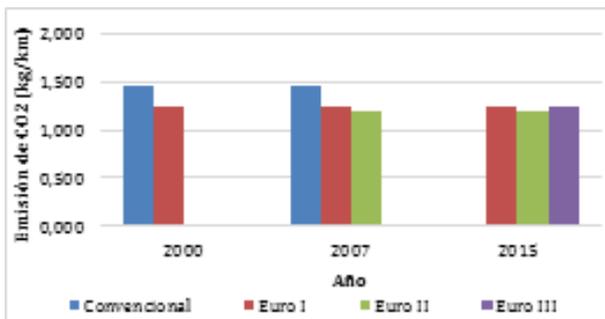


Figura 8. Comportamiento de la emisión de CO<sub>2</sub>

### Casos de influencia en las estimaciones de emisión

En orden hacia la comprensión final del software, y establecer su comportamiento bajo distintas configuraciones, se procede a analizar una serie de casos de influencia en las estimaciones de emisión, variando varios parámetros dentro de COPERT 4. Los casos de influencia en las estimaciones de emisión son:

- Cambios por variación de la pendiente.
- Cambios por variación de la carga.
- Cambios por variación de la velocidad media de recorrido.

### Cambios por influencia de la variación de la pendiente

COPERT 4 permite la selección del grado de pendiente que tiene la carretera, siendo este nivel de pendiente decreciente o ascendente, en grados de

-6°, -4°, -2°, 0°, 2°, 4° y 6°. Los resultados obtenidos tanto para consumo de combustible como para emisión de CO<sub>2</sub> se especifican en la figura 9.

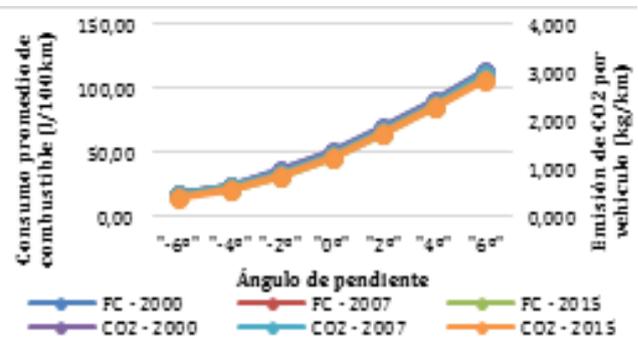


Figura 9. Comportamiento por variación de pendiente

### Cambios por influencia de la variación de la carga

El factor componente al nivel de carga que soporta el vehículo tiene una gran importancia en cuanto al consumo final de combustible y por tanto el aumento o disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros productos contaminantes al ambiente.

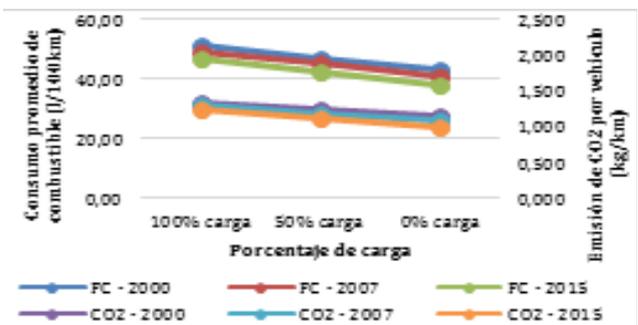


Figura 10. Comportamiento por variación de carga

### Cambios por influencia de la variación de la velocidad media del recorrido

En verdad para determinación teórica del consumo de combustible, y su relación con el aumento o disminución de la velocidad parte de la diferenciación de dos conceptos totalmente diferentes (velocidad y aceleración), en situaciones de trabajo de igual manera distintas (tipo de marcha, rango de velocidad a la

que se recorre, etc.). A continuación se verifica la variación del comportamiento de FC y CO<sub>2</sub> por influencia de la velocidad.

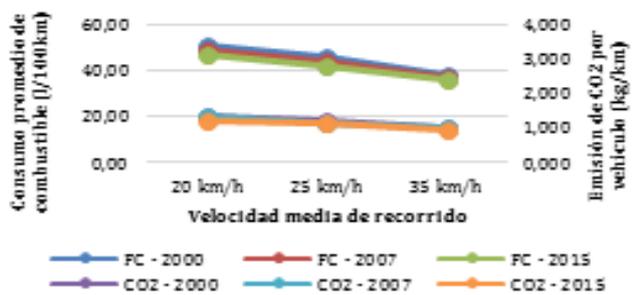


Figura 11. Comportamiento por variación de velocidad media

### Resultados de la simulación con COPERT caso específico ciudad Ambato

Para la obtención de resultados de la simulación con COPERT 4, para el caso específico de la ciudad de Ambato, tomando en cuenta que se mantienen los mismos valores de información meteorológica, información técnica del combustible, categorización de vehículos, velocidad media de recorrido y carga del vehículo, se ingresan en este punto los valores efectivos de entrada de la flota bajo los siguientes valores a continuación:

Tabla 6. Datos de flota Coop Tungurahua

Cooperativa Tungurahua			
	2000	2007	2015
Convencional	74	84	0
Euro I	38	21	0
Euro II	0	29	97
Euro III	0	0	51

Tabla 7. Datos de flota Coop Jerpazsol

Cooperativa Jerpazsol			
	2000	2007	2015
Convencional	0	0	0
Euro I	35	35	0
Euro II	0	12	16
Euro III	0	0	35

Tabla 8. Datos de flota Coop Libertadores y de Ambato

Cooperativa Libertadores y Ambato			
	2000	2007	2015
Convencional	41	41	0
Euro I	9	9	31
Euro II	0	8	23
Euro III	0	0	11

Total de buses de la flota real			
	2000	2007	2015
Convencional	115	125	0
Euro I	82	65	31
Euro II	0	49	136
Euro III	0	0	97
Total	197	239	264

### Emisiones caso específico ciudad de Ambato - configuración plana

Para valores de configuración plana de la ciudad de Ambato, con un recorrido medio de 51,2 km y un tiempo medio de recorrido de 3 horas, una velocidad media de tipo urbana 100% de 25 km/h se agregan los siguientes valores de entrada de la flota para el año 2000, 2007 y 2015.

Tabla 9. Datos de la flota año 2000 configuración plana

Año 2000			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	115	62290.4	622903.6
Euro I	82	62290.4	62290.4

Tabla 10. Datos de la flota año 2007 configuración plana

Año 2007			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	125	62290,4	1058936,2
Euro I	65	62290,4	436032,6
Euro II	49	62290,4	62290,4

Tabla 11. Datos de la flota año 2015 configuración plana

Año 2015			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Conveccional	31	62290,4	934355,5
Euro I	136	62290,4	498322,9
Euro II	97	62290,4	311451,8

Para esta configuración plana se presenta las siguientes estimaciones de consumo de combustible y emisiones de CO<sub>2</sub>.

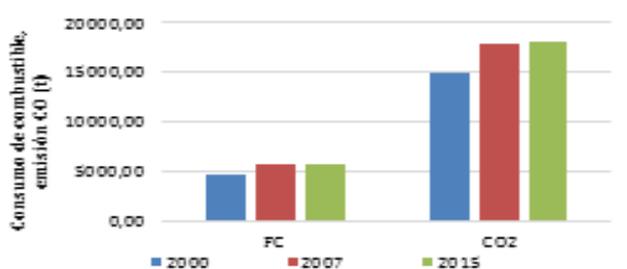


Figura 12. FC y emisión de CO<sub>2</sub> configuración plana

### Emisiones caso específico ciudad de Ambato – configuración real

Al suponer un circuito con afección directa de la orografía, el recorrido se subdivide en dos tramos (recorrido de ida y recorrido de vuelta), los mismos que a su vez se dividen en tres porciones (porción de recorrido con pendiente positiva, porción de recorrido plano, y porción de recorrido con pendiente negativa), los mismos que englobarían los cambios de pendiente dentro de la ciudad.

Tabla 12. Datos recorrido medio y tiempo de ida

	Recorrido medio Ltrip (km)	Tiempo de recorrido t_trip (h)	Ángulo de variación pendiente
Descendente	4,864	0,29	-2°
Tramo plano	16,128	0,95	0°
Ascendente	4,608	0,27	4°

Tabla 13. Datos recorrido medio y tiempo de regreso

	Recorrido medio Ltrip (km)	Tiempo de recorrido t_trip (h)	Ángulo de variación pendiente
Descendente	4,608	0,27	-4°
Tramo plano	16,128	0,95	0°
Ascendente	4,864	0,29	2°

En la aplicación de la configuración real, los valores de población de la flota, kilometraje anual recorrido kilometraje principal de la flota, tanto para el tramo de ida, como tramo de vuelta quedan determinados acorde a información organizada a continuación:

Tabla 14. Datos año 2000 ida descend. - regreso ascend.

Año 2000			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Conveccional	115	5917,58	59175,58
Euro I	82	5917,58	5917,58

Tabla 15. Datos año 2007 ida descend. - regreso ascend.

Año 2007			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Conveccional	125	5917,58	100598,94
Euro I	65	5917,58	41423,09
Euro II	49	59175,58	59175,58

Tabla 16. Datos año 2015 ida descend. - regreso ascend.

Año 2015			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Conveccional	31	5917,58	88763,77
Euro I	136	5917,58	47340,68
Euro II	97	59175,58	29587,92

Tabla 17. Datos año 2000 ida plano - regreso plano

Año 2000			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	115	19621,46	196214,65
Euro I	82	19621,46	19621,46

Tabla 18. Datos año 2007 ida plano - regreso plano

Año 2007			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	125	19621,46	333567,90
Euro I	65	19621,46	137350,25
Euro II	49	19621,46	19621,46

Tabla 19. Datos año 2015 ida plano - regreso plano

Año 2015			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	31	19621,46	294321,97
Euro I	136	19621,46	156971,72
Euro II	97	19621,46	98107,32

Tabla 20. Datos año 2000 ida ascend. - regreso descend.

Año 2000			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	115	5606,13	56061,33
Euro I	82	5606,13	5606,13

Tabla 21. Datos año 2007 ida ascend. - regreso descend.

Año 2007			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	125	5606,13	95304,26
Euro I	65	5606,13	39242,93
Euro II	49	5606,13	5606,13

Tabla 22. Datos año 2015 ida ascend. - regreso descend.

Año 2015			
	Población	Km/año	Mean Fleet Mileage (km)
Convencional	31	5606,13	84091,99
Euro I	136	5606,13	44849,06
Euro II	97	5606,13	28030,66

En este caso específico bajo configuración real, es necesario especificar otros valores complementarios de ingreso en COPERT 4 tal como se expresa en la tabla 23.

Tabla 23. Valores complementarios de ingreso

Parámetro	Valor complementario
Emisión CO <sub>2</sub> por lubricante	Predeterminadas
Datos de selección de carga	100% - Apply
Variación de pendientes	De acuerdo situación.
Relación de NO <sub>2</sub> a NO <sub>x</sub>	Predeterminadas.
Fracción carbono elemental y carbono orgánico en PM	Predeterminado.
Factores emisión en caliente	Predeterminado

COPERT 4 para esta configuración real, donde se toma en cuenta la afección de la orografía, después de aplicación de su esquema metodológico presenta una serie de resultados que posteriormente son comparados con la configuración plana.

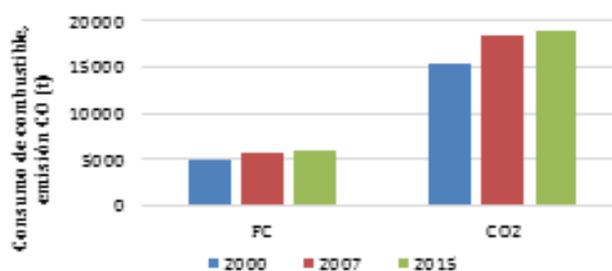


Figura 13. FC y emisión de CO<sub>2</sub> configuración real

### Estudio comparativo configuración plana - real ciudad de Ambato

Relación de diferencia en consumo de combustible y CO<sub>2</sub>.

Tanto en el caso del consumo de combustible FC, como en la emisión de CO<sub>2</sub> correspondiente se observa una diferencia positiva, lo que explicaría que en casos de ciudades como Ambato por su orografía irregular se evidencia en la realidad un mayor consumo y una mayor emisión de CO<sub>2</sub> con respecto a ciudades planas.

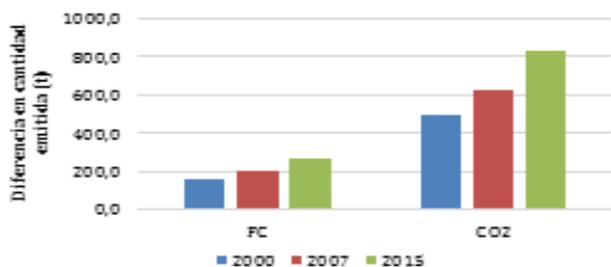


Figura 14. Diferencia FC y emisión de CO<sub>2</sub> – configuración plana -real

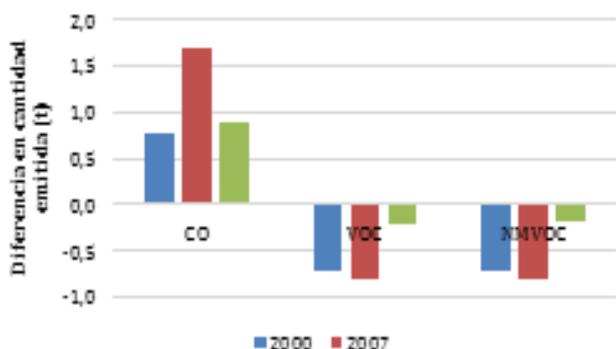


Figura 15. Diferencia CO, VOC y NMVOC – configuración plana -real

En el caso de las diferencia expresas en relación a la comparativa entre emisiones de CO, VOC y NMVOC se constata un efecto particular, la diferencia de CO es positiva, mientras que la diferencia de VOC y NMVOC es negativa, lo que señalaría que en el caso real según la metodología de COPERT, se emitiría menos cantidad de VOC y NMVOC en ciudades con características orográficas irregulares con respecto a ciudades con configuración plana.

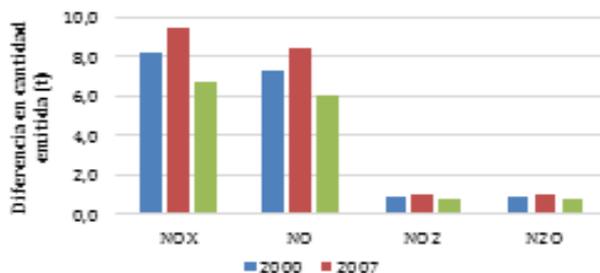


Figura 16. Diferencia NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub> y N<sub>2</sub>O – configuración plana -real

Finalmente, de forma complementaria a la comparación de las estimaciones de emisión para ambas configuraciones propuestas (plana y real), se añaden los resultados expuestos para el resto de componentes nocivos identificados por la metodología COPERT, verificando que en todos los casos se certificó una diferencia positiva, enunciando así el incremento de emisiones en el caso real aproximado con respecto al análisis con configuración plana.

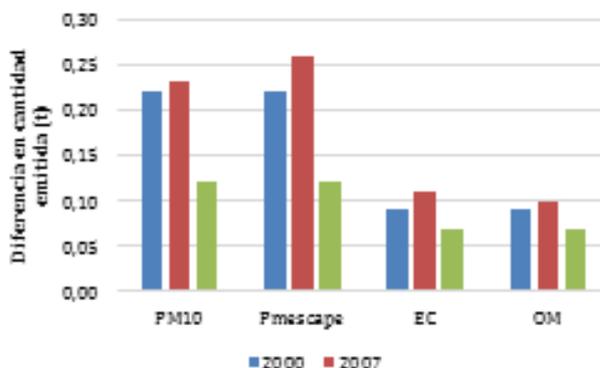


Figura 17. Diferencia Material particulado y carbón – configuración plana -real

### Proyecciones en escenarios hipotéticos

Para la ciudad de Ambato, una de las principales prioridades establecidas por el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipalidad de Ambato dentro de su plan maestro de movilidad y transporte 2012 – 2032, se centra en la renovación parcial o total de la flota hacia tecnología con una mayor eficiencia y menor emisión de fuentes

contaminantes.

En aplicación la meta propuesta por el GAD Municipalidad de Ambato, dentro del presente artículo se proponen dos situaciones hipotéticas a corto plazo para poder justificar estadísticamente las ventajas que se obtendrían se esta actualización de tecnología, siendo las dos opciones:

- Actualización de la flota del año 2015 a una flota potencial 50% Euro II – 50% Euro III.
- Actualización de la flota del año 2015 a una flota potencial 100% Euro III.
- Introducción de nuevas normativas a flotas 100% Euro IV y 100% Euro V.

Aplicando cada una de las situaciones de aplicación para al estimación del consumo de combustible FC y emisión de CO<sub>2</sub> se presencia inicialmente un aumento de sus valores hasta aplicación del 100% Euro III y posteriormente una reducción amplia de la misma para introducción de Euro IV y Euro V.

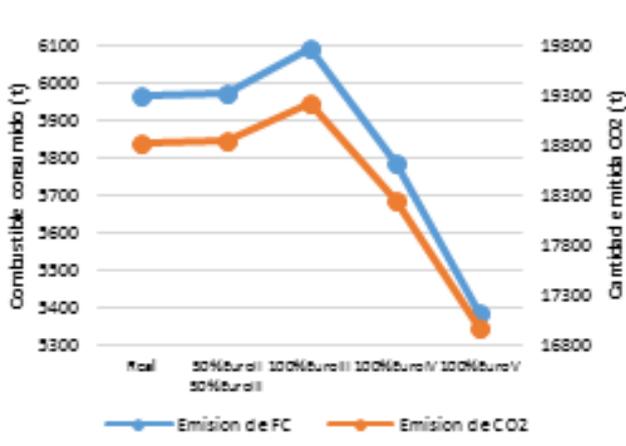


Figura 18. Evolución caso hipotético FC y emisión CO<sub>2</sub>

Adicionalmente se adjuntan las evoluciones de reducción de emisiones de CO, VOC, NMVOC (Figura 19), emisiones de CH<sub>4</sub>, SO<sub>2</sub> (Figura 20) y emisiones de NO<sub>x</sub>, NO y NO<sub>2</sub> (Figura 21).

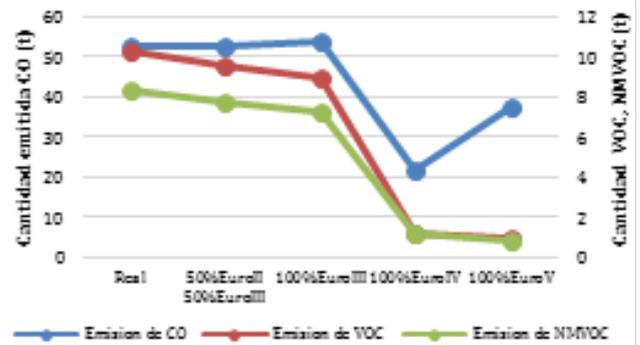


Figura 19. Evolución caso hipotético CO, VOC, NMVOC

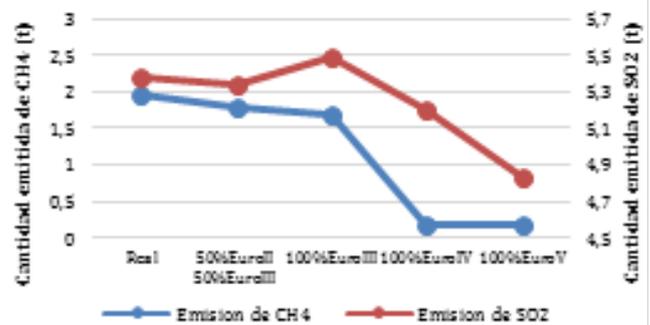


Figura 20. Evolución caso hipotético CH<sub>4</sub> y SO<sub>2</sub>

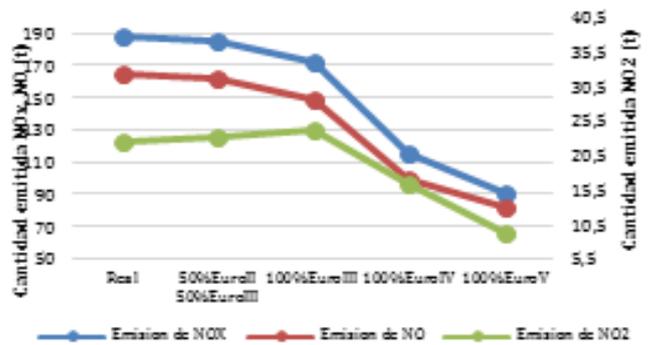


Figura 21. Evolución caso hipotético NO<sub>x</sub>, NO y NO<sub>2</sub>

#### 4. CONCLUSIONES

- Los resultados del estudio comparativo de la configuración plana con respecto a la real de la ciudad de Ambato, muestran para la orografía real un mayor consumo de combustible (FC) y aumento de emisiones de CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O, material particulado y de carbón en el caso real, experimentándose solamente una reducción de emisión de VOC y NMVOC para todos los años registrados (2000, 2007 y 2015).
- Bajo establecimiento de valores normalizados, a partir de los resultados obtenidos del caso específico real de la ciudad de Ambato, se concluye que bajo esta configuración aproximada que ejemplifica la influencia de la orografía propia de la urbe central del Ecuador, en los casos de consumo de combustible y emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, por autobús por kilómetro recorrido a velocidad de 25 km/h, siguiendo el mismo patrón lineal expuesto en el caso modelo inicial, para la normativa convencional (2000, 2007) existe un consumo de combustible de 50,13 l/100km de recorrido con una emisión de 1,32 kg/km de CO<sub>2</sub>, para Euro I (2000, 2007, 2015) se mantiene un consumo de combustible de 43,82 l/100km de recorrido con emisión de 1,16 kg/km de CO<sub>2</sub>, para la Euro II (2007, 2015) el consumo de combustible es de 42,67 l/100km de recorrido con emisión de 1,12 kg/km de CO<sub>2</sub> y, finalmente para Euro III (2015) se experimenta un consumo de combustible de 44,37 l/100km de recorrido con una emisión de 1,17 kg/km de CO<sub>2</sub>.
- La proyección según la metodología empleada por COPERT del consumo de combustible y emisiones en escenarios hipotéticos, de flota potencial 50% Euro II – 50% Euro III o flota potencial

100% Euro III, demuestran que si bien es cierto que el consumo de combustible (FC) y emisión de CO<sub>2</sub> aumenta, las estimaciones de emisiones de CO, VOC, NMVOC, CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub>, NO, N<sub>2</sub>O, material particulado, de carbón y metálico, representan una reducción porcentual favorable que, teóricamente, apoyarían la toma de decisiones políticas hacia la actualización o renovación de la flota de transporte público en la ciudad de Ambato.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] D. Gkatzoflias (Emisia S.A.), C. Kouridis (Emisia S.A.), L. Ntziachristos (LAT/AUTH), Z. Samaras (LAT/AUTH). (2012). COPERT IV Users Manual. Thessaloniki, Grecia: Emisia S.A.
- [2] L. Ntziachristos, P. Boulter (2009). EMEP/CORINAIR Atmospheric Emissions Inventory Guidebook chapter on tyre, break and surface wear. EEA.
- [3] L. Ntziachristos, Z. Samaras (2014). EMEP/CORINAIR Atmospheric Emissions Inventory Guidebook chapter on exhaust emissions from road transport. EEA.
- [4] G. Mellios, L. Ntziachristos (2009). EMEP/CORINAIR Atmospheric Emissions Inventory Guidebook chapter on fuel evaporation from gasoline vehicles. EEA.
- [5] Almodóvar, J. A. (2015). Simulación de emisiones y consumo de combustible de la flota de Valladolid con COPERT 4. Valladolid, España: UVA.
- [6] Baumert, K., Herzog, T., & Pershing, J. (2005). Navigating the number: Greenhouse Gas Data

and International Climate Policy. Washington D.C., Estados Unidos: Instituto de Recursos Mundiales.

Medioambientales y Tecnológicas: <http://www.ciemat.es/MCAportal/portal.do;jsessionid>

[7] Bahamonde, A. (2001). Eliminación de NOX en gases de combustión, reducción catalítica selectiva. Madrid: CSIC.

[14] Economiasimple.net. (18 de Agosto del 2011). Consultada en 21 de diciembre de 2015 desde Economía doméstica, factores a tomar en cuenta para ahorrar combustible <http://www.economiasimple.net/factores-a-tener-en-cuenta-para-ahorrar-combustible.html>

[8] Cives Vilar, J. (2011). La sonda lambda como elemento de control de emisiones. Leganés, España: Universidad Carlos III de Madrid.

[9] Clean Air Institute. (2013). Metodologías para la estimación de emisiones de transporte urbano y de carga y guías para la recompilación y organización de datos. Washington D.C., Estados Unidos: CAI Clean Air Institute.

## 6. BIOGRAFÍA

[10] González, R. (2005). Los ciclos de manejo, una herramienta útil si es dinámica para evaluar el consumo de combustible y las emisiones contaminantes del auto transporte. México Distrito Federal, México: UNAM MX.



<sup>1</sup>John Jairo Ceballos, nació en Ambato en 1987. Ingeniero Automotriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Máster en Ingeniería de Automoción en la Universidad de Valladolid. Asesor de desarrollo de proyectos científicos y planificación de planes metodológicos automotrices.

[11] Macías, J., Martínez, H., & Unal, A. (2010). Bus Technology Meta-Analysis. Bus Technology Meta-Analysis. Reunión anual del Consejo de Investigación sobre el Transporte.



<sup>2</sup>Francisco Tinaut, nació en Valencia el 29 de mayo de 1958. Ingeniero Industrial (Especialidad Energética) por la Universidad Politécnica de Valencia, donde

[12] Agencia de protección ambiental EPA. (23 de Julio de 2012). [www.epa.gov](http://www.epa.gov). Consultada en 3 de Enero de 2015 desde Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos: <http://www.epa.gov/air/airpollutants.html>

obtuvo el doctorado en 1986. Master of Science in Mechanical Engineering, en la Universidad Carnegie-Mellon de Pittsburgh (EEUU). Catedrático de Máquinas y Motores Térmicos, en el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la Universidad de Valladolid. Subdirector General y Director del Área de Energía y Medio Ambiente (fundador, desde julio de 1993) de la Fundación CIDAUT - Centro de

[13] Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas. (15 de Agosto de 2010). [www.ciemat.es](http://www.ciemat.es). Consultada en 3 de Enero de 2016 from Centro de Investigaciones Energéticas,

Investigación y Desarrollo en Transporte y Energía. Parque Tecnológico de Boecillo, Valladolid. Secretario de la Asociación Foro de Automoción de Castilla y León - FACYL (promovió la constitución de la asociación en noviembre de 2001); Socio Fundador de la Asociación Española del Hidrógeno AeH2; y Vicepresidente y Socio Fundador de la Asociación Española de Profesionales de Automoción - ASEPA.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	22 junio 2016
Fecha aceptación	02 diciembre 2016



**DESARROLLO DE UN MÓDULO DIDÁCTICO EN MATLAB PARA EL ANÁLISIS Y EXPANSIÓN DE LAS SERIES DE TAYLOR Y LAURENT****DEVELOPMENT OF A DIDACTIC MODULE IN MATLAB FOR THE ANALYSIS AND EXPANSION OF THE TAYLOR AND LAURENT SERIES**Wilson Román<sup>1</sup>, Norma Barreno<sup>2</sup><sup>1,2</sup> *Universidad de Fuerzas Armadas ESPE – Departamento de Ciencias Exactas, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n. e – mail : <sup>1</sup>wmroman@espe.edu.ec <sup>2</sup>npbarreno@espe.edu.ec*

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 7 (15)

**RESUMEN**

En la formación académica del estudiante de ingeniería uno de los objetivos se orienta en la formulación de modelos matemáticos, ya sean físicos, mecánicos, eléctricos, etc., y estos a su vez tienen una representación formal mediante ecuaciones diferenciales las mismas que necesitan ser resueltas para buscar solución a los problemas planteados, uno de los métodos de solución es la utilización de las series de potencias donde las Series de Taylor y Laurent son sus representantes principales.

Se presenta el desarrollo de un módulo didáctico para analizar y expandir las Series de Taylor y Laurent utilizando MuPAD para el cálculo simbólico y la interfaz gráfica de MatLab para la presentación de resultados, el módulo didáctico se fundamenta en la necesidad de contar con una herramienta informática que permita la representación de una función compleja mediante series de potencia, en las que se visualice los términos de la expansión en serie y la representación gráfica del círculo de convergencia de la serie.

El software Matlab es una herramienta de altas prestaciones para cálculo

numérico y visualización, pero no muy fuerte en el cálculo simbólico, de ahí la importancia del presente artículo.

**Palabras clave**

*Serie de Taylor, Serie de Laurent, módulo didáctico, Matlab.*

**ABSTRACT**

In the academic formation of the student of engineering one of the objectives are oriented in the formulation of the mathematical models, be they physical, mechanical, electrical, etc., and these have in turn have a formal representation by means of differential equations that they need to be To find the solution to the problems posed, one of the solution methods is the use of the series of powers where the Taylor and Laurent series are their main events.

The development of a didactic module to analyze and expand the Taylor and Laurent series using MuPAD for the symbolic calculation and the MatLab graphical interface for the prediction of results is presented, the didactic module is based on the need to have a computer tool It allows the representation of a complementary function through the series of power, in which the terms

of the expansion in series and the graphical representation of the circle of convergence of the series are displayed.

Matlab software is a tool of high performance for numerical calculation and visualization, but not very strong in the symbolic calculation, hence the importance of this article.

**Keywords**

*Taylor series, Laurent series, didactic module, Matlab.*

**1. INTRODUCCIÓN**

La matemática constituye el pilar fundamental de la formación de un ingeniero; concibiendo a la misma como la ciencia que contribuye al análisis, la criticidad, la reflexión y la argumentación que requiere un estudiante para dar soporte a las otras ciencias.

En el campo de la modelación matemática así como en la solución de ecuaciones diferenciales una de las estrategias consiste en representar funciones reales y complejas mediante series de potencias, dentro de ellas la de mayor relevancia son: la Serie de Taylor que aproxima únicamente funciones analíticas; y la Serie de Laurent que surge a partir del análisis de funciones no analíticas en un punto; es decir, La Serie de Laurent constituye una generalización de la Serie de Taylor.

El trabajar con funciones de variable compleja implica el desarrollo de un módulo didáctico utilizando MadPAD de MatLab con la finalidad de contribuir en la revisión conceptual de temas como función de variable compleja, diferenciabilidad, funciones analíticas, cálculo de integrales en el campo complejo, identificación de puntos ordinarios y singulares de las funciones de variable compleja analizando

su desarrollo en Serie de Laurent, aplicando en la resolución de problemas de ingeniería.

**2. FUNDAMENTO TEÓRICO**

La Serie de Laurent es una serie de potencias con exponentes enteros positivos y negativos, en tanto que la Serie de Taylor es una serie solo con exponentes enteros no negativos, se comprueba que las series de Laurent permiten caracterizar los diferentes tipos de singularidades aisladas, y se concluye con una aplicación en Matlab que muestra como hallar los términos de Laurent de algunas funciones concretas.

**2.1 Series de Taylor**

Una serie de Taylor es una aproximación de funciones mediante una serie de potencias o suma de potencias enteras de polinomios se calcula a partir de las derivadas de la función para un determinado valor o punto es suficientemente derivable sobre la función y un entorno sobre el cual converja la serie. Si esta serie está centrada sobre el punto cero, se le denomina serie de Maclaurin,  $z_0=0$ .

**Teorema 1.**

Sea  $f(z)$  una función analítica en un disco abierto  $|z - z_0| < R$ , centrado en  $z_0$  y de radio  $R$ . Entonces, en todo punto  $z$  de ese disco admite  $f(z)$  una representación en serie de potencia. [1]

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:  
 $a_n$  = son los coeficientes  
 $z$  = un punto del plano  $\phi$ .  
 $z_0$  = centro del entorno.

ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO  
 No. 5 Vol. 1 / 2016 (15) ISSN 1390 - 7395 (7/15)

Luego, una serie de potencia puede derivarse término a término en el interior de su círculo de convergencia, es decir:

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n (z - z_0)^n$$

$$f'(z) = \sum_{n=1}^{\infty} n a_n (z - z_0)^{n-1}$$

$$f''(z) = \sum_{n=2}^{\infty} n(n-1) a_n (z - z_0)^{n-2}$$

$$f'''(z) = \sum_{n=3}^{\infty} n(n-1)(n-2) a_n (z - z_0)^{n-3}$$

Derivando sucesivamente, se tiene:

$$f^{(n)} = n! a_n$$

Despejando el coeficiente  $a_n$  y remplazándolo en la ec. (1) se tiene la formulación del siguiente teorema.

**Teorema 2 [Teorema de Taylor]**

Sea  $f(z)$  una función analítica en un disco abierto  $|z - z_0| < R$ , centrado en  $z_0$  y de radio  $R$ . Entonces,  $f(z)$  tiene la representación en serie de potencias [2].

$$f(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (z - a)^n \quad \text{Ec. 2}$$

Ejemplos:

Expanda  $f(z) = \frac{1}{1-z}$  en una serie de Taylor de centro  $z_0 = 2i$

Resolución:

Derivando:

$$F(z) = \frac{1}{1-z}$$

$$f'(z) = -\frac{1}{(1-z)^2}$$

$$f''(z) = \frac{2}{(1-z)^3}$$

$$f'''(z) = -\frac{2(3)}{(1-z)^4}$$

Se concluye:

$$f^{(n)}(2i) = \frac{n!}{(1-i)^{(n+1)}}$$

La serie de Taylor seria:

$$\frac{1}{1-z} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(1-2i)^{n+1}} (z - 2i)^{n+1}$$

**2.2 Series de Laurent**

**Función Holomorfa**

Una función  $f$  es holomorfa en un punto  $z_0$  si es derivable en todos los puntos de  $z \in h$ .

Las series de Laurent son una buena generalización de las series de Taylor, considerando que Taylor trabaja solamente con funciones analíticas en tanto que Laurent aborda funciones analíticas y no analíticas.

**Teorema 3**

Sea  $f$  analítica dentro del dominio anular  $D$  definido por  $|z - z_0| < R$ . Entonces  $f$  tiene la representación en serie de potencias.

$$f(z) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n (z - a)^n \quad \text{Ec. 3}$$

Ejemplos:

1. Expanda  $f(z) = \frac{1}{z(1-z)}$  en una serie de Laurent válida para  $1 < |z - 2| < 2$ .

Resolución:

$$f(z) = -\frac{1}{z} + \frac{1}{z-1} = f_1(z) + f_2(z)$$

$$f_1(z) = -\frac{1}{z} = -\frac{1}{2 + z - 2} = -\frac{1}{2} \frac{1}{1 + \frac{z-2}{2}}$$

$$= -\frac{1}{2} \left[ 1 - \frac{z-2}{2} + \dots \dots \dots \right]$$

$$= -\frac{1}{2} + \frac{z-2}{2^2} - \frac{(z-2)^3}{2^3} + \dots \dots \dots$$



$$\begin{aligned}
 f_2(z) &= \frac{1}{z-1} = \frac{1}{1+z-2} \\
 &= \frac{1}{z-2} \frac{1}{1+\frac{1}{z-2}} \\
 &= \frac{1}{z-2} \left[ 1 - \frac{1}{z-2} + \dots \right] \\
 &= \frac{1}{z-2} - \frac{1}{(z-2)^2} + \frac{1}{(z-2)^3} + \dots
 \end{aligned}$$

La serie es:

$$\begin{aligned}
 f(z) &= \dots - \frac{1}{(z-2)^2} + \frac{1}{z-2} - \frac{1}{2} + \frac{z-2}{2^2} \\
 &\quad - \frac{(z-2)^2}{2^3} + \dots
 \end{aligned}$$

### 2.3 Ceros y Polos

#### Clasificación de los puntos singulares aislados

Un punto singular aislado  $z = z_0$  de una función compleja  $f$  se clasifica dependiendo de, si la parte principal de su expansión de Laurent contiene un cero, un número finito o un número infinito de términos.

Si la parte principal es cero, esto es, todos los coeficientes  $a_k$  son cero, entonces  $z = z_0$  se denomina una singularidad removible.

Si la parte principal contiene un número finito de términos no nulos, entonces  $z = z_0$  se denomina un polo. Si, para este caso, el último coeficiente no nulo es  $a_{-n}$  donde  $n \geq 1$ , se dice entonces que  $z = z_0$  es un polo de orden  $n$ .

Si la parte principal contiene un número infinito de términos no nulos, entonces  $z = z_0$  se denomina singularidad esencial.

### 2.4 Residuos

Si una función compleja  $f(z)$  tiene un polo en el punto  $z = z_0$  entonces el coeficiente  $a_{-1}$  del término  $\frac{1}{z-z_0}$  en la expansión en

serie de Laurent de  $f(z)$  alrededor de  $z = z_0$  es llamado el residuo de  $f(z)$  en el punto  $z = z_0$  [2].

#### Teorema 4

Se considera el caso cuando  $f(z)$  tiene un polo simple en  $z = z_0$ . Esto implica, de la definición de polo simple, que:

$$\begin{aligned}
 f(z) &= \frac{a_{-1}}{z-z_0} + a_0 + a_1(z-z_0) + \dots \\
 c &< |z-z_0| < R
 \end{aligned}$$

en un anillo apropiado. Al multiplicar por  $z = z_0$  se tiene:

$$(z-z_0)f(z) = a_{-1} + a_0(z-z_0) + \dots$$

que es una expansión en serie de Taylor de  $(z-z_0)f(z)$ . Si  $z$  tiende a  $z_0$  entonces se obtiene el resultado, residuo en  $a_{-1}$ , polo simple en:

$$z_0 = \lim_{z \rightarrow z_0} [(z-z_0)f(z)] = a_{-1} \quad \text{Ec. 4}$$

Entonces este límite da una forma para calcular el residuo en un polo simple.

Pero si  $f(z)$  tiene un polo de orden  $m$  en  $z = z_0$ , primero se multiplica  $f(z)$  por  $(z-z_0)^m$ . Si  $m \geq 2$  entonces hay que derivar tantas veces como sea necesario (esto es,  $m-1$  veces) para hacer  $a_{-1}$  el primer término, sin el factor  $z = z_0$ .

#### Teorema 5

La fórmula general para el residuo de un polo de orden  $m$  es:

$$\frac{1}{(m-1)!} \lim_{z \rightarrow z_0} \left\{ \frac{d^{m-1}}{dz^{m-1}} [(z-z_0)^m f(z)] \right\} \quad \text{Ec. 5}$$

donde el factor  $(m-1)!$  surge cuando el término  $a_{-1}(z-z_0)^{m-1}$  es derivado  $m-1$  veces.

Ejemplo:

Determine el residuo de:

$$f(z) = \frac{2z}{(z^2 + 1)(2z - 1)}$$

en cada uno de sus polos en el plano finito  $z$ .

Resolución:

Factorizando el denominador se tiene

$$f(z) = \frac{2z}{(z - j)(z + j)(2z - 1)}$$

así que  $f(z)$  tiene polos simples en  $z=j, -j$  y  $z = \frac{1}{2}$ .

Por la Ecuación 4, se obtiene el residuo en  $z=j$

$$\begin{aligned} &= \lim_{z \rightarrow j} (z - j) \frac{2z}{(z - j)(z + j)(2z - 1)} \\ &= \frac{2j}{2j(2j - 1)} \\ &= -\frac{1 + 2j}{5} \end{aligned}$$

Se obtiene el residuo en  $z=-j$

$$\begin{aligned} &= \lim_{z \rightarrow -j} (z + j) \frac{2z}{(z - j)(z + j)(2z - 1)} \\ &= \frac{-2j}{-2j(-2j - 1)} \\ &= -\frac{1 - 2j}{5} \end{aligned}$$

Obtenemos el residuo en  $z = \frac{1}{2}$ .

$$\begin{aligned} &= \lim_{z \rightarrow \frac{1}{2}} \left(z - \frac{1}{2}\right) \frac{2z}{(z - j)(z + j)\left(z - \frac{1}{2}\right)} \\ &= \frac{\frac{1}{2}}{\left(\frac{1}{2} - j\right)\left(\frac{1}{2} + j\right)} \\ &= -\frac{2}{5} \end{aligned}$$

Nótese en este caso la importancia de expresar  $2z-1$  como  $2\left(z - \frac{1}{2}\right)$ .

### 3. APLICACIONES

#### Series de Taylor

#### 3.1 Aproximación de funciones mediante polinomios

Al realizar una aproximación con una serie de Taylor se realiza una suma finita; Es decir, escoger el grado hasta el que se desarrollará el polinomio.

La exactitud de la aproximación aumenta con el grado de la serie.

Se obtiene una aproximación de la función por medio del polinomio de Taylor de grado 2 en  $z=8$ .

Así, derivar y evaluar con  $z=8$

$$\begin{aligned} f(z) &= \sqrt[3]{z} \\ (z) &= x^{\frac{1}{3}} \Rightarrow f(8) = 2 \\ f'(z) &= \frac{1}{3} x^{-\frac{2}{3}} \Rightarrow f'(8) = \frac{1}{12} \\ f'(z) &= \frac{1}{3} x^{-\frac{1}{3}} \Rightarrow f'(8) = \frac{1}{12} \\ f''(z) &= -\frac{2}{9} x^{-\frac{5}{3}} \Rightarrow f''(8) = -\frac{1}{144} \end{aligned}$$

En estos términos, el polinomio de Taylor de segundo grado es:

$$T_2(z) = f(8) + \frac{f'(8)}{1!}(x - 8) + \frac{f''(8)}{2!}!(x - 8)^2$$

#### 3.2 Estimación de integral definida

Usar una serie de potencias para calcular un valor aproximado de:

$$\int_0^1 e^{-z^2} dz$$

La serie de la función  $e^z$  es sencilla de hallar.

Para hallar la serie de  $e^{-z^2}$  lo más recomendable y para simplificar cálculos se sustituyen  $z$  por  $-z^2$  en la serie de la

función conocida y se obtiene [4].

$$e^{-z^2} = 1 - z^2 + \frac{z^4}{2!} - \frac{z^6}{3!} + \frac{z^8}{4!} - \dots$$

Al reemplazar la serie en la integral, se tiene:

$$\int_0^1 e^{-z^2} dz = \left[ z - \frac{z^3}{3} + \frac{z^5}{5 \cdot 2!} - \frac{z^7}{7 \cdot 3!} + \frac{z^9}{9 \cdot 4!} - \dots \right]_0^1$$

$$= 1 - \frac{1}{3} + \frac{1}{10} - \frac{1}{42} + \frac{1}{216} - \dots$$

Sumando los cuatro primeros términos se tiene [4].

$$\int_0^1 e^{-z^2} dz \approx 0,74$$

### 3.3 Cálculos de límites

Otra aplicación de las series de Taylor es el cálculo de límites

Ejemplo:

Evaluar:

$$\lim_{z \rightarrow 0} \frac{e^z - 1 - z}{z^2}$$

como

$$e^z = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{z^n}{n!}$$

entonces

$$\lim_{z \rightarrow 0} \frac{e^z - 1 - z}{z^2}$$

$$= \lim_{z \rightarrow 0} \frac{\left(1 + \frac{z}{1!} + \frac{z^2}{2!} + \frac{z^3}{3!} + \dots\right) - 1 - z}{z^2}$$

$$= \lim_{z \rightarrow 0} \left(\frac{1}{2} + \frac{z}{3!} + \frac{z^2}{4!} + \frac{z^3}{5!} + \dots\right)$$

$$= \frac{1}{2}$$

$$y(x) \approx y(x_0) + y'(x_0)(x - x_0) + \frac{y''(x_0)(x - x_0)^2}{2!}$$

$$+ \frac{y'''(x_0)(x - x_0)^3}{3!} + \dots$$

### 3.4 Resolución de ecuaciones diferenciales:

Sea la ecuación diferencial ordinaria y el valor inicial:

$$\begin{cases} \frac{dy}{dx} = f(x, y) \\ y(x_0) = y_0 \end{cases}$$

La integral está dada por la aproximación de  $y=y(x)$

$$y(x) \approx y(x_0) + f(x_0, y_0)(x - x_0)$$

$$+ \frac{f'(x_0, y_0)(x - x_0)^2}{2!}$$

$$+ \frac{f''(x_0, y_0)(x - x_0)^3}{3!} + \dots$$

Se puede aproximar la solución de la ecuación diferencial (función) para un punto cercano al valor inicial, centrando una serie de Taylor en el valor inicial en este punto.

### Residuos

Tiene aplicaciones en matemática aplicada y física.

Es útil para cálculo de varios tipos de integrales reales. Como:

### Integrales de la forma:

$$\int_0^{2\pi} f(\cos\theta, \sin\theta) d\theta$$

### Integrales impropias:

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx$$

## 4. RESULTADOS Y PROGRAMA EN MATLAB

Se realiza el programa Matlab utilizando MuPAD y Guide con el objetivo de obtener las expansiones en series de Taylor y Laurent, una vez que el usuario ingrese la función analítica a ser analizada.

La programación es orientada con la finalidad de tener un cálculo simbólico coherente con los resultados que el estudiante debe alcanzar al desarrollar sus ejercicios en su cuaderno de apuntes.

A continuación, se presenta los resultados de los trabajos realizados.

### Serie de Taylor

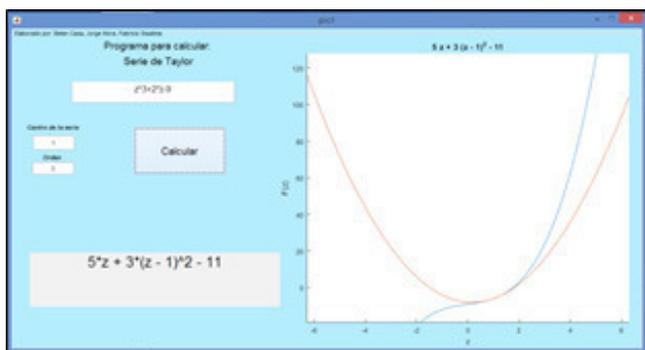


Figura 1. Interfaz para la aproximación de una función mediante Serie de Taylor

### Serie de Laurent

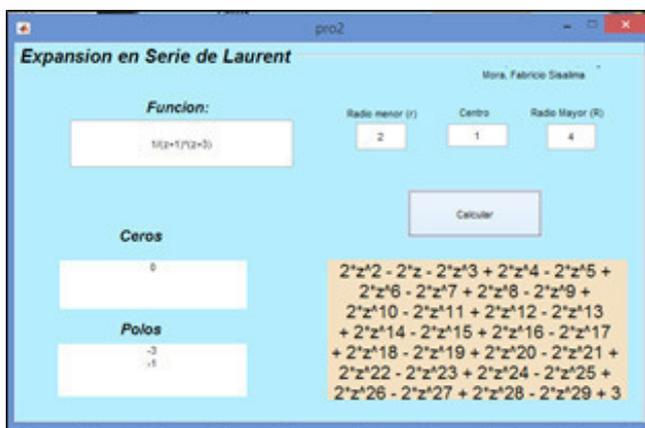


Figura 2. Interfaz que muestra la expansión en Serie de Laurent

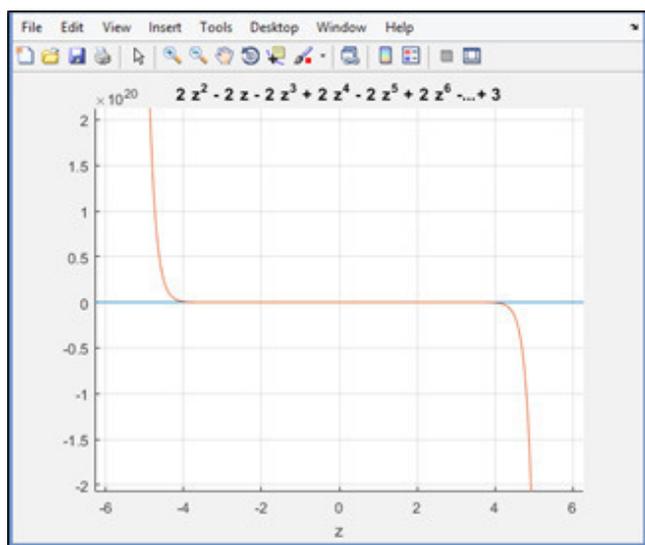


Figura 3. Interfaz para la expansión de la serie.

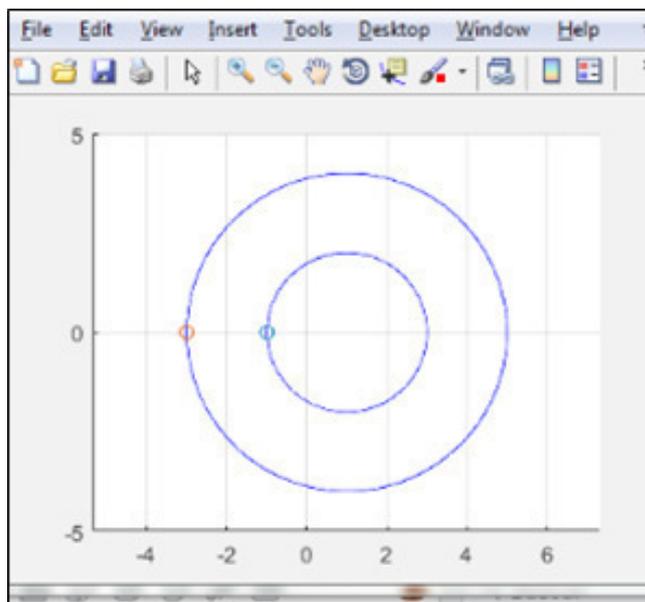


Figura 4. Interfaz para visualizar el círculo de convergencia y los puntos singulares

## 5. CONCLUSIONES

- Se puede evidenciar que una función puede ser expandida dependiendo del caso en una serie de Taylor o Serie de Laurent.
- El programa de Matlab permite comprobar si la serie obtenida de cualquier tipo de función (analítica o no) es de Taylor o Laurent; además que sus resultados concuerdan con el desarrollo manual realizado por los estudiantes.
- El módulo didáctico facilita el proceso de enseñanza-aprendizaje del estudio de series, polos y residuos en el plano complejo.

## 6. REFERENCIAS

- [1] G. James, Matemáticas Avanzadas para la Ingeniería, Pearson Educación, México, 2da edición, 2002, p. 59.
- [2] D. Zill, M. Dewar, Matemática avanzada para la ingeniería 2, McGraw-Hill, 2008, pp. 489-504.
- [3] P. O'Neil, Matemática Avanzada para la ingeniería 2, Mc. Graw Hill, 2008, pp. 489 - 504.
- [4] L. Sanguña, A. Garces, C. Caguana, B. Ausay, Aplicaciones de Series de Taylor y Maclauri, [online]. Disponible en: <http://documents.tips/documents/cionesdeseriesdetaylorymaclaurin.html>.

## 7. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Wilson Marcelo Román Vargas  
 Doctor en Matemática, Magíster en Matemática Aplicada, Magíster en Informática Aplicada, Diplomado en Estadística Informática, Diplomado en Gestión del Aprendizaje Universitario, Docente tiempo completo del Departamento de Ciencias Exactas de la ESPE Extensión Latacunga.



<sup>2</sup>Norma del Pilar Barreno Layedra  
 Ingeniera en sistemas, Magister en Matemática Básica, Diplomado en Docencia matemática, Docente tiempo parcial del Departamento de Ciencias Exactas de la ESPE Extensión Latacunga.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	28 julio 2016
Fecha aceptación	19 diciembre 2016

## **PROTOTIPADO DE UN AEROGENERADOR DE FLUJO TURBULENTO ORIENTADO A SUMINISTRO ENERGÉTICO PARA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA DE BAJA ESCALA**

### **PROTOTYPE OF A TURBULENT FLOW WIND TURBINE ORIENTATED TOWARS THE ENERGY SUPPLY FOR AGRICULTURAL PRODUCTION OF LOW SCALE**

*Germánico Sinchiguano Molina<sup>1</sup>, Vicente Córdova<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE – Unidad de Gestión de Tecnologías, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n. – Latacunga – Ecuador.*

<sup>2</sup> *Universidad Técnica de Cotopaxi*

*e – mail : <sup>1</sup>gsinchiguano@espe.edu.ec, <sup>2</sup>vicente.cordova@utc.edu.ec*

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 8 (15)

#### **RESUMEN**

La investigación se encuentra direccionada al desarrollo del diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento con la finalidad de proveer el punto de partida hacia una fuente de suministro energético para producción agrícola familiar, basándose en el análisis de captación de origen eólico dentro de esquemas de giro por eje vertical y denominación de perfiles aerodinámicos NACA. Para la comprensión inicial teórico – técnica del fenómeno se realizó una investigación de tipo bibliográfica, donde se recabó una cantidad determinada de información teórica, que serían posteriormente completados con la esquematización de un marco metodológico de medición de indicadores mediante instrumentación especial, la misma que permitirá pre visualizar el fenómeno dentro de las inmediaciones del emplazamiento correspondiente al Campus CEYPSA sector SALACHE. Apartir de la información recolectada, se realiza el análisis de selección de perfiles aerodinámicos de acuerdo a sus características de comportamiento, finalizando el proyecto con la construcción de un prototipo a partir del marco propositivo, adicionando un estudio concluyente de factibilidad económica, compatibilidad con el medio

circundante y análisis por simulación del viento como un fluido dentro de un software especializado.

#### **Palabras clave**

*Captación eólica, Flujo Turbulento, Suministro energético, Perfil aerodinámico NACA.*

#### **ABSTRACT**

This investigation was mainly directed to the development of the design and prototyping of a wind turbine for turbulent flow, in this case especially to develop the starting point to provide an energetic supply for familiar agricultural production, based in the air flow catchment analysis inside vertical axis schemes and selection of NACA aerodynamic profiles. For an initial technical and theoretical comprehension of the phenomenon a bibliographic investigation was made where determined theoretical information was recollected. This information was later completed with a measurement methodological frame of airflow indicators through special equipment, which would provide to see a previous phenomenon within the site where is located in CEYPSA place in Salache town. Since the gotten information along

the methodological frame, a selection of aerodynamic profiles according to behavior characteristics was made. This project finishes with the construction of a vertical axis wind turbine prototype. At the end, the investigator presents an economic feasibility study surrounding compatibility and the software simulation results of the air as a fluid object.

## Keywords

*Airflow Catchment, Turbulent Flow, Energetic Supply, NACA Aerodynamic Profiles.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Más allá de las dificultades que se presentan en el medio productivo agrícola, se han venido desarrollando una serie de oportunidades de inclusión de medios de generación energética a partir de la utilización de fuentes renovables no convencionales, como representan la energía solar fotovoltaica, solar térmica, eólica, geotérmica de baja y mediana entalpía, la biomasa entre otros, aprovechando así cada vez más la producción energética proveniente de la misma naturaleza, siendo su mayor potencial su carácter inagotable.

Tal como lo señala la (F.A.O., 2014), para seguir el paso de la creciente demanda interna de alimentos, cumplir los requisitos necesarios para mejorar la competitividad y, en definitiva, aumentar los ingresos rurales, hace falta aumentar la productividad agrícola. Sin embargo, tal como hace hincapié la (F.A.O., 2014), en la mayoría de los casos el crecimiento agrícola sostenido requiere considerables inversiones en riego e infraestructura rural, y en desarrollo humano e instituciones.

Desde la perspectiva inicial de la problemática observada, se evidencia que existe un crecimiento acelerado del uso de la generación distribuida,

sin embargo, la falta de recursos en los sectores aledaños de las ciudades y la falta de gestión de las autoridades, ha hecho que la energía eléctrica no llegue a estos sectores. Por tal razón, las personas de estas zonas recurran a energías alternativas, en especial por la necesidad de la introducción de fuentes renovables de energía.

El diagnóstico inicial sectorial presenta debilidades permanentes ya que consumo energético general de la zona centro del Ecuador ha dependido principalmente de la introducción en masa de tecnología por parte del Gobierno [1]. De forma paralela, el crecimiento económico de una región requiere una gran demanda de energía, ya que es necesario construir infraestructuras de todo tipo, lo que exige la industria pesada, la cual requiere, a su vez, grandes cantidades de materia prima y, claro está, de energía.

La energía eólica, transformada en energía mecánica ha sido históricamente aprovechada, pero su uso para la generación de energía eléctrica es más reciente, existiendo aplicaciones de mayor escala desde mediados de la década del 70 en respuesta a la crisis del petróleo y a los impactos ambientales derivados del uso de combustibles fósiles. Son pocos los países en vías de desarrollo que han creado políticas para la implementación de la energía eólica [1] [2], a pesar de sufrir graves problemas de demanda de electricidad, especialmente en el sector rural.

Desde una perspectiva local, en el Ecuador la implementación de sistemas de eficiencia energética en el campo laboral y productivo de la agricultura se encuentra en un proceso de madurez reciente, razón por la cual la introducción de un proyecto de eficiencia energética como el presentado en el proyecto científico pretende establecer una

herramienta de aporte potencial e innovación, apoyado en el diseño y prototipado inicial de un aerogenerador de flujo turbulento, mediante la captación efectiva y sustentable de las cualidades expresas por el viento y su naturaleza, en el Campus CEYPSA sector SALACHE de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi, con la finalidad de lograr una independencia energética para los moradores de la zona inicialmente, pudiendo ser aplicada posteriormente en otros sectores del país.

Es necesario mencionar que en el sector existen terrenos áridos, lo que hace que las familias del sector dependan mucho de la lluvia [20]. Es evidente la falta de energía eléctrica y la falta de tecnología apropiada para aprovechar el beneficio de la energía que en este caso proporciona el viento para que las familias afectadas puedan tener una autonomía energética.

## 2. DESARROLLO

En el marco contextual y teórico, para su correcta estructuración es indispensable señalar una serie de trabajos investigativos realizados previamente, los mismos que conforman el punto de inicio hacia el establecimiento efectivo del tema a analizar [3]. Tal como lo indican la producción de alimentos agrícolas presentan diferentes barreras desde la necesidad de suelos fértiles, cantidad de agua, laboreo, condiciones climáticas adecuadas, rudeza de las condiciones laborales, secado de los productos para su conservación hasta la posibilidad de la fuerza de trabajo disponible.

Se parte de propuestas de tecnologías conocidas internacionalmente [4] [5], como torre solar eólica, el secado solar y el cultivo en invernadero, las dos primeras no tan bien conocidas como el cultivo intensivo y controlado

usado tanto en países cálidos como en templados, dichas tecnologías unidas a la existencia de chimeneas abandonadas de los centrales azucareros cubanos y fuerza de trabajo disponible alrededor de la antigua industria, permiten la posibilidad de una segura y estable producción agrícola, incluido el secado de sus productos.

La aplicación de sistemas de energía renovable no convencional, se indica como antecedente principal [8] denominada "Instalación Eólico-fotovoltaica para suministro eléctrico a un sistema de riego por goteo para uso agrícola" cuya finalidad fue la de poder aplicar medios de energía renovables no convencional, en este caso eólico – solar fotovoltaico, para la implementación en un sistema de riego por goteo, el mismo que es de uso extendido dentro del campo de la producción agrícola.

## 3. MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo conceptual de diseño y prototipado de un aerogenerador de flujo turbulento orientado a un suministro energético para producción agrícola familiar se basa en la configuración inicial propuesta por los aerogeneradores de eje vertical de tipo Sanovius, especialmente el esquema desarrollado para aerogeneradores Windspire, cuyas características principales de composición son:

- El aerogenerador Windspire opera en zonas con velocidades promedio del viento de por lo menos 4,5 m/s (10 mph), siendo de máxima predilección emplazamientos que excedan los 5,4 m/s (12 mph).
- A velocidades de viento superiores a 3,5 m/s, el Windspire comenzará a producir energía, que se mide en vatios (W) o kilovatios (kW), con la

principal característica de que una Windspire de 1,2 kW producirá 2000 kWh en vientos promedios de 5 m/s.

- Los aerogeneradores windspire operan con tres juegos de altas y estrechas superficies de sustentación que capturan el viento mientras que hace girar el sistema alrededor de un eje vertical.
- Los sistemas Windspire pueden funcionar en un rango de velocidades entre 3 – 11 m/s. A velocidades superiores a los 11 m/s el sistema de frenado electrónico participará como medida de seguridad, para protección ante la presencia de rafagosidad variable, turbulencia destructiva y vientos huracanados.

De la información recogida se evalúan estostrestiposdealternativasdesolución a la problemática establecida [17] [18], como se señala de forma individual y comparativa final dentro de la tabla 1.

Tabla 1. Caracterización de alternativas de diseño.

NACA 0015
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Perfil simétrico.</li> <li>• Máximo espesor de 15 % de la cuerda.</li> <li>• Posición de la máxima deflexión de la línea de curvatura como un porcentaje de <math>c = 0\%</math>.</li> <li>• Máxima deflexión de la línea de curvatura <math>X_{cmax} = 10\%</math>.</li> <li>• Espesor de perfil <math>t</math> como un porcentaje de <math>c = 15\%</math>.</li> <li>• Coeficiente de presión en el borde de ataque son los mismos en el extradós como el intradós.</li> </ul>
NACA 0018

- Perfil simétrico (00).
- Máximo espesor del 18% de la cuerda.
- Posición máxima de deflexión  $c = 0\%$ .
- Máxima deflexión de la línea de curvatura  $X_{cmax} = 10\%$ .
- Espesor del perfil  $t$  como un porcentaje de  $c = 18\%$ .
- Bajo coeficiente de sustentación máximo.
- Momento de cabeceo alto.

NACA 0021

- Perfil simétrico de 21% de grosor.
- Punto de máximo espesor ubicado en  $x/c=0,30$  donde  $x$  es la coordenada axial medida del frente del asa y  $c$  es la longitud de la cuerda.
- Posición máxima de deflexión  $c=0\%$ .
- Máxima deflexión de línea de curvatura  $X_{cmax}=10\%$ .
- Espesor de perfil  $t$  como un porcentaje de  $c=21\%$ .
- Buena característica de parada.
- Pequeño centro de movimiento de presión.
- Rugosidad con poco efecto.

Para la especificación de las alternativas de solución, a continuación en la Tabla 3 se especifica la tabla de comparación ponderada por pares de requerimiento de ingeniería y diseño de medios de captación eólicos por eje vertical y tipología Savonius [14] [15], además en la tabla 4 hace mención a la selección de alternativas del proyecto planteadas y finalmente en la tabla 5 se provee los medios de selección por alternativas de proyecto planteadas por criterios de prioridad y sumatoria de eventos.

Tabla 2. Tabla ponderada por pares de requerimiento de ingeniería.

Deformaciones y vibraciones	Resistencia a la fatiga	Resistencia a la torsión	Espesor relativo del perfil	Coefficiente de sustentación máximo	CRITERIOS	Análisis de materiales de aplicación
1	0,5	0,8	1		Coefficiente de sustentación máximo	0,7
0,8	0,6	0,7		1	Espesor relativo de perfil	0,5
1	1		0,5	0,7	Resistencia a la torsión	1
0,9	0,9	0,5	1	1	Fiabilidad estructural	0,5
0,7		0,7	1	0,9	Resistencia a la fatiga	0,9
	1	1	0,8	0,7	Deformaciones y vibraciones	1
0,6	0,9	1	0,9	0,8	Medios de fabricación y estructura	0,8
1	0,8	0,8	0,6	1	Análisis de materiales de aplicación	
7,0	6,7	6,5	6,8	7,1	E+1	57,8
0,12	0,12	0,11	0,12	0,12	Ponderación	0,94
						0,11

Tabla 3. Tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas.

Perfil aereodinámico NACA 0021	Perfil aereodinámico NACA 0018	Perfil aereodinámico NACA 0015	TABLA DE ASIGNACIÓN DE ALTERNATIVAS DEL PROYECTO
4	5	5	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN MÁXIMO
3	4	4	ESPESOR RELATIVO DE PERFIL
4	4	5	RESISTENCIA A LA TORSIÓN
3	5	4	FIABILIDAD ESTRUCTURAL
4	4	5	RESISTENCIA A LA FATIGA
4	5	5	DEFORMACIONES Y VIBRACIONES
3	4	5	MEDIOS DE FABRICACIÓN Y ESTRUCTURA
3	3	5	ANÁLISIS DE MATERIALES DE APLICACIÓN
28	34	38	TOTAL

Tabla 4. Tabla de selección de alternativas del proyecto planteadas.

Perfil aerodinámico NACA 0021	Perfil aerodinámico NACA 0018	Perfil aerodinámico NACA 0015	Criterios
0,48	0,6	0,6	COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN MÁXIMO
0,36	0,48	0,48	ESPESOR RELATIVO DE PERFIL
0,44	0,44	0,55	RESISTENCIA A LA TORSIÓN
0,36	0,60	0,48	FIABILIDAD ESTRUCTURAL
0,48	0,48	0,60	RESISTENCIA A LA FATIGA
0,48	0,60	0,60	DEFORMACIONES Y VIBRACIONES
0,36	0,48	0,60	MEDIOS DE FABRICACIÓN Y ESTRUCTURA
0,33	0,33	0,55	ANÁLISIS DE MATERIALES DE APLICACIÓN
3,29	4,01	,46	E
3	2	1	PRIORIDAD

#### 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

##### *Análisis de incertidumbre en la medición eólica.*

Las mediciones indican en el porcentaje de medidas correctas o válidas para su análisis, cuya influencia por medios externos como la ocurrencia de elementos meteorológicos de interrupción de medida no las permite tomarse en cuenta, y un porcentaje final de mediciones no válidas por medios ya indicados, expuestos dentro de la tabla 5.

Tabla 5. Estudio de incertidumbre de la medición eólica.

Estudio de incertidumbre de la medición eólica.						
	JUN.	JUL.	AGO.	SEPT.	OCT.	NOV.
TOTAL MEDICIONES	720	744	744	720	744	720
MEDICIONES VÁLIDAS	672	687	698	694	687	656
PORCENTAJE VÁLIDO	93,33%	92,34%	93,82%	96,39%	92,34%	91,11%
MEDICIONES NO VÁLIDAS AGENTES EXTERNOS	37	25	32	23	21	49

PORCENTAJE NO VÁLIDO	5,14%	3,36%	4,30%	3,19%	2,82%	6,81%
MEDICIONES NO VÁLIDAS INCERTIDUMBRE	11	32	14	3	36	15
PORCENTAJE NO VÁLIDO	1,53%	4,30%	1,88%	0,42%	4,84%	2,08%
TOTAL	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

### Distribución de velocidades.

Después del análisis del emplazamiento, tanto en longitud, latitud, altitud, y la densidad del aire, se procede a la clasificación de la información obtenida por el Data Logger de la herramienta de medición, desde una perspectiva general promedio de velocidades mensuales como se indica en la Tabla 6.

Tabla 6. Registro ménsula de velocidades Junio 2015 -Noviembre 2015.

CAPTACIÓN EÓLICA GLOBAL PROMEDIO						
JUNIO 2015 - NOVIEMBRE 2015						
	jun-15	jul-15	ago-15	sept-15	oct-15	nov-15
PROMEDIO MENSUAL	1,10	0,93	0,94	0,90	0,92	0,91
PROMEDIO PRODUCTIVO	1,94	1,56	1,53	1,46	1,51	1,49
VALOR MÁXIMO MENSUAL	3,07	2,40	2,35	2,86	2,45	2,36

La variación entre las medidas mensuales es el promedio mensual, promedio productivo y valor máximo, entre sus puntos máximos y mínimos es de 18,18% en el primer caso, 24,74% en el segundo y 23,45% en el último parámetro respectivamente. De esta forma, en la figura 1 se observa la variabilidad del viento en los meses analizados.

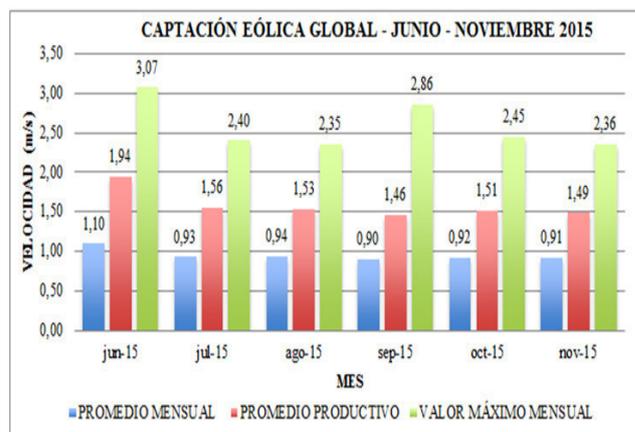


Figura 1. Variabilidad de la captación eólica global.

### Porcentual de ocurrencia de velocidades.

De la obtención del perfil promedio de velocidades por horario, se obtiene el porcentual de ocurrencia de velocidades por horario correspondiente al gráfico de variabilidad de la velocidad del viento, formando perfiles que en muchos de los casos son similares en la mayoría de los meses, existiendo variación en ocasiones cuando la presencia de temporales es muy alta, en cambios de estación climática o en medios de medición donde la afección de agentes externos ha sido elevada en esos tiempos, registrándose dichos datos en la tabla 7.

Tabla 7. Porcentual de ocurrencia de velocidades.

VELOCIDAD M/S	JUN. %	JUL. %	AGO. %	SEP. %	OCT. %
0 - 1	41,50	46,1	52,5	51,23	48,23
1 - 2	40,2	53,9	47,5	48,77	51,77
2 - 3	17,3	0,00	0,00	0,00	0,00

Con base en el porcentual de ocurrencia de velocidades [4] [5], cuyos porcentajes están expuestos dentro de la tabla anterior, se expone a continuación la distribución de Weibull dentro del promedio productivo de captación para el respectivo emplazamiento, tal como se observa en la figura 2.

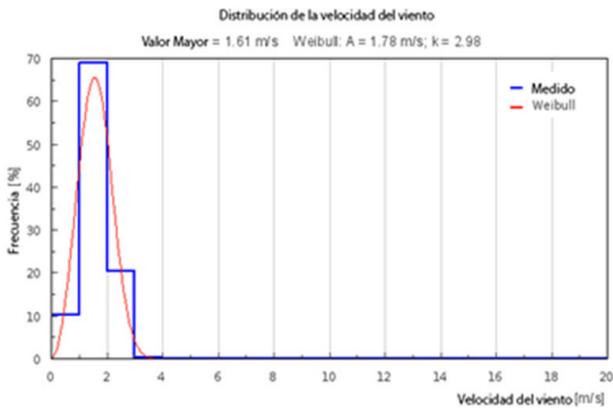


Figura 2. Distribución de weibull - promedio productivo

**Potencia adquirible y eficiencia del aerogenerador.**

A partir de las deducciones anteriores, de forma teórica se desprende la potencia eólica disponible, para utilización de este parámetro dentro del campo factible de la institución de proyectos eólicos, aparece la conformación de la terminología técnica denominada “potencia eólica aprovechable”.

El cumplimiento de la ecuación (1) de la conservación de la masa ocasiona que no toda la potencia disponible del aire pueda ser utilizada, siendo afectada por las pérdidas mecánicas en la transmisión y la eficiencia mecánica del sistema de

transformación de la energía cinética en energía mecánica. La obtención paramétrica de la potencia adquirible del viento parte de la ecuación:

De esta forma en las ecuaciones (1) y (2), teniendo un registro de velocidades cuya incidencia se encuentra en parámetros de velocidades mínima 1 m/s y pico de 3m/s, con una densidad del aire para el sector del desplazamiento de 0,9354 kg/m<sup>3</sup> y un diámetro estimado de captación de 700mm se especifica una potencia disponible mínima y máxima aproximada de:

$$P_{disp-min} = \frac{1}{2} \cdot t \cdot A \cdot v_{min}^3 \quad (Ec.1.1)$$

$$P_{disp-min} = \frac{1}{2} \cdot (0,9354) \cdot (\pi \cdot \frac{(0,7)^2}{4}) \cdot (1)^3$$

$$P_{disp-min} = 0,18W$$

$$P_{disp-max} = \frac{1}{2} \cdot t \cdot A \cdot v_{min}^3 \quad (Ec.1.2)$$

$$P_{disp-max} = \frac{1}{2} \cdot (0,9354) \cdot (\pi \cdot \frac{(0,7)^2}{4}) \cdot (3)^3$$

$$P_{disp-max} = 4,85W$$

La velocidad de arranque mínima del aerogenerador en eje vertical es 1 m/s, manteniendo un régimen nominal de producción promedio de 4,85W a una velocidad de 3 m/s, aún cuando aquí no se considera la medida de coeficiente de eficiencia de producción del aerogenerador.

En cuestión a la facilidad de construcción para introducción de aletas de perfil NACA 15, se seleccionó un medio de construcción de tipo vertical, por lo que de acuerdo a esta disposición de potencia la eficiencia del aerogenerador con este tipo de paletas se encontraría en un rango entre 0,33 y 0,45, basado en los resultados obtenidos de la investigación sobre las velocidades del aerogenerador cuando se encuentra expuesto a

vientos entre 2 y 4 m/s, se determina el comportamiento del aerogenerador conociendo el tipo constructivo del mismo, con seguimiento de las rpm's potenciales que experimentaría, según se verifica en la figura 3 como sistema ideal.

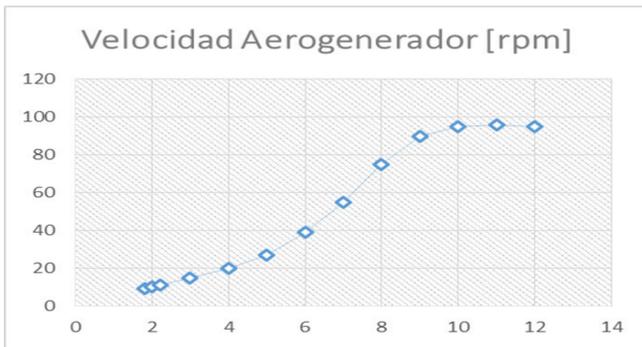


Figura 3. Comportamiento aerogenerador eje vertical rpm's

### Descripción

Se parte de una descripción general de características constructivas del aerogenerador, tomadas de diseños genéricos de prototipos previos desarrollados bajo configuración de eje vertical. Tomando en cuenta la facilidad de diseño [2][3], material de elaboración, resistencia al giro y autoprotección, entre otras características.



Figura 4. Diseño base de construcción de aerogenerador

En la figura 4, el aerogenerador de eje vertical cuenta de 3 perfiles

aerodinámicos [6], los mismos que están sujetos al eje central por medio de dos barras de sujeción (superior e inferior), las cuales posteriormente girarían en dirección de la proyección del viento, para obtención de potencia generada al motor potencial para su uso final [7].

Se requiere un aerogenerador de un torque relativamente bajo, esto lleva a la elección de aquellos generadores que utilizan tecnología Brushless (Figura 5). Esta tecnología elimina todo tipo de carbones o escobillas en los ejes de los motores, reduciendo de gran manera el torque necesario para empezar el movimiento. Son los generadores con mayor eficiencia en el mercado, aunque una desventaja es su costo, ya que son 3 veces más costosos que los generadores convencionales.

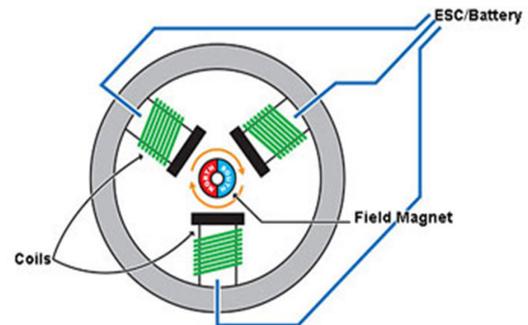


Figura 5. Funcionamiento sistema Brushless en un motor.

El principio de funcionamiento de la tecnología Brushless, que elimina todo tipo de escobillas o carbones entre el estator y rotor, el eje de movimiento (Field Magnet) es acoplado al eje del aerogenerador, y el cambio de polaridad que genera en las bobinas (Coils) hace posible la generación de energía.

### Especificaciones técnicas del motor

Después de una búsqueda de motores potenciales para el proyecto eólico de introducción en medios de producción agrícola, para tener como base para

especificación de características de diseño del aerogenerador, el motor con las características de la tabla 9.

MARCA	SAIAMPOWER
Potencia nominal	50W/150 rpm
Potencia pico	75W
Velocidad de arranque	10 rpm
Velocidad de trabajo nominal	80 rpm
Velocidad máxima de autoprotección	150 rpm
Voltaje Pico	28 VAC
Voltaje nominal	15 VAC
Corriente nominal	15 mA
Corriente piso	36 mA
Ruido	≤ 40 dB
Rotor	
Peso	3KG
Otras características	
Tipo de generador	3-fases AC PM
Tipo de tecnología	Brushless
Temperatura de trabajo	30 - 50 °C

Figura 6. Especificaciones técnicas motor SAV-75W, Fuente: SAIAMPOWER (2015) / Manual de motores.

La caracterización del aerogenerador de eje vertical [16], cuyos esquemas estructurales manejan perfiles aerodinámicos lineales de tipo NACA, así:

- Base rectangular de un metro cuadrado de área, con soportes diagonales para sujeción y ubicación del eje vertical del soporte del aerogenerador, tomando en cuenta una ubicación de separación de los perfiles aerodinámicos con radio de 32,1 cm.
- Patas de sujeción a la superficie de ubicación en tierra con una altura de 42 centímetros, que permiten reducir la influencia del desprendimiento de la capa límite del viento tomado en cuenta como fluido, ya que la ubicación es cercana a una pendiente

pronunciada. La altura del eje es de 1 metro con 6 centímetros incluyendo las sujeciones, con una altura de los perfiles aerodinámicos de 1 metro 50 centímetros, lo que da una altura total de la estructura de 2 metros con 13 centímetros.

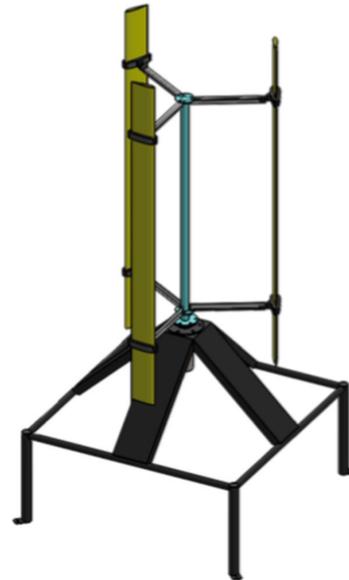


Figura 7. Vista tridimensional diseño estructural del prototipo

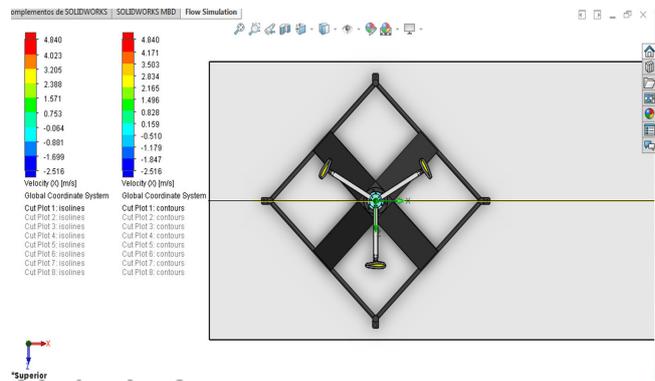


Figura 8. Vista superior primer punto crítico.

En la simulación de la estructura para verificarsu comportamiento con respecto al paso del viento, considerándolo como un fluido, para razón de un primer punto crítico (Figura 8), la simulación de la vista lateral presenta un comportamiento seguro para la captación de la velocidad del viento en este punto, con zonas de

turbulencia menores que no provocarían inconvenientes en la seguridad de la estructura.

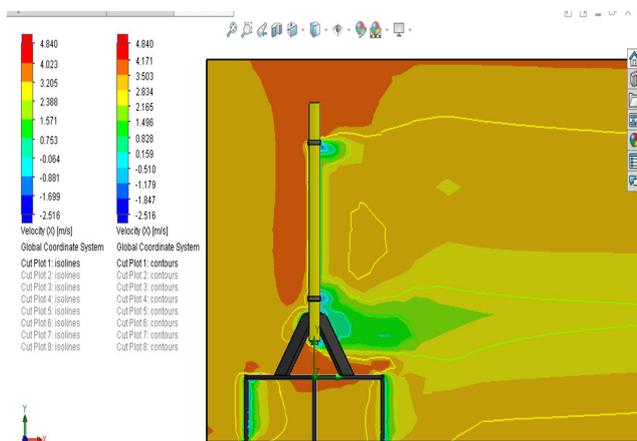


Figura 9. Simulación vista lateral primer punto crítico

En el segundo punto crítico (Figura 9), el comportamiento del aerogenerador a la captación del viento desde un medio horizontal ideal con flujo nominal es mejor aún que en el primer punto crítico. Se evidencian puntos de captación sin interferencia de comportamiento aerodinámico, debido en gran parte a la conformación de la forma de los perfiles bajo estructura NACA 0015.

### **Análisis de selección de materiales y construcción**

Verificando que todos los puntos críticos de la estructura se comportan de acuerdo a los estimado, al momento de la construcción se siguen los medios de análisis de selección de materiales para la elaboración del prototipo [19]. El esquema de construcción por definición de materiales se expone de acuerdo a: Perfiles NACA, brazos sujetadores y del eje principal, base de colocación y parte rígida de soporte a tierra.

Para la construcción de los perfiles NACA, se utilizó un tipo de plástico denominado PLA, cuyas características mecánicas son: altamente resistente a la variación de temperaturas, que es lo

que se requiere para que el generador se encuentre a la intemperie, alta resistencia a la tracción y manejable a altas temperaturas.

El aluminio que se utilizó en los brazos para sujetar a los perfiles NACA, es aluminio con forma de “T” para obtener una mayor rigidez en el centro del brazo y evitar así fatiga mecánica y/o torsión en la longitud del brazo. Las características del perfil en forma de T se especifican dentro de la Figura 10.

Referencia	Base (B)		Altura (A)		Espesor mm	Peso kg/m
	mm	in	mm	in		
1001	25.40	1	25.40	1	1.60	0.219

Figura 10. Características del aluminio – brazos de sujeción, Fuente: Manual CEDAL.

En cuestión del eje vertical, por cuestión de desarrollo y formulación del mejoramiento del comportamiento de la estructura a la resistencia al paso del viento se seleccionó el perfil tubular con las siguientes características presentadas en la Figura 11.

Referencia	Diámetro (D)		Presión		Espesor mm	Peso kg/m
	mm	in	PSI	Km/cm2		
1013	76.20	3	540.54	38.06	1.27	0.810

Figura 11. Características de aleación de aluminio – eje vertical, Fuente: CEDAL

### **Evaluación de Compatibilidad**

Del análisis de influencia con el entorno circundante, su afección de forma directa e indirecta con los medios de contaminación visual [19], auditivo, de interferencia con el hábitat y ecosistemas existentes en el emplazamiento, se evidencian los siguientes factores:

- El impacto visual del emplazamiento es considerado mínimo, en razón a que la estructura mantiene un tamaño disminuido, con la inclusión

de perfiles aerodinámicos NACA 0015 de dimensiones cortas ya que el medio metodológico de captación por eje vertical para su alcance dentro de las metas agrícolas es de pequeña producción.

- La contaminación sonora en el emplazamiento es prácticamente ninguna, considerando que el nivel de giro obtenido por el aerogenerador no alcanza su medida nominal, además que la presencia de perfiles aerodinámicos NACA 0015 ayudan a reducir la oposición del giro al paso del fluido por ella.
- En cuestión a la afección directa e indirecta sobre la fauna y flora que se encuentra cercano al punto de ubicación del prototipo, es importante mencionar que se visualizó poca presencia de medios vegetales y animales en el punto de medición y experimentación, siendo un lugar indicado para la ubicación y posterior utilización del prototipo dentro de medios pedagógicos y de mejoramiento del esquema de captación eólica.

## 5. CONCLUSIONES

- Mediante la revisión bibliográfica, teórica, técnica y metodológica se establecieron las posibles alternativas para generación de electricidad con sistemas convertidores de energía. Un aerogenerador de flujo turbulento orientado a suministro energético para producción agrícola a baja escala.
- Una vez realizado el estudio in situ para el emplazamiento, se evidencia una elevada presencia de velocidades comprendidas entre 1 m/s y 2 m/s con un 69,05% de participación total, seguida con un 20,48% para las velocidades entre 2 m/s y 3 m/s, un 10,24% para las velocidades

iniciales, consideradas de arranque, y un 0,24% final para presencia de velocidades en el rango entre 3 m/s y 4 m/s.

- Los parámetros de diseño de un sistema de aerogeneración orientado al suministro energético para producción agrícola familiar, evaluando la conformación y validación de prototipos efectivos para la solución de la problemática presentada y estructurando la factibilidad de tipo teórico – técnica, económica y de afección social, de manera conjunta con el estudio de la relación costo – beneficio del objeto de estudio.
- La selección de un aerogenerador de eje vertical de tipo Savonius, especialmente el esquema desarrollado para aerogeneradores Windspire como este proyecto, es debido a las velocidades de referencia que está entre 1 m/s y 4,5 m/s, donde además se estableció un juego de tres paletas altas y superficies de sustentación para una mayor aerodinamicidad.
- Se seleccionó como prioridad de construcción el perfil aerodinámico NACA 0015, teniendo como segundas opciones los perfiles NACA 0018 y NACA 0021 en ese orden respectivamente.
- En la velocidad del viento se evidencia un valor mayor de 1,61 m/s, un factor de escala de 1,78 m/s y finalmente un factor de forma de 2,98. Es importante resaltar finalmente que la velocidad máxima medida durante el período de tiempo fue de 5,07 m/s para el mes de junio, siendo el punto de referencia en consideraciones de medios de producción y estabilidad del diseño con respecto al nivel de rafagosidad presente en el emplazamiento.
- Para verificar el comportamiento del aerogenerador en presencia de carga, la simulación de la vista lateral presenta un comportamiento

seguro para la captación de la velocidad del viento en este punto, con zonas de turbulencia menores que no provocarían inconvenientes en la seguridad de la estructura. En un segundo punto crítico, el comportamiento del aerogenerador a la captación del viento desde un medio horizontal ideal con flujo nominal es mejor aún que en el primer punto crítico. Se evidencian puntos de captación sin interferencia de comportamiento aerodinámico, debido en gran parte a la forma de los perfiles de sustentación NACA 0015.

- Los valores de captación eólica en el punto determinado, además de la medición de rpm obtenidas por el mencionado aerogenerador que, dentro del período productivo de medición establecido entre las 13:00 y las 18:00 son: valores en rangos entre 2.2 m/s y 4.9 m/s, habiendo registrado además valores de rafagosidad momentáneos de 6.8 m/s.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Agencia Insular de Energía de Tenerife. (2010). Información general sobre energía eólica. Tenerife, España: AITE.
- [2] Antezana, J. C. (2004). Diseño y Construcción de un prototipo de generador eólico de eje vertical. Santiago de Chile, Chile: Universidad de Chile.
- [3] Arbeloa, L., & Zurita, J. (2012). Diseño de un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius para electrificación rural. Pamplona, España: UPNA.
- [4] Borrel, F. (2013). Revisión de la Ley de Betz. Madrid, España: Independiente.
- [5] Canut, A. M., Guerra, F. J., Guzmán, B., & Struck, A. (2008). Número de Reynolds. México D.F., México: Iberoamericana.
- [6] Castillo, F., Montiel, R., Chacón, M., Chairizi, N., Ramijohn, A., & Barón, R. (2011). Práctica No.2 Perfiles aerodinámicos. Maracaibo, Venezuela: ZULIA.
- [7] Chávez, S. (2010). Diseño de un microgenerador de eje vertical. México D.F., México: UNAM.
- [8] CONELEC. (2014). Desarrollo de la energización rural y la electrificación urbano marginal. Quito, Ecuador: CONELEC.
- [9] Escudero, J. M. (2008). Manual de energía eólica. Madrid, España: Mundi-Prensa.
- [10] FINDER. (2011). El mundo sustentable de las energías renovables. Buenos Aires, Argentina: FINDER COMPONENTES LTDA.
- [11] FING. (2012). Nociones generales de energía eólica. Montevideo, Uruguay: URU.
- [12] Fundación Energías Renovables. (2013). El camino hacia un modelo energético sostenible. Madrid, España: F.E.R.
- [13] Letcher, T. (2012). Small Scale Wind Turbines Optimized for Low Wind Speeds. Columbus, Estados Unidos: The Ohio State University.
- [14] Mattio, & Tilca. (2009). Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección del viento. Buenos Aires, Argentina: CREE.
- [15] Mur Amada, J. (2012). Curso de Energía Eólica. Zaragoza, España: IE.



[16]Pérez Ramírez, R. (2006). Diseño y construcción de un pequeño aerogenerador de 100W para su aplicación en zonas indígenas de México. Zaragoza, España: Unizar.

[17]Rudnick Van De Wyngard, H. (2012). Energía Eólica. La generación eólica. Santiago de Chile, Chile: UCC.

[18]Sánchez, C., Salva, J., Fraga Enrique, & Guevara, P. (1990). Estudio sobre la aplicación de la energía eólica en regadíos con agua a presión en la comarca de ordenación de explotaciones de las islas de Gran Canaria, Fuerteventura y La Palma. Madrid, España: Fundación Universidad Impresa.

[19]Sheldahl, R. E., & Klimas, P. C. (1981). Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Trough 180-Degree Angle of Attack for use in aerodynamic analysis of Vertical Axis Wind Turbines. Albuquerque, Estados Unidos: Sandia National Laboratories.

[20]SOLVENTA. (2004). Introducción a las energías renovables. Santander, España: Independiente.

[21]Studer, I. (2014). Energías Renovables para la competitividad en México. Moterrey, México: IGS.

[22]Suárez, Á. (2010). Generador eólico de eje vertical WM. Madrid, España: WM.

[23]Zenit, R. (2013). Ingeniería de flúidos. La turbulencia. México D.F., México: UNAM.



<sup>1</sup>Sinchiguano M. Germánico. Nacido en la ciudad de Latacunga. Graduado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, en la carrera de Ingeniería en Electromecánica, Docente en la Unidad de Gestión de Tecnologías de la Universidad de las Fuerzas Armadas en la carrera de Electromecánica



<sup>2</sup>Vicente de la Dolorosa Córdova Yanchapanta. Master of Science Ball State University, USA Ball State University, USA 2003 Doctor Of Science Ed. Diss: Regional Scale Carbon Flux Estimation Using Modis Imagery 2005.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	14 mayo 2016
Fecha aceptación	4 diciembre 2016

**7. BIOGRAFÍA**

**MATERIALES COMPUESTOS AVANZADOS UTILIZADOS PARA EL BLINDAJE LIGERO DE VEHÍCULOS****ADVANCED COMPOSITES USED FOR LIGHT ARMOUR OF VEHICLES**Oscar Arteaga<sup>1</sup>, Mauricio Cruz<sup>2</sup>, Euro Mena<sup>3</sup>, Danilo Zambrano<sup>4</sup>, William Bonilla<sup>5</sup><sup>1,2,3,4,5</sup> Universidad de Fuerzas Armadas ESPE - Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.e-mail: <sup>1</sup>obarteaga@espe.edu.ec, <sup>2</sup>mjcruz@espe.edu.ec, <sup>3</sup>ermenam@espe.edu.ec, <sup>4</sup>vdzambrano@espe.edu.ec, <sup>5</sup>wmbonilla@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 9 (15)

**RESUMEN**

En el presente artículo se analizan los materiales compuesto de matriz polimérica reforzada con fibra utilizados en blindajes ligeros tanto flexibles como rígidos, sus mecanismos de absorción de energía y su resistencia al impacto balístico.

El artículo destaca las tecnologías del vidrio S, aramida, HMWPE, PBO y PIPD; fibras de alto rendimiento actuales y futuras utilizadas en aplicaciones para la protección balística corporal y de vehículos, se describe y comparan sus propiedades, sus aplicaciones, ventajas y limitaciones, así como de la influencia de factores ambientales extremos. Asimismo, se describe y compara las propiedades de las resinas utilizadas para blindajes ligeros de material compuesto.

**Palabras clave**

*Materiales compuestos, fibras de alto rendimiento, blindaje, protección balística.*

**ABSTRACT**

This paper analyzes the fiber-reinforced polymer matrix composites used in both flexible and rigid light armors, their energy absorption mechanisms, and their resistance to ballistic impacts. Technologies such as S glass, aramid, HMWPE, PBO and PIPD are highlighted fibers. Existing and future high-performance fibers are described in applications for human and vehicle protection against ballistics. Properties, applications, advantages, limitations and the influence of extreme environmental factors are depicted and compared to finally contrast the properties of the resins used for light composite armors.

**Keywords**

*Composite materials, high-performance fibers, armor, ballistic protection.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Se puede afirmar que hasta mediados del siglo XX, los únicos materiales utilizados para la protección balística, eran: el acero, utilizado en blindajes de vehículos militares de combate, barcos de guerra y cascos para personas; y el hormigón armado, empleado como protección de instalaciones militares fijas, edificios, búnkeres, etc. Sin embargo, en las últimas décadas, los avances en el desarrollo de armas y municiones de gran capacidad de penetración, así como la necesidad de que los sistemas militares modernos sean cada vez más rápidos, más ágiles y más móviles, han supuesto la imposibilidad de los materiales tradicionales de protección balística, afrontar con éxito estas nuevas amenazas y requerimientos [1].

Como consecuencia de lo anterior se ha producido un aumento en la demanda de nuevos materiales para la protección tanto de personas como de vehículos frente al impacto de proyectiles y explosiones, y se ha dado lugar al concepto moderno de blindaje compuesto, el mismo que incluye distintas capas de diferentes materiales con propiedades específicas que buscan optimizar pesos y costos. Es así que, materiales compuestos con fibras de alto rendimiento se han desarrollado para la protección tanto de personas como de vehículos. Por ejemplo, tejidos de fibras son utilizados tanto como blindaje blando para la protección de personas o como refuerzos en materiales compuestos de matriz polimérica rígida para el blindaje liviano de vehículos 4x4 [1]-[2].

Los materiales compuestos pueden utilizarse para la producción de blindajes de dos maneras distintas:

- Como blindaje principal en aplicaciones en las que no se requiere una protección muy elevada pero el peso

del blindaje es sumamente importante. Tal es el caso de chalecos ligeros y cascos que protegen impacto de munición tipo bala o fragmentos.

Como placa posterior de un blindaje capaz de proteger personas y vehículos frente a impactos de gran poder de penetración. En este caso el material compuesto actúa bien sea como sistema de retención de fragmentos o bien sea como liner para retener metralla procedente de la perforación del blindaje principal en el caso de blindajes de acero o de otros materiales de alta dureza.

La resistencia de la protección al impacto balístico de los materiales compuestos utilizados en aplicaciones de blindaje se evalúa normalmente en función de dos parámetros básicos [2]:

- (a) un nivel crítico de velocidad del proyectil o de energía cinética del proyectil (generalmente conocido como el "límite balístico") por debajo del cual ninguna perforación completa de la armadura se lleva a cabo, y
- (b) un grado en el que la resistencia del material al impacto balístico se ve comprometida en los sistemas de blindaje que están parcialmente penetrados o cuya superficie de impacto está dañado por el proyectil.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Mecanismos de absorción de energía de los composites

La cantidad de energía absorbida por las fibras depende en gran medida de su deformación a la rotura, como se muestra en la figura 1a. [2]. Por lo tanto, se requiere una estera de fibra con alta resistencia y alto alargamiento a la rotura para absorber la energía a través de la deformación plástica y el estiramiento de las fibras.

La deformación en una fibra es igual a la velocidad de impacto dividido para la velocidad sónica de la fibra (Ecuación 1) [3].

$$\epsilon = \frac{V}{c} \quad Ec.1$$

donde,

- δ- deformación
- V- velocidad de impacto
- c- velocidad sónica de la fibra

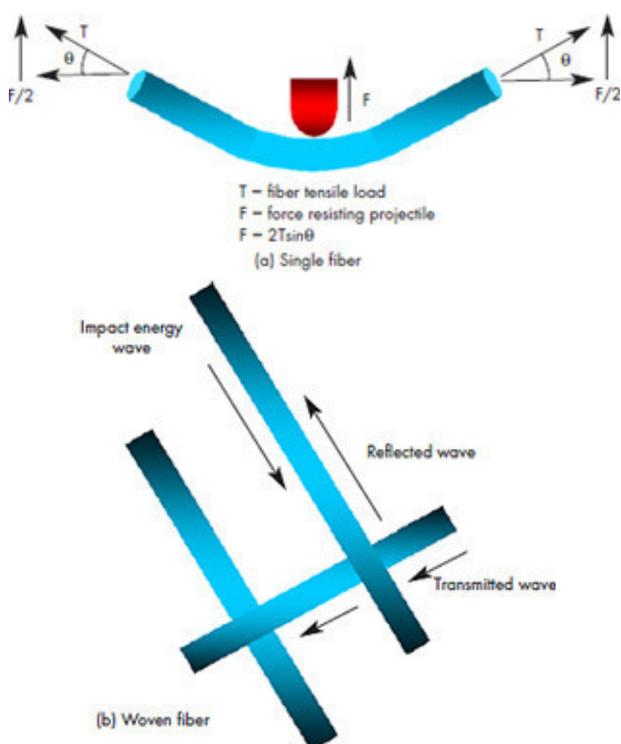


Figura 1. Mecanismo de absorción de energía de la fibra [2]

La velocidad sónica, a su vez, está relacionado con el módulo de elasticidad de la fibra, como se muestra en la Ecuación 2 [1]. Entonces un mayor módulo de elasticidad resulta en que la onda de la energía de impacto viaja más abajo en la longitud de la fibra, debido a una mayor velocidad sónica, y, por lo tanto, un mayor volumen de fibra absorbe la energía del proyectil.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad Ec.2$$

donde,

- E- módulo de elasticidad
- ρ- densidad de la fibra

En la Figura 1b, se muestra como una estera de fibra tejida, es eficaz en la absorción de la carga de impacto mediante la dispersión de la energía a través de la red de fibras. Una vez que las fibras se impregnan en la matriz de resina, su capacidad de deformarse puede verse obstaculizada, y como consecuencia, se puede absorber menos energía.

En los materiales compuestos con matriz polimérica reforzada con fibra, el proceso de fractura se considera que ocurre en dos etapas:

Impacto de alta velocidad que causa compresión localizada del material compuesto, y posteriormente cizallamiento de las fibras y desprendimiento de la resina, como se representan en la figura 2a. Una vez que el proyectil ha desacelerado, el material compuesto se deforma causando estiramiento de la fibra y separación o deslaminación en capas del material compuesto, como se muestra en la figura 2b [2].

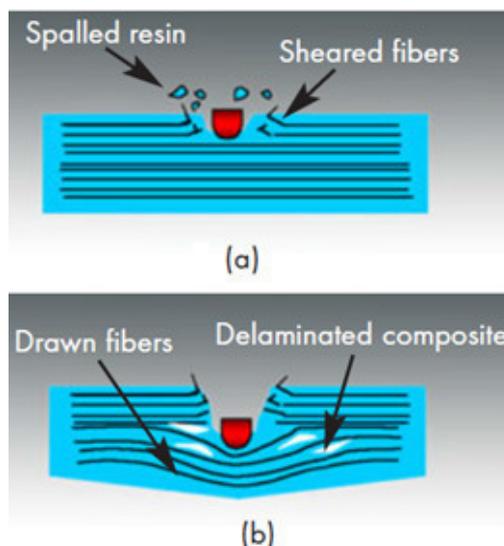


Figura 2. Mecanismos de absorción de energía en materiales compuestos de matriz polimérica reforzado con fibra [2]

Para reducir la deslaminación del material compuesto y limitar los daños solo en una zona pequeña de la matriz, se puede utilizar tejidos de fibra en tres dimensiones [4]. Sin embargo, esto puede resultar también en un incremento en el daño de la fibra debido a una disminución en la resistencia a la compresión después de impacto balístico, y por lo tanto en menor capacidad de resistencia balística.

### Fibras de alto rendimiento

Las fibras de alto rendimiento son un nuevo tipo de fibra, las mismas que, para limitar su deformación, deben poseer una alta rigidez y resistencia. La rigidez de estas fibras es causada por el grado en que los enlaces químicos están alineados a lo largo del eje de la fibra, para lograr la transferencia de la tensión a lo largo de la fibra.

Entre estas fibras se incluyen: vidrio S, aramida, polietileno de alto peso molecular, polibenzobisoxazol, polipiridobisimidazole y fibra de carbono [5].

Para reducir la deslaminación del material compuesto y limitar los daños solo en una zona pequeña de la matriz, se puede utilizar tejidos de fibra en tres dimensiones [4]. Sin embargo, esto puede resultar también en un incremento en el daño de la fibra debido a una disminución en la resistencia a la compresión después de impacto balístico, y por lo tanto en menor capacidad de resistencia balística.

Estas fibras pueden ser tejidas en diferentes configuraciones para proporcionar diversos grados de rendimiento y flexibilidad, algunas de estas configuraciones se ilustran en la figura:

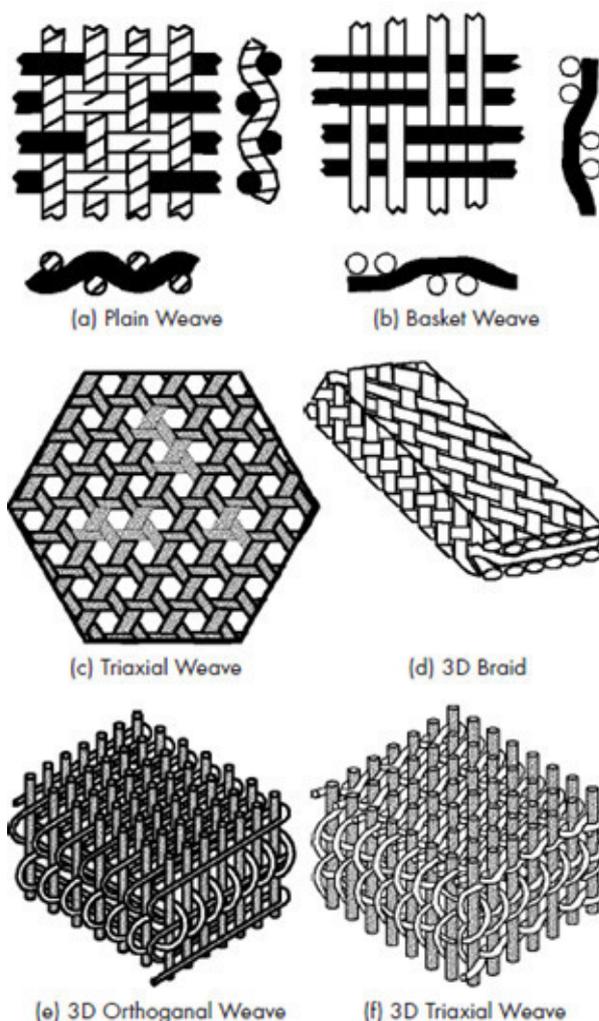


Figura 3. Estructuras de las fibras tejidas [6]

La mayoría de los materiales compuestos reforzados con fibras para aplicaciones de blindaje de vehículos ligeros, consisten en estructuras en configuraciones de tejido unidireccional, llano, o básquet, donde las capas de fibras unidireccionales pueden ser rotados 90° con respecto a las capas adyacentes para crear un tejido de capa cruzada.

Generalmente, tejiendo las fibras no se mejora la resistencia a la penetración de los materiales compuestos, debido a que las fibras están confinadas por la resina y la energía no puede ser transferida eficazmente a las fibras adyacentes. Sin embargo, las fibras tejidas como estructuras

3D, permiten limitar la deslaminación y así mejorar el rendimiento multi-hit del material compuesto [7].

Los materiales compuestos reforzados con fibras de alto rendimiento pueden ser utilizados en la producción de armaduras para la protección de vehículos 4x4 y el rendimiento del blindaje no sólo depende de las propiedades de la fibra y del material de la matriz, sino también de la estructura de la fibra, de su volumen, de la compatibilidad de la fibra con la resina, y de los aditivos.

### **Fibra de vidrio-S**

La fibra de vidrio-S, compuesta de sílice (SiO<sub>2</sub>), alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), y magnesio (MgO), se caracteriza por una resistencia que es más o menos 35 a 40% mayor que la de la fibra de vidrio-E [8].

La fibra de vidrio S-2, que es una fibra revestida, aunque tiene un costo significativamente mayor que la fibra de vidrio-E, se ha convertido en una fibra muy utilizada en aplicaciones de resistencia a la penetración debido a su mayor resistencia, lo que garantiza un mayor rendimiento por unidad de peso.

Fibras de vidrio S-2 se fabrican comercialmente en filamentos con diámetros de 5 a 13 micras y estas mechas se venden bajo el nombre comercial ZenTron. Los productos de vidrio S-2 se utilizan en gran medida en industria de la defensa y aeroespacial, mientras que los productos ZenTron han encontrado aplicaciones en la industria automotriz y la industria de artículos deportivos [8].

Comparadas con las fibras de aramida, las fibras de vidrio S-2 generalmente tienen un rendimiento balístico semejante, a un costo más bajo, pero con mayor peso. La fibra de vidrio S-2 se puede utilizar a temperaturas elevadas

de hasta aproximadamente 1380°F, tiene buena resistencia a la fatiga y a la humedad y una velocidad de fluencia baja, pero puede ser susceptible a la rotura por fluencia [9].

### **Aramida**

Las fibras de aramida al principio se emplearon en forma de tejidos utilizándolas como blindajes flexibles, sin embargo, su problema es la excesiva deformación que presentan frente al impacto de una bala, es decir una deformación muy grande del blindaje que ocasiona daño al cuerpo de la persona. Por tal motivo, pronto se utilizó el tejido de fibra de aramida como refuerzo de materiales poliméricos, principalmente poliéster o vinil éster, de tal manera que se tiene un blindaje rígido en el que el polímero simplemente proporciona la cohesión y reduce drásticamente el trauma [10].

En estos blindajes rígidos de poliéster o vinil éster reforzados con fibra de aramida la resistencia a impacto la ofrece casi con exclusividad la fibra, por lo que, se contenido es muy alto, típicamente por encima del 80% en volumen, de tal manera que la matriz polimérica apenas contribuye a la resistencia a impacto.

Las fibras de aramida fueron introducidas comercialmente por primera vez por DuPont bajo el nombre comercial de Kevlar. Existen otras empresas que también producen fibras de aramida con los nombres comerciales de Twaron y Technora.

La estructura primaria de las fibras de aramida se muestra en la figura 4. Durante los últimos años se han añadido modificadores a la cadena principal de la fibra para mejorar su capacidad de protección, lo que ha permitido que en la actualidad se disponga de varios tipos de fibra de aramida. Kevlar 29, Kevlar 49,

Kevlar 129 y Kevlar KM2, son las fibras de aramida DuPont que se han utilizado más en aplicaciones de blindaje. Es así que, los primeros chalecos antibalas usados por personal militar eran de Kevlar 29, mientras que los chalecos Interceptor que actualmente usan por los soldados en Irak y Afganistán son de fibra de Kevlar KM2 [10].

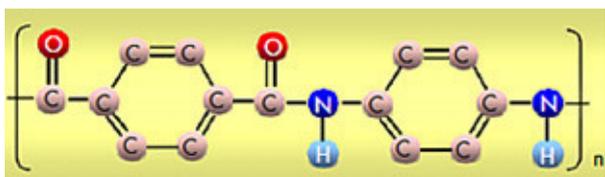


Figura 4. Estructura química de la aramida [10]

Las fibras de aramida presentan una disminución de la resistencia a la tracción cuando se expone al calor o la humedad. A temperaturas superiores a 180°C, se produce una pérdida de resistencia  $\leq 20\%$  [10]. Se han observado pérdidas de resistencia  $\leq 5\%$  en condiciones de alta humedad y temperatura ambiente y  $\leq 10\%$  bajo condiciones de agua caliente, sin embargo; la degradación de la resistencia parece ser reversible. El rango de temperatura de operación va desde -215°C hasta 160°C, con un inicio de degradación térmica que ocurre alrededor de 450°C [11].

Ambientes fuertemente ácidos y alcalinos también atacan a las fibras de aramida. Estas fibras tienen buena resistencia a la fatiga, bajas velocidades de fluencia y son menos susceptibles a la rotura por fluencia que las fibras de vidrio S-2. Por naturaleza las fibras de aramida no se unen bien a las resinas, por lo que suelen ser químicamente revestidas con anterioridad a su incorporación en los materiales compuestos [11].

### **Polietileno de alto peso molecular**

La aparición de la fibra de polietileno de alto peso molecular (HMWPE, por sus siglas en inglés) supuso una nueva revolución en el diseño de blindajes

con materiales compuestos. Esta fibra comercializada con el nombre de Spectra por la empresa Honeywell y, Dyneema por la empresa holandesa DSM, ofrece unas prestaciones balísticas superiores a la fibra de vidrio S-2 y de aramida, y tiene la densidad más baja de todas las fibras que se utilizan actualmente para aplicaciones en blindaje ligeros [5].

El HMWPE es un polímero de etileno con una elevada masa molecular, que se diferencia del material convencional de polietileno por su alta resistencia cuando se utiliza en condiciones extremas. El material es altamente resistente a los corrosivos, puede soportar impacto balístico incluso a temperaturas criogénicas, repele completamente la humedad y no es conductor. Asimismo, el HMWPE es más silencioso que los metales y prácticamente no sufre desgaste, debido a su bajo coeficiente de fricción [10].

Sus limitaciones incluyen la susceptibilidad a la fluencia y la mala resistencia a la compresión. Tienen una temperatura de procesamiento máxima de 120°C, lo que limita la elección de los materiales para la matriz a los termoestables de baja temperatura de curado o resinas termoplásticas [12].

### **Polibenzobisoxazol**

Las fibras de polibenzobisoxazol (PBO) son el resultado de la investigación de la Fuerza Aérea de los EE.UU. durante la década de 1980, cuando buscaban el desarrollo de una fibra más fuerte que las aramidas. La estructura química del PBO se basa en una estructura de varilla rígida como la que se muestra en la figura 5.

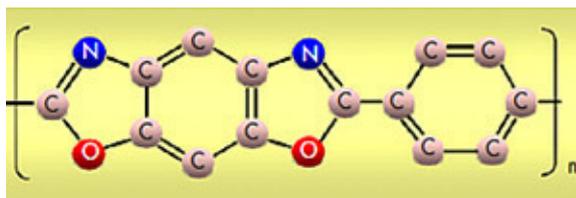


Figura 5. Estructura Química del PBO [10]

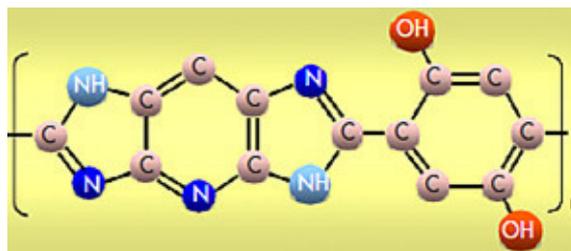


Figura 6. Estructura química del M5 [10]

Las fibras de PBO tienen propiedades de muy alta resistencia a la tracción y mejor resistencia a la penetración que las fibras de HMWPE, pero igual que las fibras de HMWPE, tienen baja resistencia a la compresión. La temperatura de descomposición de las fibras de PBO es de aproximadamente 550°C, en comparación a los 450°C para fibras de aramida [5].

Una fibra de PBO que actualmente se encuentra en el mercado es el Zylon, que en las pruebas ha mostrado que sufre degradación cuando se somete a fuerzas de tracción a temperaturas elevadas y humedad, y cuando se expone a luz ultravioleta [13]. Pérdida del 40% en su resistencia, se produce a una temperatura de 80°C y una humedad relativa del 80%. Investigaciones llevadas a cabo sobre la degradación de las fibras PBO han determinado que este fenómeno está relacionado con su método de fabricación [14].

### Polipiridobisimidazole

La fibra de polipiridobisimidazole (PIPD) denotada como M5 es una fibra de alto rendimiento desarrollado originalmente por Akzo Nobel y producida actualmente por Magellan Sistemas Internacional (Magallanes). La fibra M5 se basa en una estructura de varilla rígida y la unidad de repetición del polímero se ilustra en la figura 6. [15]

La estructura cristalina del M5 es diferente a la de todas las otras fibras de alta resistencia, debido a que las fibras típicas M5 cuenta con unión covalente en la dirección de la cadena principal, pero también cuenta con hidrógeno unido a la red en las dimensiones laterales [14].

Las fibras M5 tienen un módulo de elasticidad promedio de 310 GPa, (aproximadamente 95% más alto que las fibras de carbono) y, una resistencia a la tracción promedio de 5,8 GPa, valor semejante al de las fibras de PBO (como Zylon) y superior a las de aramida (como el Kevlar o Twaron) [15]. Además, debido al fuerte enlace con el hidrógeno intermolecular, su resistencia a la compresión se mejora significativamente sobre el de las fibras de PBO. Su temperatura de descomposición es de aproximadamente 530°C, que es cercana a las fibras de PBO [5].

### Resinas

Las resinas para blindajes livianos con material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibras, pueden ser tanto termoplásticas como termoestables. En general, los termoplásticos ofrecen una mayor resistencia al impacto, pero carecen de la resistencia térmica y química de los termoestables, por lo que, los termoplásticos tienen solo un uso limitado en los sistemas militares de blindaje de componentes para la protección balística de personas [16].

Por otro lado, los blindajes para vehículos ligeros consisten principalmente en

materiales compuestos reforzados con las fibras de alto rendimiento analizadas en este artículo, junto con una resina termoestable como: epoxi, poliéster, éster de vinilo, o resina fenólica [17].

Epoxi, poliéster y éster de vinilo son los materiales principales de las resinas utilizadas en materiales compuestos de grado balístico para vehículos, mientras que las resinas fenólicas se utilizan en aplicaciones que requieren el control del fuego, el humo y la toxicidad. Por lo tanto, en los materiales compuestos para blindaje se utiliza una de las tres resinas termoestable para la protección balística y una placa posterior con resina fenólica para proteger contra el fuego, el humo y la toxicidad [17].

Los epóxidos proporcionan las mejores características estructurales de todas las resinas, y están disponibles en una amplia gama de formulaciones. Tienen excelentes propiedades mecánicas y una buena adhesión a numerosos materiales, pero requieren altas temperaturas de procesamiento para alcanzar un alto nivel de calidad. Poliésteres y ésteres de vinilo son de bajo costo, de fácil procesamiento y con propiedades mecánicas superiores al promedio, pero tienen baja resistencia a la compresión. Como resultado de esta deficiencia, normalmente son relegados a aplicaciones no estructurales [18].

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el objetivo de determinar el material más adecuado para el blindaje liviano de vehículos, se evalúa el rendimiento balístico de las fibras poliméricas de alto rendimiento, con respecto a su capacidad para [5]:

- absorber localmente la energía cinética del proyectil, y
- esparcir de forma rápida la energía absorbida antes de que se alcancen las condiciones locales para la falla.

En términos simples, la capacidad de las fibras de alto rendimiento para absorber energía por unidad de masa, está relacionada con la resistencia a la rotura de la fibra y la deformación hasta la rotura de la fibra, mientras que la capacidad de las fibras para esparcir la energía está gobernada por su velocidad sónica, que se define en términos de su módulo de elasticidad axial, y su densidad.

Un resumen de las propiedades clave de las fibras de alto rendimiento más comúnmente utilizadas para protección balística de vehículos, se presenta en la Tabla 1, donde se observa que las fibras de PBO presentan la mayor resistencia a la rotura, mientras que la fibra de vidrio S tiene la mayor deformación y densidad.

TABLA 1 Propiedades mecánicas típicas de las fibras de alto rendimiento [12]

Fiber type	Failure strength (GPa)	Failure strain	Axial modulus (GPa)	Density (kg/m <sup>3</sup> )
Aramid	2.8-3.2	0.015-0.045	60-115	1390-1440
HMWPE	2.8-4.0	0.029-0.038	90-140	970-980
LCP	2.7-2.9	0.033-0.035	64-66	1400-1420
PBO	5.4-5.6	0.024-0.026	270-290	1540-1560
PIPD	3.9-4.1	0.011-0.013	320-340	1690-1710
Nylon	0.06-0.08	1.5-2.5	1.0-1.5	1070-1170
S-glass	4.64-4.66	0.053-0.055	82-92	2470-2490

En la figura. 7, se muestran los dos parámetros que definen el rendimiento balístico para el mismo conjunto de fibras de alto rendimiento.

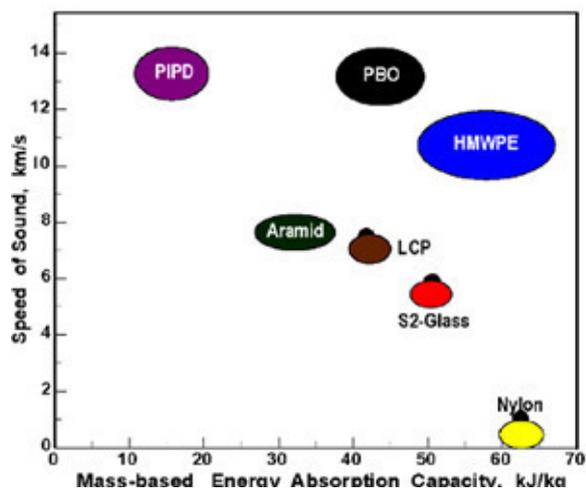


Figura 7. Velocidad sónica vs. Capacidad de absorción de energía para varias fibras de alto rendimiento [12]

Si bien los resultados mostrados en la figura 7 revelan claramente un alto potencial balístico de las fibras de alto rendimiento, sin embargo; la plena utilización de este potencial en la fabricación de materiales compuestos de grado balístico para blindaje de vehículos, constituye un enorme reto debido a que la selección del material más adecuado depende de muchos factores como: la estructura y arquitectura del tejido, el tipo de fibra, la densidad superficial, la fricción fibra-proyectil, el tipo de matriz polimérica, las condiciones de procesamiento y fabricación de los materiales compuestos, la forma, la masa y las propiedades mecánicas del proyectil a ser detenido, etc.

Las fibras de aramida y HMWPE típicamente se utilizan como tejidos para armaduras flexibles corporales o como refuerzos en materiales compuestos para aplicaciones de blindaje rígidos, mientras que el vidrio S-2 se utiliza comúnmente en aplicaciones de blindaje rígido para vehículos ligeros. Las fibras de PBO no se han utilizado para aplicaciones militares, y las M5 todavía están en etapas de desarrollo.

La figura 8a, muestra que los tejidos de fibra Spectra 1000 proporcionan

un rendimiento balístico superior con un peso más ligero que el Kevlar 29, mientras que la figura 8b, muestra que la fibra Spectra 1000 ofrece un mayor nivel de protección con el mismo grosor que el Kevlar 29 hasta aproximadamente 18 mm, donde el nivel de protección proporcionado por las dos fibras es aproximadamente igual. En espesores superiores a 18 mm el Kevlar 29 supera al Spectra 1000 en términos de rendimiento balístico [16].

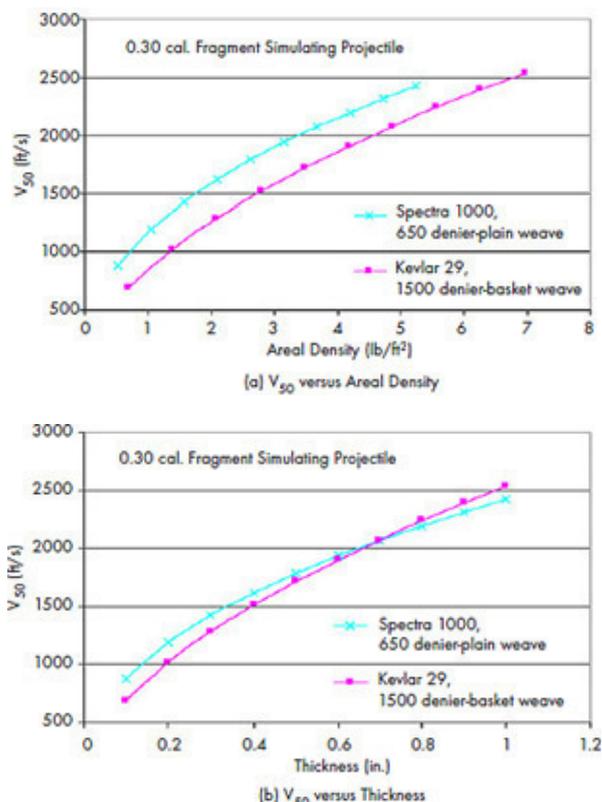


Figura 8. Comparación del rendimiento balístico (V<sub>50</sub>) de las fibras Kevlar 29 y Spectra 1000 [16]

Adicionalmente, la posible liberación de productos químicos tóxicos son preocupaciones relacionadas con los materiales compuestos. Los métodos de procesamiento, tales como moldeo por transferencia de resina, requieren materiales de resina que tengan bajas viscosidades con el fin de que el producto terminado tenga una porosidad baja y, por lo tanto, un buen rendimiento. En el caso de materiales de mayor

viscosidad, como los epoxis, se utilizan altas temperaturas de procesamiento y/o aditivos para producir la baja viscosidad requerida para el procesamiento. Sin embargo, las altas temperaturas de procesamiento conllevan costos más altos y también pueden limitar la selección de fibra, mientras que los aditivos pueden producir subproductos tóxicos.

Las ventajas y desventajas de rendimiento, facilidad de procesamiento, y costos de las resinas, se resumen en la Tabla 2 para las tres resinas estructurales. En la mayoría de las aplicaciones, de blindaje, las resinas de éster de vinilo han sustituido a las resinas de poliéster, ya que son similares en muchas propiedades, pero con el beneficio adicional de tener propiedades mecánicas superiores.

TABLA 2 Comparación de las resinas termoestables [18]

Resina	Ventajas	Desventajas
Poliéster	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Fácil de procesar</li> <li>• Buena resistencia química</li> <li>• Buena resistencia a la humedad</li> <li>• Rápido tiempo de curado</li> <li>• Curado a temperatura ambiente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inflamable</li> <li>• Humo tóxico tras la combustión</li> <li>• Propiedades mecánicas promedio</li> </ul>

Éster de vinilo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Fácil de procesar</li> <li>• Baja viscosidad</li> <li>• Curado a temperatura ambiente</li> <li>• Resistente a la humedad</li> <li>• Buenas propiedades mecánicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inflamable</li> <li>• Libera humo en la combustión</li> </ul>
-----------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------

Epoxi	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excelentes propiedades mecánicas (superior a los ésteres de vinilo)</li> <li>• Buena resistencia química</li> <li>• Buena resistencia al calor</li> <li>• Buenas propiedades adhesivas con un gran variedad de sustratos</li> <li>• Resistente a la humedad</li> <li>• Variedad de composiciones disponibles</li> <li>• Buena resistencia a la fractura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costoso</li> <li>• Requiere altas temperaturas de procesamiento para conseguir buenas propiedades</li> </ul>
-------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### 4. CONCLUSIONES

Los materiales compuestos de matriz polimérica reforzada con fibras de alto rendimiento proporcionan los medios para producir tejidos ligeros para armaduras de los vehículos blindados livianos.

La disponibilidad de diferentes fibras de alto rendimiento y resinas junto con la

capacidad para acoplarse permite una alta versatilidad en el diseño de blindajes ligeros de materiales compuestos.

El rendimiento de las armaduras reforzadas con fibra no sólo depende de las propiedades de la fibra y del material de resina, sino también de la estructura de la fibra, del volumen de fibra, de la compatibilidad de la fibra con la resina y de los aditivos.

El rendimiento balístico de blindajes rígidos para vehículos livianos, fabricado con matriz polimérica reforzada con fibra se atribuye en gran medida a las fibras, por la que maximizar el volumen de la fibra en un material compuesto utilizando la estructura de tejido de rendimiento superior, optimizará el rendimiento balístico del composites. La mayoría de las armaduras de material compuesto tienen volúmenes de fibra superior al 80%.

Los agentes aglutinantes que ayudan a la unión de las fibras con las resinas pueden influir en la resistencia a la penetración del material compuesto. Los aditivos se introducen principalmente para aumentar la resistencia a la fractura del material compuesto. Para este propósito normalmente se utilizan los termoplásticos y los materiales de goma.

## 5. REFERENCIAS

- [1] M. Grujicic, P.S. Glomski, T. He, G. Arakere, W.C. Bell, B.A. Cheeseman. Material modeling and ballistic-resistance analysis of armor-grade composites reinforced with high-performance fibers. *Journal of Materials Engineering and Performance*, ASM International, USA; 2009.
- [2] Paul Hogg. Composites for ballistic applications. *Journal of Composites Processing*, Department of Materials Queen Mary, London; 2003.
- [3] M. Jacobs, J. Van Dingenen. Ballistic protection mechanisms in personal armour. *Journal of Materials Science* 36, Springer; 2001.
- [4] Bruce Fink, Ahmed Monib, John Gillespie, Jr. Damage tolerance of thick-section composites subjected to ballistic impact. *Army Research Laboratory*, USA; 2011.
- [5] Doetze Sikkema, Maurits Northolt, Behnam Pourdeyhimi. Assessment of new high-performance fibers for advanced applications. *Mrs. Bulletin*. USA; 2003.
- [6] F. Ko, A. Geshury. *Textile Preforms for Composite Materials Processing*. Advanced Materials and Processes Information Analysis Center, USA; 2002.
- [7] Richard Lane. High performance fiber for lightweight armor. *Amptiac* volume 9, number 2. USA; 2005.
- [8] Michael Kinsella, Dennis Murray, David Crane, Mechanical properties of polymeric composites reinforced with high strength glass fibers. USA.
- [9] Frederick Wallenberger, PPG Industries, Inc. *Introduction to Reinforcing Fibers*. ASM Handbook, Volume 21: Composites, USA; 2001.
- [10] Karl Chang, E.I. Du Pont de Nemours & Company, Inc. *Aramid fibers*. ASM Handbook, Volume 21: Composites, USA; 2001.
- [11] M. Grujicic, A. Hariharan, B. Pandurangan, C.-F. Yen, B.A. Cheeseman, Y. Wang, Y. Miao, and J.Q. Zheng. Fiber-level modeling of dynamic strength of Kevlar KM2 ballistic fabric. *ASM International*,

USA; 2011.

[12] M. Grujicic, G. Arakerea, T. Hea, W.C. Bell, B.A. Cheesemanb, C.-F. Yenb, Scott. A ballistic material model for cross-plyed unidirectional ultra-high molecular-weight polyethylene fiber-reinforced armor-grade composites. *Materials Science and Engineering*. Elsevier. USA; 2008.

[13] Toyobo Co., Ltd. PBO fiber Zylon. Technical Information. 2001.

[14] Davies, A. R. Bunsell, E. Chailleux. Tensile fatigue behaviour of PBO fibres. *Journal of Materials Science*, Springer Science, Francia; 2010.

[15] Philip M. Cunniff, Margaret A. Auerbach. High performance "M5" fiber for ballistics / structural composites. U.S. Army Soldier and Biological Chemical Command, USA.

[16] Twisdale Lawrence A., Frank Robert A., Lavelle, Francis M. *Airmobile Shelter Analysis, Volume II*, Defense Technical Information Center, USA; 1994.

[17] David M. Spagnuolo, Eugene Napadensky, Tomoko Sano, James P. Wolbert. Investigation of basalt woven fabrics for military applications. Army Research Laboratory, USA; 2011.

[18] Bruce K. Fink, Emanuele F. Gillio, Geoffrey P. McKnight, John W. Gillespie Jr., Suresh G. Advani, Rushad F. Eduljee, Karl R. Bemetich. Co-Injection resin transfer molding of vinyl-ester and phenolic composites. Army Research Laboratory, USA; 2000.

## 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Oscar Arteaga, Ingeniero Mecánico, con estudios de posgrado en Autotrónica, Tecnología de la Información y Comunicación, Gestión de Energías y Diseño Mecánico. Profesor Titular Agregado 1 del Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE Extensión Latacunga.



<sup>2</sup> Mauricio Cruz, nació en Latacunga, Ecuador, Es ingeniero Automotriz, Diplomado en Autotrónica, Diplomado en Gestión del Aprendizaje Universitario, Docente Tiempo Parcial en la Escuela Politécnica del Ejército desde 2009. Imparte servicios de asesoramiento y capacitación en mecánica básica y manejo de software CAD.



<sup>3</sup>Euro Mena, nacido en el Cantón Quevedo - Los Ríos - Ecuador, Graduado de Ingeniero Automotriz en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



<sup>4</sup> Víctor Danilo Zambrano León, nació en la ciudad de Quito, Ecuador. Es Ingeniero Automotriz, Máster en Sistemas Automotrices, Máster en Gestión de la Producción, estudios de posgrado en

Autotrónica, Docente tiempo completo, Director de la Carrera de Ingeniería Automotriz del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE.



<sup>5</sup>William Bonilla, nació en Salcedo Provincia de Cotopaxi en Ecuador. Es Ingeniero Mecánico en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Riobamba, dispone estudios de Posgrado en Gestión de Energías. Pertenece al

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE” extensión Latacunga.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	25 mayo 2016
Fecha aceptación	14 agosto 2016



## INFLUENCIA DE LA FORMACIÓN DE ESCORIA ESPUMOSA BÁSICA (CaO-MgO) EN LA DISMINUCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA DE UN HORNO DE ARCO ELÉCTRICO (EAF)

### INFLUENCE OF BASIC SLAG (CaO - MgO) DECREASE IN POWER ON AN ELECTRIC ARC FURNACE (EAF)

Caterine Isabel Donoso Quimbita<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica  
e-mail: <sup>1</sup>cidonoso@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 10 (15)

#### RESUMEN

Para el proceso productivo de una acería resulta de suma importancia la formación de escoria espumosa básica para disminuir el tiempo de operación (POT) de un horno de arco eléctrico (EAF). El presente estudio considera que el proceso de fusión del acero se realiza en un EAF trifásico con electrodos de grafito de 18" de diámetro, además la chatarra metálica ferrosa reciclada se alimenta al EAF a través del sistema Consteel.

La calidad de la escoria se determina a partir del índice de basicidad binario (CaO/SiO<sub>2</sub>) y de la cantidad de oxígeno gaseoso (O<sub>2</sub>) disuelto en la misma. La inyección de oxígeno en la escoria se realiza a través de lanzas supersónicas ubicadas al interior del horno. La basicidad binaria con la que se trabajó se encuentra en el rango de 2,2 a 2,4 y el flujo de oxígeno suministrado a través de la lanza supersónica, evaluado por colada es de 1600 Nm<sup>3</sup>/h. La altura de la escoria espumosa generada bajo estas características corresponde a 50 cm, con lo cual se consigue cubrir el arco eléctrico generado por los tres electrodos durante el proceso de fusión.

El control operativo de la basicidad binaria en el rango mencionado ha permitido una disminución del tiempo de conexión

del horno de 4 min y 22 segundos, lo que representa una disminución promedio del consumo de energía eléctrica por colada de 0,5 MWh.

#### Palabras Clave:

*Basicidad Binaria, Consteel, Electrodo, Escoria espumosa, Horno de arco eléctrico.*

#### Abstract

For the production process of a steelworks it is extremely important to identify the degree of influence of the basic formation of foamy slag in reducing operating time (POT) of an electric arc furnace (EAF). This study considers the process of melting steel in a EAF from recycled ferrous scrap metal. This is Feeding through a system known as continuous feed Consteel. The EAF in which the present study is three phase three graphite electrodes of 18 inch of diameter, the electrodes are assembled in columns on the jaws consumables arm oven develops.

The foamy slag is a critical variable operation that is controlled from binary index slag basicity (CaO / SiO<sub>2</sub>) and the supply of gaseous oxygen (O<sub>2</sub>) through supersonic lances into the furnace. The binary basicity with which we worked is in the range of 2.2 to 2.4 and oxygen flow supplied through the supersonic lance, it is evaluated by casting

1600 Nm<sup>3</sup> / h. The height of the foamed slag generated under these features corresponds to 50 cm, which is possible to cover the electric arc generated by the three electrodes during the melting process.

The operational control of these parameters has allowed a decrease oven connection time (POT) 4 min and 22 seconds, which represents an average decrease of energy consumption by pouring 0.5 MWh.

**Keywords:**

*Binary basicity, Consteel, Electrodes, Foamy Slag, Electric Arc Furnace.*

**1. INTRODUCCIÓN**

Diagramas ternarios y de saturación isotérmica

La metalurgia del acero considera no sólo la fabricación del acero propiamente dicho, sino también el equilibrio químico con el refractario que está en contacto directo con el acero. Este equilibrio se evalúa a través de diagramas isotérmicos para el sistema CaO-MgO vs FeO, a través del cual se puede determinar las características necesarias que debe poseer la escoria empleada en el proceso de fusión del acero.

En la Figura 1, se observa la distribución de la saturación de los óxidos básicos CaO y MgO en función del porcentaje de FeO presente en la escoria y las fases que corresponden a cada concentración. La fase líquida de la escoria (L) se forma mientras mayor es la concentración de óxido de hierro, hacia la derecha de la línea de equilibrio en color rojo se observa la coexistencia de la fase líquida y sólida, hacia la izquierda de la línea roja se observa la sobresaturación de los óxidos básicos CaO y MgO. La zona limitada entre la línea punteada y la línea roja corresponde a la zona de equilibrio para la formación de escoria espumosa. [1]

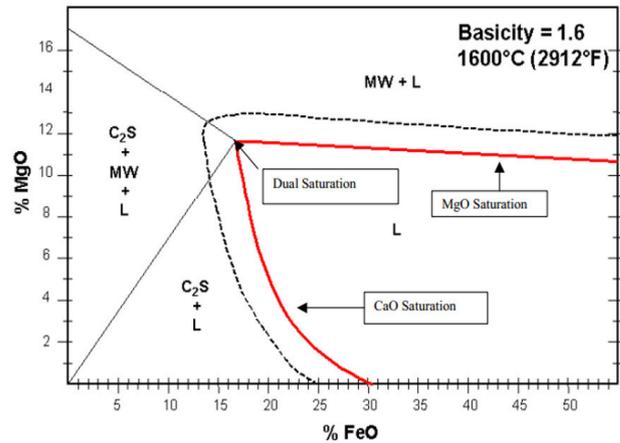


Figura 1. Diagrama de Saturación Isotérmico (ISD) para una basicidad constante de 1,6 y una temperatura de 1600°C

Figura 1. Diagrama de Saturación Isotérmico (ISD) para una basicidad constante de 1,6 y una temperatura de 1600°C

En la Figura 2, se muestra el diagrama ternario para el sistema CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO en el que se muestra las concentraciones de los tres óxidos y la fase en la que se encuentran.

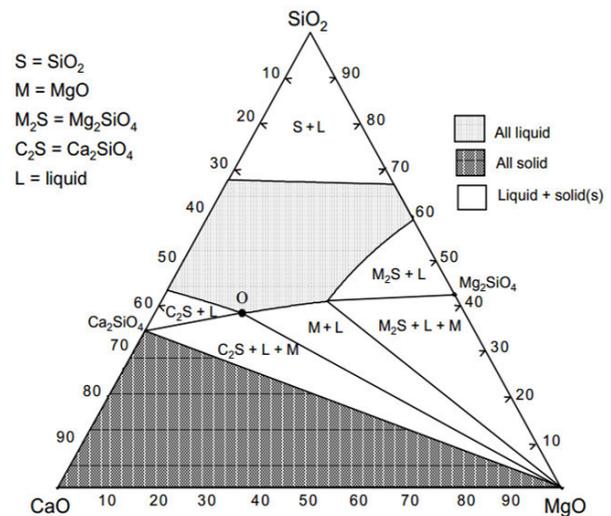


Figura 2. Diagrama ternario para el sistema CaO-MgO-SiO<sub>2</sub> a 1600°C

El punto "O" identificado en el diagrama ternario corresponde a una muestra de escoria cuya composición química es 17% de MgO, 43% de CaO y 40% de SiO<sub>2</sub>, respecto a las fases este punto se encuentra en una zona de coexistencia líquido-sólido con saturación de MgO y Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>.

Este diagrama es útil para identificar la composición química que debería tener una escoria espumosa óptima para la particularidad de cada proceso. [2]

$$B_2 = \frac{CaO}{SiO_2} \quad (Ec. 2)$$

### Basicidad óptica de la escoria

Para el cálculo de la basicidad óptica de la escoria sin importar cuál sea su composición, se la puede realizar a través de la siguiente expresión:

$$\Lambda = X_{AO_x} \Lambda_{AO_x} + X_{BO_y} \Lambda_{BO_y} \dots \quad (Ec. 1)$$

Donde X es la relación entre la fracción molar del componente multiplicado por el número de átomos de oxígeno en la molécula del óxido respecto al sumatorio de la fracción molar del componente multiplicado por el número de átomos de oxígeno en la molécula del óxido de todos los componentes.

En la Tabla 1 se muestra los valores de basicidad óptica de los componentes más comunes de la escoria.

Tabla 1. Valores de basicidad óptica de algunos componentes de la escoria

ÓXIDO	BASICIDAD ÓPTICA ( $\Lambda$ )
Na <sub>2</sub> O	1.15
CaO	1.0
MgO	0.78
CaF <sub>2</sub>	0.67
TiO <sub>2</sub>	0.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.61
MnO	0.59
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.55
FeO	0.51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.48
SiO <sub>2</sub>	0.48

Con base en las basicidades ópticas de cada componente se puede expresar para una escoria determinada la basicidad binaria (B<sub>2</sub>), que está dada por la siguiente expresión:

Mediante esta expresión se puede conocer la concentración de MgO que requiere la escoria para alcanzar el equilibrio o saturación en función de la basicidad binaria y una variación de temperatura, como se muestra en la Figura 3. [2]

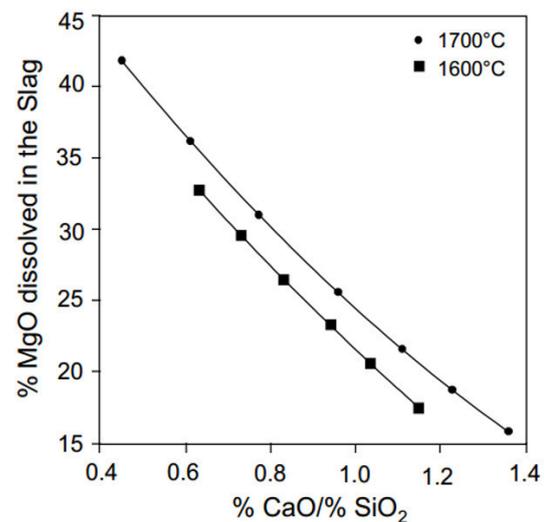


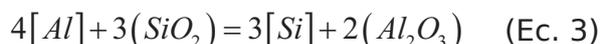
Figura 3. Requerimiento de MgO para la saturación de la escoria a 1600°C

### Consideraciones Cinéticas

Muchos de los cálculos termodinámicos acerca de cómo determinar el equilibrio químico de los óxidos en la escoria ha sido un tema de mucha discusión, sin embargo en la práctica durante la fabricación del acero, no siempre se alcanza este equilibrio teórico. Por ello se trata de interpretar estas interacciones cinéticas bajo dos principios, el primero considera la escoria como un líquido y el segundo considera altas velocidades de agitación de tal manera que exista una interacción entre la escoria y el metal. La última consideración es la más utilizada sobre todo para el análisis de la capacidad de desulfuración de la escoria.

A través de las siguientes expresiones se muestra las consideraciones cinéticas para determinar las concentraciones de

equilibrio de cada componente en la escoria, la ecuación (3) muestra el equilibrio entre las moles de Al en la fase metálica [Al] y el óxido de aluminio en la fase escoria ( $Al_2O_3$ ), de manera similar sucede con el equilibrio entre el óxido de silicio en la fase de escoria ( $SiO_2$ ) y el silicio en la fase metálica [Si].



La ecuación 4 permite expresar la constante de equilibrio para la reacción de oxidación tanto del silicio así como del aluminio en función de las actividades. [2]-[4].

$$K = \frac{a_{Al_2O_3}^2 * a_{[Si]}^2}{a_{[Al]}^4 * a_{SiO_2}^3} \quad (\text{Ec. 4})$$

Mientras el contenido de oxígeno disuelto en el acero sea controlado por la relación de equilibrio en el contenido de silicio o aluminio en la fase de escoria y la fase metálica, el contenido de silicio [%Si] y aluminio [%Al] pueden ser calculados mediante las siguientes expresiones respectivamente. [3].

$$[\%Si] = \sqrt[3]{\frac{f_{Al}^4 * [\%Al]^4 * K * a_{SiO_2}^3}{a_{Al_2O_3}^2 * f_{Si}^3}} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$[\%Al] = \sqrt[3]{\frac{a_{Al_2O_3}^2 * f_{Si}^3 * [\%Si]^3}{f_{Al}^4 * K * a_{SiO_2}^3}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Estas expresiones se corresponden con las mediciones realizadas en espectrómetros de emisión óptica, empleados para determinar la composición química del acero que se está produciendo.

La acería de Pacific Steel incrementó el tiempo de campaña del refractario del EAF de 800 a 2614 coladas producidas, como resultado directo de la aplicación de la nueva práctica de escoria espumosa. La optimización de esta práctica tuvo influencia directa sobre la disminución del costo de producción, disminución del

consumo de energía, disminución del tap to tap e incremento de la productividad. [4]

La planta de acería se encuentra equipada con un transformador de 35 MVA, un EAF marca Krupp de 50 toneladas de capacidad, una lanza de inyección de oxígeno y carbono marca Moore. El consumo promedio de oxígeno es de 23 Nm<sup>3</sup> por tonelada de acero líquido. El tiempo promedio de tap to tap es de 74 minutos. [5]

La metalurgia secundaria se realiza en un Horno Cuchara marca Krupp, en el cual se realiza el proceso de desulfuración, afinado químico y de temperatura del acero antes de enviar la colada a la Máquina de Colada Continua. El horno cuchara posee un sistema de agitación con argón mediante un tapón poroso ubicado en el piso de la cuchara, también posee un sistema para inyección de calcio envainado en alambre. [5]

Luego de realizar una evaluación de la escoria mediante un programa de simulación de escoria espumosa, se evidenció que existía una deficiencia de MgO, por lo que se decidió ser más conservadores y cambiar la práctica de fundentes agregando 1400 kg de cal siderúrgica y 400 kg de MgO por colada. Sin embargo esta práctica continuó mejorando hasta disminuir la adición de cal siderúrgica 800 Kg por colada, la adición de briquetas disminuyó a 300 kg por colada, con lo cual se obtuvo excelentes resultados de espumación de la escoria desde el inicio hasta el final de la colada. [6], [7]

Los resultados químicos de los análisis de escoria generados de la nueva práctica operativa muestran que el componente que mayor dispersión presenta es el FeO, debido a que una de las variables experimentales para la fabricación de escoria espumosa es el FeO formado por la inyección de oxígeno al baño metálico. Se observa también una dispersión considerable en el contenido de CaO lo cual se atribuye a la calidad de materia prima o al funcionamiento del sistema de dosificación de los fundentes, sin embargo

se observa que la basicidad ternaria busca estabilizarse en base a un promedio de SiO<sub>2</sub> procedente de la chatarra, esta corrección se logra gracias al dominio del proceso por parte del personal operativo.

El rendimiento del refractario mejora una vez que se optimiza la práctica de formación de escoria espumosa. A mediados del año 2000 inicia la práctica operativa con un histórico de 1046 coladas producidas por cada campaña de duración del refractario del EAF, sin embargo esta cifra cambia dramáticamente una vez implementadas las mejoras, la campaña de duración del refractario del EAF sube a 2614 coladas, lo que representa una disminución de la tasa de consumo de material monolítico y de masas de proyección de 3,59 kg/t que se tenía hasta el año 1999 a un nuevo estándar de consumo de 2,25 kg/t para el año 2001. La disminución notable del consumo de refractario puede ser expresada económicamente como un ahorro de 0,50 USD/t. [6], [7]

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada en la presente investigación se describe a continuación:

### **Definición de la línea base en el proceso de fusión del EAF**

Se realizó in situ una auditoría inicial, el primer paso durante la auditoría fue hacer un levantamiento de la información correspondiente a la caracterización química de la escoria y de las condiciones de operación de cada colada con la finalidad de encontrar una relación directa entre la formación de escoria espumosa y el tiempo de conexión del EAF, de tal manera que se pueda identificar potenciales opciones de mejora que optimicen el proceso.

Con la información obtenida a partir de la caracterización química de la escoria se elaboró los diagramas de saturación

binaria para identificar si la escoria formada en el baño líquido se encontraba en fase líquida por exceso de óxido de hierro, o sobresaturada por una dosificación excesiva de óxidos de calcio y magnesio durante la alimentación de la chatarra o en la zona de equilibrio para la formación de escoria espumosa.

Otros parámetros como el power on, power off, tap to tap y consumo de energía por colada se obtienen de mediciones en línea realizadas por un regulador ubicado a la entrada del transformador del EAF.

### **Análisis de las etapas del proceso y determinación de las variables críticas**

Una vez definida la línea base, se analizó las etapas del proceso de producción de fusión y afino del acero que presentaban problemas, se estudió los motivos que generaban limitaciones en la optimización del proceso productivo

### **Definición de las opciones de mejora y selección de las opciones de mejora más viables**

Como resultado del análisis de las causas de los problemas identificados en el levantamiento de la línea base del proceso productivo. Al unificar criterios, experiencias, necesidades y facilidades se enlistó una serie de opciones de mejora que eliminen o minimicen los problemas identificados en el proceso.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los parámetros eléctricos de operación del EAF que se tomaron como referencia para la elaboración de los filtros en las figuras que se muestran a continuación son: Tiempo de conexión del EAF mínimo 50 min y tiempo de conexión máximo 70 min.

En la Figura 4 se muestra la evolución del

tiempo de conexión del EAF en un periodo de tres meses desde febrero hasta abril del 2015 en donde se observa en el mes de abril un incremento del 1,44% en el tiempo de conexión del EAF respecto al mes de marzo.

Período Evaluado: 04/01/2015 al 30/04/2015				
Power on time (minutos)				
	YTD	Feb-15	Mar-15	Abril-15
Power On	57.47	56.88	56.65	57.47

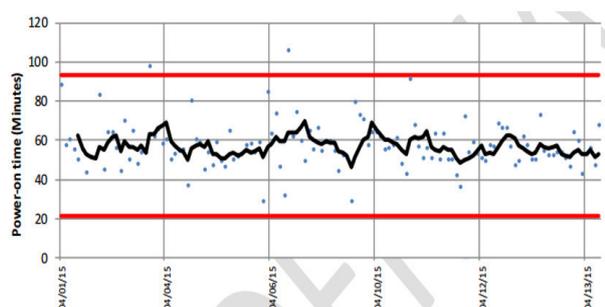


Figura 4. Tiempo promedio de conexión por colada evaluado mensualmente (min)

En la Figura 5 se observa el consumo de energía eléctrica promedio mensual (MWh) correspondiente a los meses de febrero a abril de 2015 en los que se evaluó la influencia de la escoria espumosa en la eficiencia del arco eléctrico. En el mismo sentido el consumo de energía eléctrica presenta un incremento de 1,7% en el mes de abril, respecto al mes de marzo.

Período Evaluado: 04/01/2015 al 30/04/2015				
Consumo de Energía Eléctrica				
	YTD	Feb-15	Mar-15	Abril-15
MWH	17.7	17.7	17.5	17.8
kWh/ton	525	526	519	528
Oxygen/ton	47	55	57	56

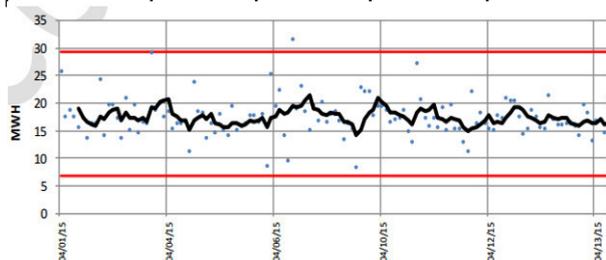


Figura 5. Consumo promedio por colada de energía eléctrica evaluado mensualmente (MWh)

Durante el análisis de las corrientes y balance de fases se observa un ligero cambio en el comportamiento de las corrientes que podría estar relacionado con los incrementos en el POT y MWh.

Adicionalmente se hizo una evaluación respecto a un parámetro de operación, que corresponde a la temperatura de vaciado o sangrado del EAF, el comportamiento de este parámetro es muy consistente, permitiendo determinar un valor promedio de 1619°C.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se observa que el tiempo conectado (POT) y los MWh presentan una tendencia a la alza cuando la formación de escoria no es del tipo espumosa, rica en CO y CO<sub>2</sub>.
- La estabilidad de las tres fases también se ve afectada en ausencia de escoria espumosa, lo que repercute en la disminución de corriente destinada a la fundición de la chatarra, por tanto el consumo de energía eléctrica incrementa.
- Este estudio demuestra que la generación de escoria espumosa en un EAF demanda mayor oxidación de hierro mientras mayor es la concentración de CaO y MgO de acuerdo a los principios termodinámicos mencionados.
- Un incremento de 800 Nm<sup>3</sup>/h de oxígeno en el baño metálico permite una disminución de 5 min en el tiempo de conexión del EAF, lo que representa el incremento de la producción en una colada a diario.
- En la práctica resulta de gran utilidad la disponibilidad de espectrómetro de emisión óptica para la evaluación de las concentraciones de equilibrio de los diferentes metales y óxidos tanto en

la fase de escoria, así como en la fase metálica.

## 5. REFERENCIAS

- [1]. P.V. Riboud and H. Gaye, "Molten Slag Properties and their use in Steelmaking Process Control", 4 th International Conference on Molten Slags and Fluxes, ISIJ, Sendia, 1992.
- [2]. M. Faral and H. Gaye, "Metal Slag Equilibria", Second International Symposium on Metallurgical Slags and Fluxes, AIME, 1984
- [3]. A.A. Akberdin, "Calculation of the Equilibrium Phase Composition of Oxide Systems", Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Metally, N° 2, pp 20-28, 1989
- [4]. J. Björkvall, "Thermodynamic study of multicomponent slags-a model approach", Doctoral The Department of Materials Science and Engineering, Division of Metallurgy, Royal Institute Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [5]. Verein Deutscher Eisenhuttenleute, "Slag Atlas", 2° edition Verlag Stahleisen GmbH, Germ 1995.
- [6]. E.T. Turkdogan, "Fundamentals of Steelmaking", The Institute of materials, The University Press, Cambridge, 1996, p.241.
- [7]. H.H. Rodriguez, A.N. Coneljo and R.D. Morales, "Theoretical analysis of the interfacial phenomena during the injection of carbón particles into EAF slags", Steel Research, 2001, pp.298-303.

## 6. BIOGRAFÍA



**<sup>1</sup>Caterine Donoso**, Magister en Calidad Seguridad y Ambiente de la Facultad en Geología, Minas, Petróleos y Ambiental, UCE. Especialista en Metalurgia Extractiva. Ingeniera Química de la Escuela Politécnica Nacional. Especialista en Gestión de la Calidad INEN. Docente tiempo completo Ocasional, del Departamento de Energía y Mecánica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L

### REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	16 junio 2016
Fecha aceptación	15 octubre 2016

## ANÁLISIS DE COEFICIENTES AERODINÁMICOS EN UN CAMIÓN EN ALTURAS SUPERIORES A 2500 MSNM

### ANALYSIS AERODYNAMIC FACTORS IN A TRUCK, AT HEIGHTS OVER 2500 METERS ABOVE SEA LEVEL

Abel Remache Coyago <sup>1</sup>, Luis Tipanluisa Sarchi <sup>2</sup>, Santiago Fernando Celi <sup>3</sup>, Jaime Molina Osejos <sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad Central del Ecuador - Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemáticas

<sup>2</sup>Escuela Politécnica Nacional - Facultad de Ingeniería Mecánica

<sup>2,3,4</sup> Universidad Internacional SEK - Facultad de Ingeniería Mecánica, Alberto Einstein y 5ta Transversal (Quito)

e-mail: <sup>1</sup> apremache@uce.edu.ec <sup>2</sup> luis.tipanluisa@epn.edu.ec <sup>3</sup> santiago.celi@uisek.edu.ec <sup>4</sup> jaime.molina@uisek.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 11 (15)

#### RESUMEN

Se presenta el método de cálculo in situ, de tres coeficientes aerodinámicos: coeficiente de resistencia al aire (k), coeficiente aerodinámico (Cx) y coeficiente de resistencia por rodadura (f) basado en la formulación de Cascajosa [1], la cual se aplicó y utilizó en un camión. Se obtuvieron valores reales y comparables a una altura superior a los 2500 metros sobre el nivel del mar. Se analiza la diferencia que existe al variar los datos ambientales a nivel del mar, así como el uso de valores adecuados para integrarlos en los cálculos. Los coeficientes se ven afectados directamente por la altura y el campo gravitacional influyendo factores aleados, tales como: presión atmosférica, temperatura, densidad del aire, entre otros. Así, se concluye que la presión atmosférica y la gravedad afectan mayormente al coeficiente (Cx), con una variación de 10,49%, los otros valores no presentan cambios representativos. Estos datos son útiles para en simulaciones y futuros cálculos relacionados a consumo de combustible, potencia, aerodinámica, y otros.

#### Palabras Clave:

Coeficientes aerodinámicos, resistencia del aire, resistencia por rodadura, arrastre, presión atmosférica.

#### Abstract

The in situ calculation method is presented, of three aerodynamic coefficients: air resistance coefficient (k), drag coefficient (Cx) and rolling resistance coefficient (f) based on the Cascajosa formulation [1], which was applied and used in a truck. Real and comparable values were obtained at a height above 2500 meters above sea level. It analyzes the difference that exists in varying environmental data at sea level, as well as the use of appropriate values to integrate them into the calculations. The coefficients are directly affected by height and gravitational field influencing alloying factors, such as: atmospheric pressure, temperature, air density, among others. Thus, it is concluded that atmospheric pressure and gravity affect mainly the coefficient (Cx), with a variation of 10.49%, the other values do not present representative changes. These data are useful for simulations and future calculations related to fuel consumption, power, aerodynamics, and others.

#### Keywords:

aerodynamic coefficients, air resistance, rolling resistance, drag, atmospheric pressure.

## 1. INTRODUCCIÓN

Existen valores de coeficientes aerodinámicos importantes para cálculos en vehículos tales como: coeficiente de resistencia al aire (k), coeficiente aerodinámico (Cx) y coeficiente de resistencia por rodadura (f) [1], estos permiten la facilidad de procesamiento de datos para obtención de resultados relacionados con pérdidas en potencia, consumo de energía, consumo de combustible, resistencias. [2].

En varias simulaciones son de importancia estos datos, por lo que se ingresan valores que se encuentren en rangos recomendados, que por lo general no figuran ni aseguran un valor exacto sino aproximado, siendo los porcentajes de error más elevados; varias citas presentan estos valores en rangos cercanos que son un promedio de investigaciones generales y no se toma en cuenta niveles o cotas de altura superior. Por otra parte los valores de coeficientes aerodinámicos no son de fácil acceso o recopilación respecto a camiones y vehículos industriales, por lo que es necesario recomendar la metodología para el cálculo de valores que se puedan adquirir y diferenciar en regiones altas.

Existen diferencias entre los datos tomados a nivel del mar como en la altura, estos pueden cambiar los valores resultantes de los coeficientes; de tal forma que es importante considerar los aspectos ambientales y valores adecuados para obtener estos resultados en el medio que se vaya a investigar con la finalidad de asegurar mejores deducciones.

Para el cálculo de los parámetros a ser calculados existen varias formulaciones hechas por Cascajosa [1] en el siguiente orden (1) coeficiente de resistencia al aire, (2) coeficiente aerodinámico y (3) coeficiente de resistencia por rodadura:

$$k = \frac{(4M(j-j'))}{S[(v_1 + v_2)^2 - (v'_1 + v'_2)^2]} \quad Ec. 1$$

$$Cx = \frac{k2g}{\delta} \quad Ec. 2$$

$$f = \frac{Mj - kS\left(\frac{v_1 + v_2}{2}\right)^2}{Mg} \quad Ec. 3$$

En donde:

k: coeficiente de resistencia al aire, Cx: coeficiente aerodinámico, f : coeficiente de resistencia por rodadura, M: masa del vehículo, S: superficie maestra, j: desaceleración en alta velocidad, j': desaceleración en baja velocidad,  $\delta$ : peso específico del aire, g: gravedad, v1: velocidad inicial (alta velocidad), v2: velocidad final (alta velocidad), v'1: velocidad inicial (baja velocidad), v'2: velocidad final (baja velocidad).

La gravedad generada a diferente altura y latitud, necesaria para los cálculos se la obtiene con el dato de Ramos [3], en donde la gravedad es  $g = 9.7803185 \text{ m/s}^2$ , considerada como aceleración de la gravedad en el Ecuador latitud = 0, pero para considerar datos más exactos en cualquier lugar se lo puede adquirir del Gravity Information System, en la coordenada exacta que se requiera, de ahí que la gravedad en el sector de prueba fue  $9.772 \text{ m/s}^2$  [4], todo esto necesario para los cálculos de densidad del aire ( $\rho$ ) y coeficiente aerodinámico (Cx).

Para considerar un resultado más adecuado de la densidad del aire ( $\rho$ ) (4) y considerando los efectos de altura se aplica la ecuación según Efecto Estela [5]:

$$\rho = \left(\frac{Po}{RT}\right) \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right) \quad Ec. 4$$

En donde:

$\rho$ : densidad [ $\text{Kg/m}^3$  ],  
Po: presión atmosférica [Pa],  
R: constante del aire [ $\text{J}/(\text{Kg.K})$ ],

T:temperatura [°K],  
g:gravedad [m/s<sup>2</sup> ],  
z:altitud [m]

## 2. METODOLOGÍA

El estudio de la resistencia por aire en la fase vehicular está orientado a la obtención de coeficientes relacionados a la aerodinámica vehicular. Los datos fueron tomados en la población de El Quinche, ciudad de Quito, a una altura de 2619 msnm., por la condición de la carretera y viento obligatorios para la toma de datos. Se realizó pruebas físicas con vehículos pesados analizando su desaceleración.

El cálculo de la aceleración se realizó tomando datos a altas velocidades en rangos entre 100 a 60 Km/h y a bajas velocidades en rangos de 25 a 10 Km/h, es decir 2 pruebas macro, con la tabulación de varios resultados para su comprobación, aseguramiento y justificación. Para esto se aplicaron las siguientes normas [1]:

- Al momento de las pruebas no debe existir la intervención del motor o del tren motriz, por lo que al instante de iniciar las pruebas de aceleración debe desconectarse las marchas, es decir la transmisión en posición neutral.
- El vehículo debe estar desembragado lo que significa que el pedal de embrague debe estar pisado a fondo para evitar la intervención del embrague o las fuerzas que puedan actuar por la inercia.
- La carretera debe ser horizontal, no presentar irregularidades o cambios en el tipo de material de la misma, que afecten el cálculo de la aceleración y del coeficiente de rodadura.
- La velocidad del viento debe ser 0, es decir en lo posible no debe existir movimiento del aire, puesto que este

afecta a los valores finales, puede incrementar los valores de aceleración o disminuirlos dependiendo del ángulo de ataque del viento hacia la carrocería.

Para el registro de datos sin viento, fue primordial verificar durante las pruebas que la velocidad del viento sea 0, con un anemómetro digital, para lo cual se verifica la proyección del estado del tiempo en la localidad establecida a través de datos obtenidos en Meteored [6].

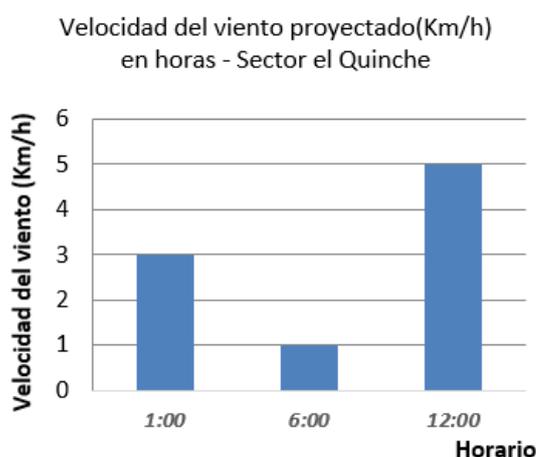


Figura 1. Velocidad del viento proyectado para la toma de datos

Las mejores condiciones establecidas estaban entre las 6:00 y 10 horas, con una presión atmosférica de 733 mbar (73300 Pascales), a una temperatura de 18°C [6], para lo cual se inició las pruebas en los momentos que la velocidad del viento fue igual a 0, condiciones que si fueron posibles. Haciendo relación con la altura de Quito que se encuentra a 2850 msnm esta posee una presión atmosférica de 717.7 mbar [7], así a un nivel mayor de altura el diferencial de presión se muestra notorio.

Los datos recolectados de velocidad, tiempo y de las aceleraciones calculadas fueron los siguientes:

Tabla 1. Valores calculados de la aceleración (-) a alta velocidad

Velocidad Km/h	tiempo (s)	Desaceleración A (m/s <sup>2</sup> )
70-60	7,9	0,35189
70-60	8,55	0,32514
80-70	8,29	0,33534
70-60	8,01	0,34706
70-60	8,22	0,33819

Tabla 2. Valores calculados de la aceleración (-) a baja velocidad

Velocidad Km/h	tiempo (s)	Desaceleración A (m/s <sup>2</sup> )
20-10 Km/h	18,96	0,14662
20-10 Km/h	17,52	0,15867
20-10 Km/h	16,59	0,16757
20-15 Km/h	9,56	0,14539
20-15 Km/h	8,31	0,16726

Los valores medidos con un incremento en la velocidad del viento o velocidad diferente de cero fueron desechados.

Los datos de masa fueron adquiridos de la ficha técnica del vehículo y comprobado en una báscula: 6885 Kg, y los datos de superficie maestra calculada con los mismos datos proporcionados fue 6,719 m<sup>2</sup> además de ser comprobados a partir de una nube de puntos escaneados de una imagen 3D. Se debe entender por superficie maestra, al área de contacto frontal del vehículo con aire o la sombra que genera este en una vista frontal.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### Resultados obtenidos

Los valores calculados fueron promediados, se recopilieron cinco datos experimentales tanto en alta como en baja velocidad, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 3. Valores calculados de coeficientes aproximados en altura

Coefficiente	Valor
Coefficiente de Resistencia por Rodadura (f)	0,0159
Coefficiente de Resistencia al Aire (k)	0,059
Coefficiente aerodinámico (Cx)	1,109

El cálculo de coeficiente de resistencia por rodadura (f) generó un valor de 0,0159. Estos valores fluctúan entre 0.012 y 0.02 [8], y dependen individualmente del tipo de neumático, presión de inflado, tipo de superficie en este caso asfalto y temperatura.

El valor determinado para el coeficiente de resistencia al aire (k) es 0,059, estos valores están en un rango de 0,05 y 0,07 en lo que respecta a camiones [9]; considerando que dichos rangos dependen directamente del peso y al área frontal del vehículo, el valor calculado se encuentra dentro de los parámetros establecidos.

El coeficiente aerodinámico (Cx) generó un valor de 1,109 y estos datos como valores normales para camiones están en el rango de 0,9 y 1,2 [10], sin olvidar que el área frontal es similar a la de un vehículo industrial, es decir posee grandes dimensiones, por lo que este valor es elevado, en el caso de estudio el valor está dentro de los rangos normales para camiones o vehículos industriales.

Los valores encontrados pueden ser recalculados a nivel del mar, variando los datos promedio generados: gravedad a nivel del mar (9,81 m/s<sup>2</sup>), temperatura promedio de 18,15 °C y presión atmosférica 1013,249 mbar, valores generados en las costas ecuatorianas situadas a la misma latitud y en el mismo horario de la toma de datos. De esta manera se calculó el valor porcentual diferencial aproximado a diferentes alturas (Tabla 4).

Tabla 4. Diferencias porcentuales de datos respecto a la altura

Coeficiente	Valor a nivel del mar	Diferencia
Resistencia por Rodadura (f)	0,0159	0,3%
Resistencia al Aire (k)	0,058	0,3%
Coeficiente Aerodinámico (Cx)	1,225	10,49%

### Discusión

Los valores de coeficiente de resistencia a la rodadura (f), el coeficiente de resistencia al aire (k), y el coeficiente aerodinámico (Cx) están relacionados entre sí y dependen de datos que por su ubicación geográfica y condiciones ambientales influirán en los cálculos directos o simulaciones necesarias para resultados finales e investigaciones. Por ejemplo el valor de la gravedad varió acorde a la altura y la latitud de la tierra hasta en un 0,6%, por lo que en el Ecuador puede haber una variación del 0,3% en el valor de este parámetro [11].

Estas mismas condiciones geográficas afectan directamente en los valores de temperatura, densidad y presión atmosférica.

En condiciones normales en la región Costa a nivel del mar los valores de temperatura cambian en los rangos de 25 a 31 °C mientras que en la región Andina a alturas superiores a los 2500 m.s.n.m. entre 10 a 19 °C [12] esto hace que los valores de densidad afecten directamente en los resultados de coeficientes aerodinámicos.

A mayor altura existió menor presión por lo que la cantidad de aire se ve limitada, influyendo en los valores finales, otro componente importante es la cantidad de humedad presente en el ambiente.

Los datos obtenidos van a variar respecto

a los generados a nivel del mar, y dependiendo de la geografía que se tenga estos pueden afectar directamente en los coeficientes calculados. Se debe tomar en cuenta que la mayoría de datos entregados en documentos educativos están basados en datos tomados a nivel del mar y muchos de los resultados son derivados de pruebas realizadas en túneles de viento.

### 4. CONCLUSIONES

Los coeficientes aproximados para cálculos principales se ven afectados directamente por la altura, el campo gravitacional y por ende los factores aleados a los mismos tales como: presión atmosférica, temperatura, densidad del aire, entre otros.

La presión atmosférica y la gravedad afectan directamente al coeficiente aerodinámico, en este caso un valor de 10,49%, considerando a este valor un porcentaje importante en lo que se refiere a valores concluyentes y de inclusión en cálculos.

Los coeficientes de resistencia por rodadura (f) y coeficiente de resistencia al aire (k), no presentan cambios importantes cuando la diferencia de altura y coeficiente gravitacional cambian, en este caso el valor de 0,3% puede ser considerado no influyente en cálculos a nivel de altura.

Los valores aproximados de los coeficientes son referentes cercanos para realizar cálculos y análisis de simulación con mejores resultados, puesto que solo existe información de rangos en los que los coeficientes se han de encontrar en ambientes a nivel del mar.



## 5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Manuel Cascajosa, Ingeniería de Vehículos. Madrid: Tebar Flores S.L., 2006.
- [2] José Olivares de Jodar, "Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción," Barcelona, 2011.
- [3] Rogelio Ramos, Máximo Patricia, Narcisso Jessica, Mirón Monserrate, and Beltrán Mayra, "Estudio Geoestadístico para Obtener la Gravedad Local, Pendiente y Cálculo Hidrológico de las Barrancas Xaltelulco, Tepeloncocone, Tenepanco, Colorada y Quimichule del Volcán Popocatépetl," Boletín de Ciencias de la Tierra, pp. 65-84, 2012.
- [4] Physikalisch-Technischen Bundesanstalt. (2007, Marzo) Gravity Information System. [Online]. Disponible en <http://www.ptb.de/cartoweb3/SISproject.php>
- [5] Efecto Estela. (2015, Febrero) Efecto Estela - Energía eólica al alcance de todos. [Online]. Disponible en <http://efectoestela.com/2013/04/18/calculo-de-la-densidad-del-aire/>
- [6] Meteored. (2015, Marzo) Meteored. [Online]. Disponible en [http://www.meteored.com.ec/tiempo-en\\_Quinche-America+Sur-Ecuador-Pichincha--1-20047.html](http://www.meteored.com.ec/tiempo-en_Quinche-America+Sur-Ecuador-Pichincha--1-20047.html)
- [7] EXA - Agencia Espacial Civil Ecuatoriana. (2015, Marzo) DIVISIÓN DE CIENCIAS PLANETARIAS. [Online]. Disponible en <http://quito.exa.ec/>
- [8] Pablo Luque and Daniel Alvarez, Investigación de Accidentes de Tráfico - Estudio del Automóvil. Oviedo - España: Universidad de Oviedo, 2003.
- [9] Bosch, Robert GmbH, Manual de la Técnica del Automóvil. Barcelona: Reverté, 1996.

- [10] Bruce Bowling. (2015, Marzo) Air Drag Coefficients and Frontal Area Calculation. [Online]. Disponible en <http://www.bgsoflex.com/airdragchart.html>
- [11] Docsetools. (2015, Abril) La gravedad de la Tierra. [Online]. Disponible en [http://docsetools.com/articulos-utiles/article\\_123634.html](http://docsetools.com/articulos-utiles/article_123634.html)
- [12] Terra Andina. (2015, Abril) Terra Andina Ecuador. [Online]. Disponible en <http://www.ecuador-viaje.com/ecuador/clima.html>

## 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup> Abel Remache.- Magíster en Gerencia y Liderazgo Educacional, Ingeniero Automotriz, Maestrante en Energías Renovables y Sostenibilidad Energética Universidad de Barcelona, Profesor Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad Central del Ecuador.



<sup>2</sup> Luis Tipanluisa.- Magíster en Energías Renovables, Ingeniero Automotriz, Profesor Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad SEK y Escuela Politécnica Nacional, Encargado de Laboratorio de Termodinámica.



<sup>3</sup> Santiago Celi.- Magíster en Administración de Empresas y Marketing, Ingeniero Automotriz, Profesor Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad SEK.



<sup>4</sup> Jaime Molina.- Magíster en Diseño, Producción y Automatización Industrial, Ingeniero Mecánico, Profesor Facultad de Ingeniería Mecánica de la Universidad SEK

---

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

---

Fecha recepción	26 junio 2016
Fecha aceptación	25 octubre 2016

---

# PROTOTIPO DE INVERSOR MULTINIVEL MONOFÁSICO EN CASCADA

## PROTOTYPE INVERTER SINGLE-PHASE MULTILEVEL IN CASCADE

David de Jesús Sarzosa Ante <sup>1</sup>  
<sup>1</sup> Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE  
 Unidad de Gestión de Tecnologías - ESPE  
 Quijano y Ordóñez S/N y Hermanas Páez  
 Email: sadaavid@espe.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 12 (15)

### RESUMEN

Se expone y prueba el diseño, construcción, e implementación de un inversor multinivel monofásico en cascada. El cual tiene la finalidad de generar corriente alterna a partir de fuentes de corriente continua con valores a la salida del inversor de 120Vac y 2A.

La obtención de la corriente alterna se realiza mediante la conmutación de los IGBT's generando así una señal casi sinusoidal a la salida del inversor.

### Palabras Clave:

Inversor multinivel, prototipo, armónicos, igbt, etapa de control, etapa de potencia.

### Abstract

This paper presents the design, construction and implementation of an inverter single-phase multilevel in cascade. Which has the purpose of generating alternating current from current sources continues with values to the exit of the investor of 120Vac and 2A. The obtaining of the alternating current from by means of the commutation of the IGBT's generating this way an almost sinusoidal sign to the exit of the inverter.

### Keywords:

Armonics, igbt, multilevel converters, prototype, stage control, stage power.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los inversores multinivel son inversores de última tecnología que pueden generar corrientes o incluso voltajes sinusoidales con mucho menor contenido armónico. [1] Si el número de niveles es lo suficientemente alto, se puede obtener un voltaje (o corriente) casi sinusoidal. Más aún, se puede modular en amplitud en vez de ancho de pulso (PWM) al voltaje, por lo que las pérdidas generadas por las armónicas de corriente pueden minimizar. [4] Además, la frecuencia de conmutación y el nivel de potencia de los semiconductores se reducen considerablemente. Dentro del contexto de utilizar los inversores multinivel para obtener un bajo contenido armónico, se diseñó y construyó un prototipo de inversor monofásico de 8 niveles para operar un motor de corriente alterna. Este inversor consta de tres puentes completos tipo H, con sus voltajes escalados, lo que permite obtener el número de niveles ya mencionado.

El inversor diseñado es capaz de soportar corrientes de aproximadamente 2 A, con un voltaje de salida de 110 Vac, dando una

potencia nominal de 220 W. Para llevar a cabo este proceso, se diseñó un sistema de potencia modular con inversores individuales aislados galvánicamente, con sus sistemas de control de encendido y fuentes de alimentación independientes.

La investigación se basa en un inversor multinivel en cascada que consiste en una serie de unidades inversoras de medio puente (monofásicas, puente completo). [5]. La función general de este inversor multinivel es sintetizar un determinado voltaje a partir de varias fuentes separadas de cd (SDCS, de several separate dc sources), que pueden ser baterías, celdas de combustible o celdas solares. [2]

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### Requerimientos para la implementación del inversor monofásico.

En la tabla 1 se indica las características de diseño que se tomó en cuenta para el inversor multinivel.

Tabla 1: Características de diseño seleccionado.

CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DEL INVERSOR SELECCIONADO	
PARÁMETRO	ELECCIÓN
Tipo	Multinivel en cascada
Etapas	3
Fase	Monofásico
Carga	Inductiva
Tipo de alimentación	Asimétrica
# Fuentes de entrada	3
Niveles de tensión	8
Modulación	Pulso Único
Conmutadores	IGBT
Salida	Aprox. onda sinusoidal

### Etapas de potencia

Para la etapa de potencia del inversor monofásico multinivel de tres etapas

conectadas en cascada planteado en la investigación, existen varios parámetros iniciales a considerar:

### Parámetros para la etapa de potencia

Para la etapa de potencia del inversor monofásico multinivel de tres etapas conectadas en cascada los parámetros de diseño están dados por los valores nominales de la carga. En tabla 2 se detallan los parámetros de diseño.

Tabla 2: Parámetros de Diseño de la Etapa de potencia.

PARÁMETROS DE DISEÑO	
PARÁMETRO	VALOR NOMINAL
Voltaje Carga	110 VRMS
Potencia	200 Watts
Frecuencia	60Hz

### Selección de fuente de alimentación

El requerimiento de las fuentes se basa en el tipo de alimentación asimétrica y en la corriente de salida que es de 2 A.

Para la selección de las fuentes de alimentación se debe tomar en cuenta los parámetros de diseño, por lo que el voltaje necesario es de 120Vrms, en donde el voltaje de la onda no es sinusoidal, por lo que esta es solo una aproximación, el diseño de las fuentes de alimentación se tomó en cuenta el valor del voltaje pico de 168V, este valor pico será dividido para  $\sqrt{2}$  entonces:

$$V_{rms} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{\sqrt{2}} \quad Ec. 1$$

$$V = 168 \frac{V}{\sqrt{2}} = 118.79$$

Esto se realiza por que la señal es casi sinusoidal.

En la tabla 3 se indica las fuentes de alimentación utilizadas, con una corriente de 6A, esta corriente nos ayudará en el arranque del motor por que la corriente arranque es 5 – 6 veces la corriente nominal. Los valores necesarios para la selección de las fuentes se detallan a continuación.

Tabla 3: Selección de Fuentes de Alimentación.

ALIMENTACIÓN		
ETAPA	VALOR NOMINAL DE SALIDA	VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN
I	24 VDC 6 A	110V-220V
II	48 VDC 6 A	110V-220V
III	96 VDC 6A	110V-220V

### Selección del dispositivo de potencia

En la figura 1, se indica el esquema de conexiones utilizado para el desarrollo de la selección del dispositivo de potencia.

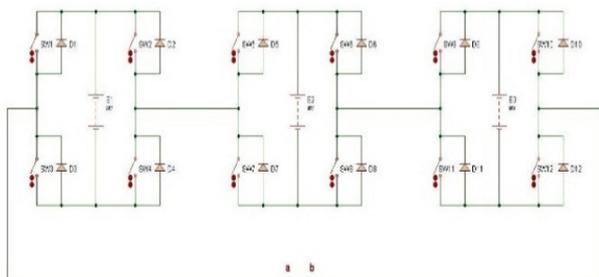


Figura 1. Inversor monofásico multinivel de tres etapas conectado en cascada.

La utilización del IGBT como dispositivo de potencia en el proyecto se justifica en base a las características de robustez y velocidad de respuesta, la corriente que se desea que circule por cada IGBT es de 2A, a continuación, en la tabla 4 se detalla los requerimientos para la selección del dispositivo de potencia.

### REQUERIMIENTOS PARA EL DISPOSITIVO DE POTENCIA

DISPOSITIVO	REQUERIMIENTO
IGBT	IGBT A UTILIZAR: 12
	larranque: 6 A
	V: 168 Vmaxdc
	FRECUENCIA DE CONMUTACIÓN: 60 HZ
	TIPO: DE POTENCIA

Los parámetros técnicos específicos del dispositivo se muestran a continuación.

$$I_{\text{máx por IGBT}} = I_{\text{máx carga}}$$

$$I_{\text{máx carga}} = 2A$$

$$\sum \text{Fuentes de alimentación Inversor} = 168 \text{ Vdc.}$$

Basado en los parámetros de corriente y voltaje de diseño máximos se procedió a validar las capacidades del IGBT seleccionado FGA40N65SMD, que cumple las condiciones necesarias para el funcionamiento del inversor.

### Diseño de la etapa de control

Antes de la selección del dispositivo de control se detallará las señales que este entregará para el funcionamiento del inversor multinivel, es por esto que un parámetro de diseño del inversor multinivel es minimizar la distorsión armónica, para aquello se calculará los ángulos de disparo, otro parámetro de diseño de esta etapa de control es los pulsos que el microcontrolador debe entregar al inversor multinivel para su funcionamiento.

### Selección del ángulo de disparo para minimizar la distorsión armónica.

El contenido armónico de un sistema que posee inversores tipo puente completo en cascada se reduce de manera considerable solo por el hecho de incrementar las etapas, proceso que incluso permite obtener mayor

voltaje de salida.

### Cálculo del TDH

$$TDH = \sqrt{\frac{E_i^2 - E_1^2}{E_1^2}} \cdot 100 \quad Ec. 2$$

La relación de las armónicas existentes está dada en función de los ángulos posibles de la siguiente forma.

$$E_1^2 = \frac{8E^2}{49\pi^2} [Cos(\alpha 1) + Cos(\alpha 2) + Cos(\alpha 3) + Cos(\alpha 4) + Cos(\alpha 5) + Cos(\alpha 6) + Cos(\alpha 7)] \quad Ec. 3$$

$$E_i^2 = \frac{2E^2}{49\pi^2} \left[ \frac{49\pi}{2} - 1\alpha 1 - 3\alpha 2 - 5\alpha 3 - 7\alpha 4 - 9\alpha 5 - 11\alpha 6 - 13\alpha 7 \right] \quad Ec. 4$$

En la tabla 5 se indica los ángulos obtenidos luego de igualar a cero cada una de las ecuaciones son los siguientes:

Tabla 5. Ángulos

$\alpha 1$	$\alpha 2$	$\alpha 3$	$\alpha 4$	$\alpha 5$	$\alpha 6$	$\alpha 7$
8.57°	10.08	25.72°	31.56°	42.85°	49.92°	66.01°
0.397	0.466	1.190	1.461	1.983	2.310	3.054
(ms)						

Entonces el TDH obtenido al reemplazar en la ecuación 1 es:

$$TDH = 7.94\%$$

Basado en los datos anteriores para el diseño del inversor multinivel, se requiere que el microcontrolador opere de la siguiente manera, es por esto que se indicará los pulsos y su manera de activación. En la figura 2 se indica los pulsos de cada uno de los IGBT's con su forma de onda ideal.

La forma de onda ideal de voltaje de salida del inversor monofásico multinivel de tres etapas conectadas en cascada mediante las señales de control se muestra en la figura 2.

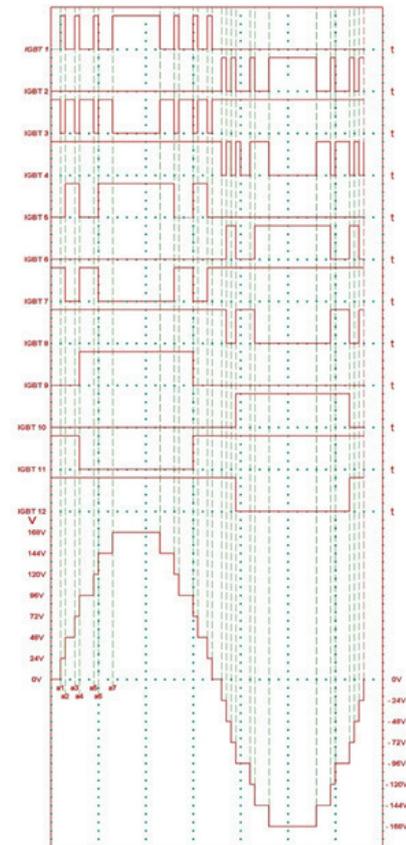


Figura 2 Forma de Onda Ideal con los Pulsos de cada IGBT

### Selección del microcontrolador

A continuación, en la tabla 6 se citará los requerimientos y la justificación del microcontrolador seleccionado.

Tabla 6: Requerimientos para el microcontrolador.

REQUERIMIENTOS PARA EL MICROCONTROLADOR	
DISPOSITIVO	REQUERIMIENTO
	PUERTOS DIGITALES DE SALIDA:
	12 SALIDAS POR IGBT
	1 SALIDA PARA UN LED
	TEMPORIZADOR
	FRECUENCIA
CONTROLADOR	SEÑAL DE RELOG
	ESPACIO DE MEMORIA
	Puertos digitales con interrupción: 1 Salida para switch on/off,
	1 Salida para pulsador arranque

**Implementación de la etapa de potencia**

Para la elaboración de las placas figura 3, se realiza un modelo puesto que los dos restantes son iguales, tiene el mismo circuito y funcionalidad cambiando nada más sus conexiones entre sí.

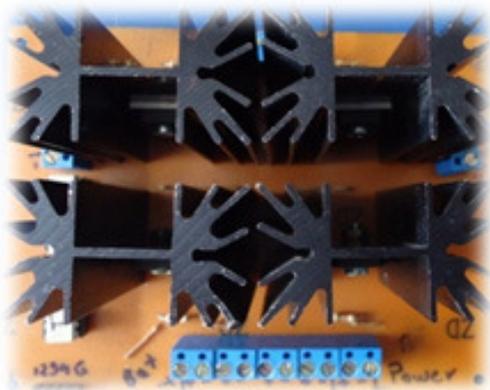


Figura 3. Tarjeta de potencia

**Implementación de la etapa de control**

En la figura 4 se muestra el diagrama eléctrico de conexiones de la etapa de control del inversor multinivel monofásico.

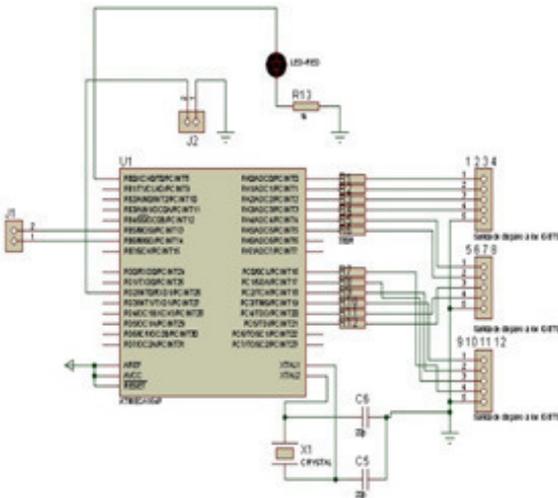


Figura 4. Figura 4: Diagrama eléctrico de la etapa de control.

Para la integración de la etapa de control con la etapa de potencia se realizó con el conductor AWG número 20, esto permite estar comunicados y así enviar los pulsos de la placa de control a cada uno de los IGBT's implementados en las placas de potencia.

En la figura 5 se observa el resultado del módulo final del prototipo didáctico de inversor multinivel monofásico en cascada.



Figura 5. Módulo final del Inversor Multinivel Didáctico Monofásico en Cascada

**3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se analizó los resultados obtenidos durante el proceso de desarrollo de la investigación enfocando dicho análisis a pruebas sobre los dispositivos implementados.

**Pruebas del inversor**

Las pruebas fueron realizadas tomando en cuenta los valores ideales del inversor multinivel. En la tabla 7 de muestra los valores ideales del inversor.

Tabla 7: Valores ideales del inversor.

VALORES IDEALES DEL INVERSOR	
PARÁMETRO	VALOR NOMINAL
Voltaje Carga	110 VRMS
Corriente Carga	2 A
Frecuencia	60Hz
Carga	Monofásica

**A. Forma de onda ideal y real del inversor**

Tomando en cuenta el prototipo realizado y llevándolo a simulación, en la figura 6, se generó el tipo de onda, esta onda es la ideal generada.

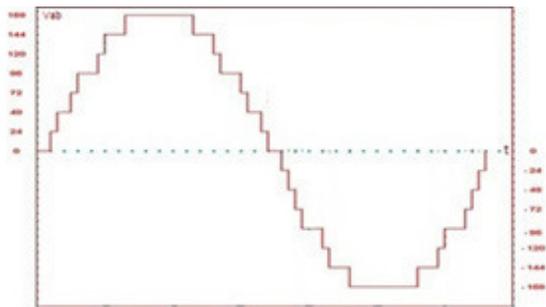


Figura 6. Forma de onda ideal generada

La forma de onda generada en el prototipo se indica en la figura 7, cumpliendo así con los niveles, tiempos y corrientes antes mencionadas para su diseño.

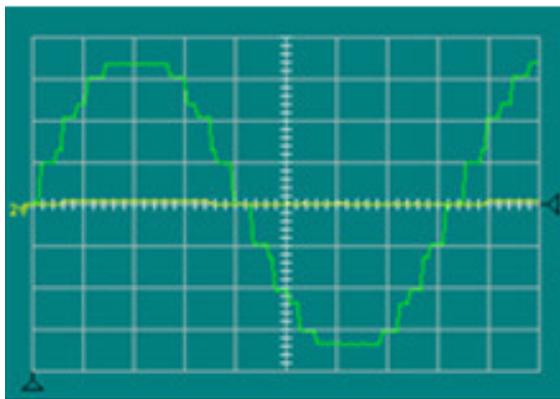


Figura 7. Forma de onda real generada

### **Resultado de distorsión armónica total (tdh) adquirido por el módulo de adquisición de datos (lv dam ems)**

En la figura 8 se observa que el valor TDH obtenido en forma práctica del módulo de adquisición de datos (LV DAM ES), es menor al calculado, cumpliendo así de manera correcta el diseño para el TDH.

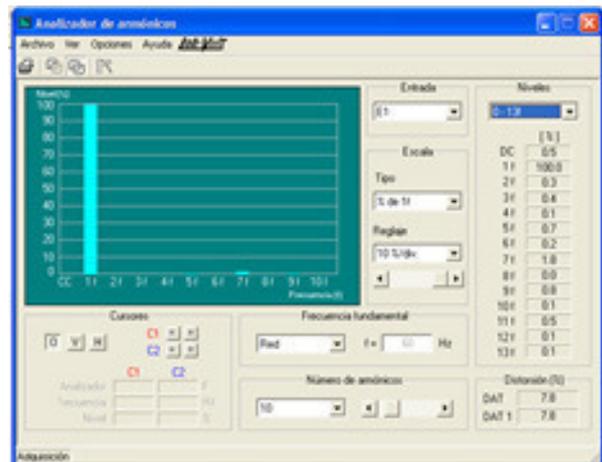


Figura 8: Valor obtenido en la práctica del TDH.

El valor obtenido en esta práctica es de 7.9%, esto significa que el valor corresponde al calculado.

### **Resultado de los ángulos de disparo de cada nivel adquirido por el módulo de adquisición de datos (lv dam ems).**

En la tabla 8 se indica los valores obtenidos en el diseño y en la práctica en milisegundos (ms), para su respectiva comparación de resultados.

Tabla 8. Valores para el TDH obtenidos de forma práctica

VALOR CALCULADO	VALOR OBTENIDO	ERROR (%)
0.397	0.40	0.75
0.466	0.47	0.85
1.190	1.20	0.83
1.461	1.47	0.61
1.983	2.00	0.85
2.310	2.33	0.85
3.054	3.07	0.50

Los valores que se detallan en la tabla 8, se pueden apreciar de manera ilustrativa en la figura 9.

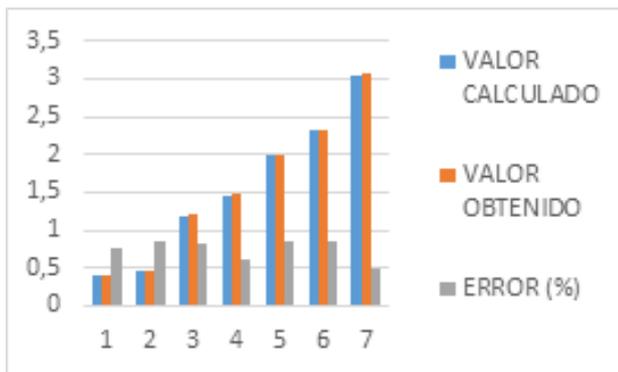


Figura 9: Verificación de los valores calculados y obtenidos en la práctica.

Los valores obtenidos en esta práctica están dentro del margen del error, lo que quiere decir que lo diseñado a lo obtenido se cumplió satisfactoriamente.

**Resultados de las pruebas de laboratorio.**

En la tabla 9 se muestra los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio, se realizó con la ayuda de un motor, los valores representados son a la salida del generador conectado a este un módulo de cargas resistivas (figura 10).

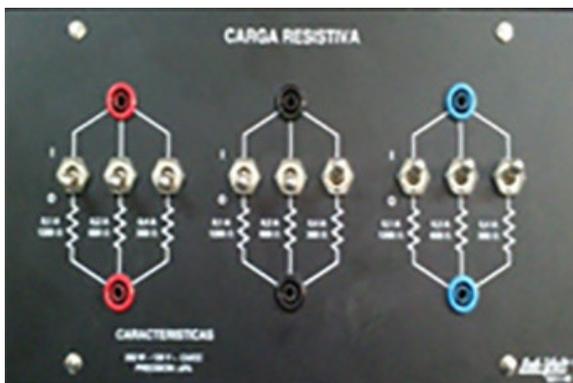


Figura 10: Módulo real de cargas resistivas  
A continuación, se presenta los valores obtenidos en la prueba de laboratorio.

Tabla 9: Valores obtenidos en la prueba de laboratorio.

CARGA RESISTIVA EN EL GENERADOR (A)	SALIDA MOTOR	
	VOLTAJE (V)	CORRIENTE (A)
0	110	2
0,1	110	2
0,2	110	2
0,3	110	2
0,4	110	2
0,5	110	2
0,6	110	2,1
0,7	110	2,1
0,8	110	2,1
0,9	110	2,1
1,0	110	2,2
1,1	110	2,2
1,2	110	2,2
1,3	110	2,2
1,4	110	2,2
2,1	110	2,2
2,8	110	2,2
3,5	110	2,3
4,1	110	2,3

Los valores que se detallan en la tabla 9, se pueden apreciar de manera ilustrativa en la figura 11.

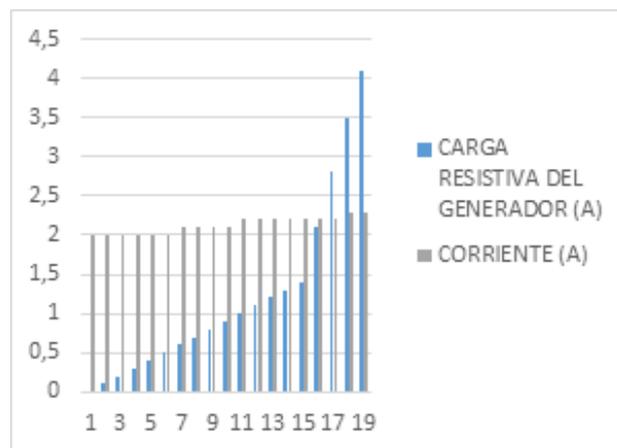


Figura 11: Verificación de los valores en la prueba de laboratorio.

ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO  
No. 5 Vol. 1 / 2016 (15) ISSN 1390 - 7395 (12/15)

En esta experimentación se obtuvo los valores esperados en la parte de diseño, con un voltaje de 110V y una corriente menor a 2.5A.

Cabe recalcar que para la suma de la carga resistiva se debe subir cada uno de los interruptores del módulo de carga resistiva según corresponda por obtener los valores establecidos en dicha práctica.

#### 4. CONCLUSIONES

- Se investigó la utilidad del inversor multinivel monofásico de tres etapas, obteniendo un equipo de potencia de estructura compacta y robusta.
- Una vez construido el equipo, este fue sometido a pruebas prácticas con resultados exitosos.
- La utilización de los opto acopladores, es importante porque nos permite separar y aislar las tierras entre el circuito de control y el circuito de potencia con el objetivo de proteger la parte de control en caso de presentarse problemas con la respuesta del sistema en la parte de potencia del Inversor.
- El inversor multinivel construido a partir de puente "H" debe conectarse en cascada para obtener la máxima cantidad de niveles posibles. De esta forma con muy pocas etapas se pueden tener un gran número de niveles; en este caso con 3 etapas obtuvimos 8 niveles.
- Las pruebas realizadas en el laboratorio cumple satisfactoriamente con los parámetros de diseño señalados al inicio del segundo capítulo, pudiéndose comprobar prácticamente las buenas propiedades de la tecnología de los inversores multinivel.

#### 5. REFERENCIAS

- [1] Benavent. (2001). Electrónica de Potencia, Teoría y Aplicaciones. México: Alfaomega.
- [2] Hart, D. W. (2001). Introducción a la Electrónica de Potencia. Madrid, España: PEARSON EDUCACION, S.A.
- [3] Mohan, N. (2009). Electrónica de potencia (Tercera ed.). MONTERREY, MEXICO.
- [4] Rashid, M. H. (2004). Electrónica de potencia (TERCERA ed.).
- [5] Ross. (1997). The Power of Electronics.
- [6] Sarzosa D. (2015). Tesis diseño y construcción de un prototipo didáctico de inversor multinivel en cascada, monofásico de tres etapas.

#### 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup> David Sarzosa, nació en Latacunga en 1986. Es Ingeniero Electromecánico de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en 2015. Su experiencia laboral incluye Sistemas Eléctricos, Mantenimiento Industrial, Control Industrial, Docencia desde el 2012 y a partir del 2015 es Docente de la Unidad de Gestión de Tecnologías – ESPE. Su campo de interés es la Automatización industrial, Energías Alternativas, Optimización, Robótica.

#### REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	16 junio 2016
Fecha aceptación	15 septiembre 2016

## IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DE CONTROL ABS PARA EL SISTEMA DE FRENOS NEUMÁTICOS

## IMPLEMENTATION ABS CONTROL MODULE FOR THE PNEUMATIC BRAKE SYSTEM

Luis Marcelo Arellano Rodríguez <sup>1</sup>, María Gabriela Tapia Carrillo <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Fuerzas Armadas ESPE - Unidad de Gestión de Tecnologías, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.

<sup>2</sup> Universidad Técnica de Cotopaxi

Email: <sup>1</sup> lmarellano1@espe.edu.ec, <sup>2</sup> maria.tapia@utc.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 13 (15)

### RESUMEN

Se tiene por objetivo la implementación de un módulo ABS para frenos neumáticos, el cual cuenta con un sistema de conexiones de acoples rápidos que permiten el montaje y desmontaje de todos sus componentes para su estudio individual, ya que generan el ingreso de fallas de manera manual para resolverlas de manera deductiva y obviamente se va a lograr constatar el funcionamiento del sistema de frenos neumáticos a través del accionamiento desde el pedal.

En el circuito neumático se incorpora las válvulas moduladoras ABS, que son controladas por el módulo, de acuerdo a la condición de velocidad determinada por la simulación de señal de los sensores de rueda, incorporados en un tablero de control.

Se podrá verificar parámetros característicos de las señales y presiones a las que trabaja el sistema neumático de frenos ABS.

### Palabras Clave:

Módulo ABS, Frenos neumáticos, Válvulas moduladoras ABS, Parámetros característicos.

### ABSTRACT

The objective is to implement an ABS module for pneumatic brakes, which has a system of quick coupling connections that allow the assembly and disassembly of all its components for individual study, as they generate the entry of faults in a manual way To resolve them in a deductive way and obviously it will be possible to verify the operation of the pneumatic brake system through the drive from the pedal.

In the pneumatic circuit the ABS modulating valves are incorporated, which are controlled by the module, according to the speed condition determined by the signal simulation of the wheel sensors, incorporated in a control board.

It will be possible to verify characteristic parameters of the signals and pressures to which the pneumatic system of ABS brakes works.

### Keywords:

ABS module, Pneumatic brake, ABS modulator valves, Characteristic Parameters.

## 1. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador de acuerdo a cifras de la ANT, se produjeron 17239 siniestros de tránsito en el primer trimestre del 2016 a nivel nacional, de los cuales según estas estadísticas el 13,40% se deben al exceso de velocidad y pérdida de pista [8], índice que se puede reducir con la implementación de sistemas de freno ABS.

Con el objetivo realizar la frenada más eficiente y segura se ideó y se ha ido perfeccionando el sistema de frenado antibloqueo ("Anti lock Bracking System", o ABS) [1], que básicamente consiste en un sistema que evita el bloqueo de las ruedas al frenar, y por tanto evita que se pierda el control direccional del vehículo.

El diseño del módulo ABS de frenos neumáticos toma como referencia de funcionamiento la señal del sensor de rpm ubicado en las ruedas y tiene la función de regular de la presión, mediante la comparación de la velocidad media con las distintas velocidades que van adquiriendo, logrando determinar si la rueda amenaza bloquearse. Si esto ocurre el sistema ABS activa las válvulas moduladoras, reduciendo automáticamente la presión de frenado en la rueda en cuestión hasta alcanzar un valor tope fijado previamente. Cuando la rueda gira libremente se vuelve a aumentar instantáneamente la presión de frenado. Este proceso (reducir / aumentar la presión) se repite hasta que el conductor levanta el pie del pedal de freno o disminuye la fuerza de activación del mismo. [2]

## 2. DESARROLLO

### **Requerimientos para la implementación del inversor monofásico.**

El módulo del sistema ABS, tiene como finalidad "administrar" la velocidad de las ruedas del vehículo a partir de señales emitidas por los sensores del sistema, los cuales comprueban el número de

revoluciones de las ruedas por medio de un dispositivo dentado que gira con la misma velocidad. [3]

Las señales emitidas por los sensores de rueda son detectadas por la unidad electrónica del sistema, que comprueba si el vehículo está en condiciones seguras de desaceleración y de resbalamiento, haciendo una comparación del estado de cada rueda, contrastándola con la condición de frenado de acuerdo a la posición del pedal de freno.

El cerebro electrónico le indica a las válvulas moduladoras que reduzcan la presión de frenado en una rueda bloqueada, e inmediatamente le indica que mantenga y aumente en forma alternada la presión hasta detener el vehículo.

En la figura 1 podemos observar los parámetros de funcionamiento del módulo del sistema neumático sintetizado ABS. [6]

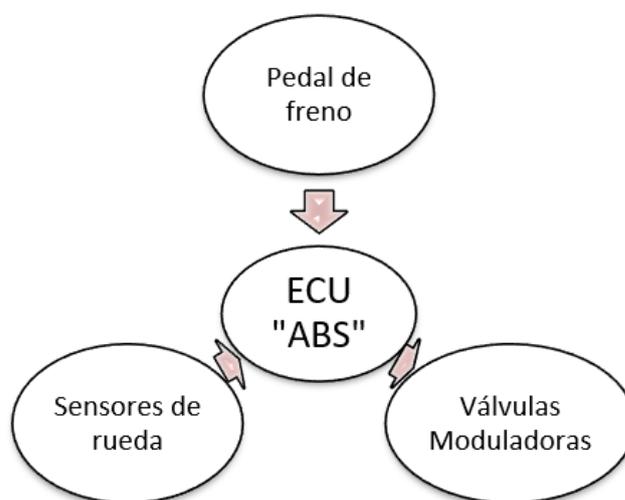


Figura 1. Parámetros de funcionamiento ABS

De esta manera, se consigue un frenado sin el bloqueo de las ruedas, dentro de las exigencias para realizar una detención eficiente, esto es: menor espacio de frenado, manteniendo la dirigibilidad (control sobre el vehículo) y preservando la estabilidad direccional [3] [4].

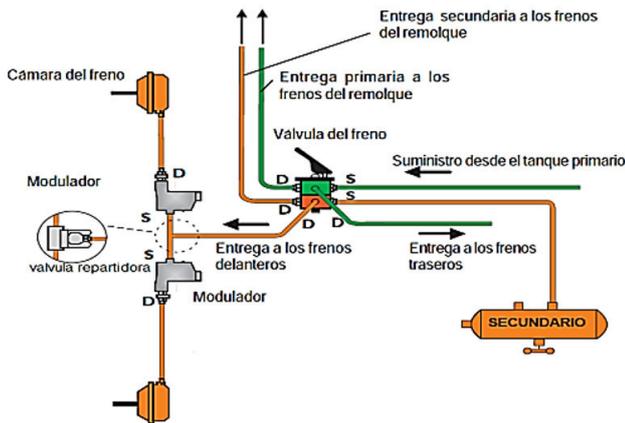


Figura 2. Circuito de frenado principal

Uno de los componentes principales son las válvulas moduladoras las cuales se utilizan para realizar el frenado progresivo de las ruedas en el momento ABS, estas válvulas constan de solenoides que interrumpen el paso del aire de acuerdo como la ECU lo mande. En la figura 3 podemos observar válvulas moduladoras que se utilizaran en el sistema ABS y sus respectivas conexiones tanto eléctricas como neumáticas. [7]

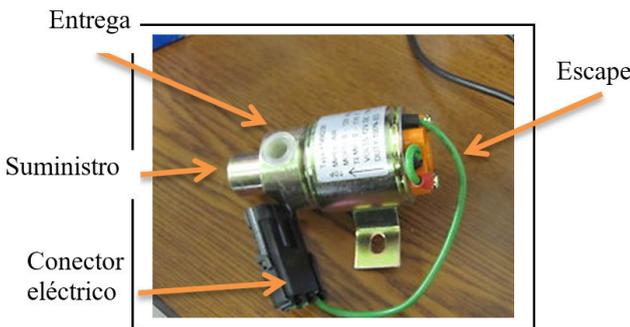


Figura 3. Electro-válvulas ABS

Las funciones con las cuales fue programado el módulo son:

- Comparar la velocidad de las ruedas.
- Determinar la condición de frenado de acuerdo a posición del pedal del freno.
- Activar las válvulas moduladoras del ABS.
- El ABS simula el efecto de bombear el pedal de freno, por lo que el conductor ya no tiene que realizar este procedimiento para no patinar.

- Determinar el estado de funcionamiento de los componentes del sistema y enviar una señal de alerta al conductor.
- Permitir una interfaz de conexión para simular el movimiento de las otras ruedas [5].

Para esto se ha utilizado diferentes componentes en el módulo, los cuales se detallan en la figura 4 en el diagrama de bloques.

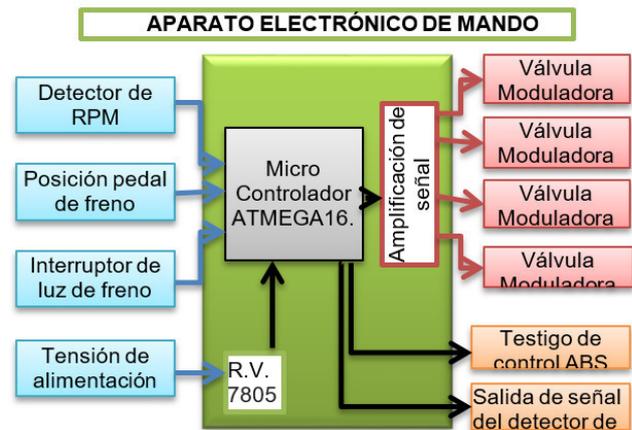


Figura 4. Diagrama de Bloques del Sistema ABS

Hay que destacar que se utilizó varios manómetros de 100 psi, con su respectivo acople para conectarlo en las líneas de freno por donde circula la presión en los distintos puntos del banco, los cuales facilitaran el entendimiento del comportamiento del sistema en la simulación de fallas.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de determinar la aplicabilidad del módulo del sistema de frenos neumáticos en los parámetros característicos del vehículo de transporte pesado se realizó diferentes pruebas y simulaciones de fallas mecánicas en el banco de pruebas del Laboratorio de Mecánica de Patio de la ESPE Latacunga, como son: anomalía de la válvula de freno de estacionamiento, anomalía de la válvula relé, línea de alimentación rota de frenos posteriores, anomalía de la válvula de control de remolque, anomalía en los pulmones de freno de remolque, anomalía en el pedal al aplicar los de servicio. [9]



Figura 5. Banco de pruebas de frenos neumáticos

#### 4. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

En cuanto a la simulación de fallas del sistema ABS se pudo comprobar los siguientes parámetros característicos, en cada una de las pruebas como se detalla a continuación:

##### **Falla de alimentación**

En esta condición el sistema ABS no funciona, los frenos neumáticos operan normalmente y no llega alimentación de 12V al módulo.

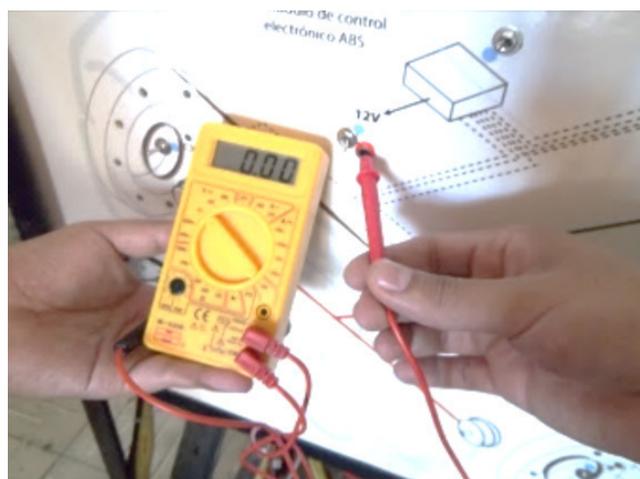


Figura 6. Simulación falla de alimentación

##### **Causa**

El módulo ABS no recibe alimentación, esto puede ser consecuencia de un fusible

quemado o una mala conexión a la fuente. Se debe revisar el estado de los fusibles, de los conductores, el estado de la fuente.

##### **Falla del sensor**

Para visualizar esta falla en el tablero están dispuestos unos LED de color verde que se encuentran junto a la imagen de cada sensor y que se encienden cada vez capta el campo magnético de la rueda dentada, por lo tanto si la falla se detecta, presenta el siguiente comportamiento: La lámpara ABS del tablero se enciende debido a que existe una falla. El sensor de rueda no envía señal de simulación del sensor en el tablero de control. No detecta el bloqueo de la rueda.

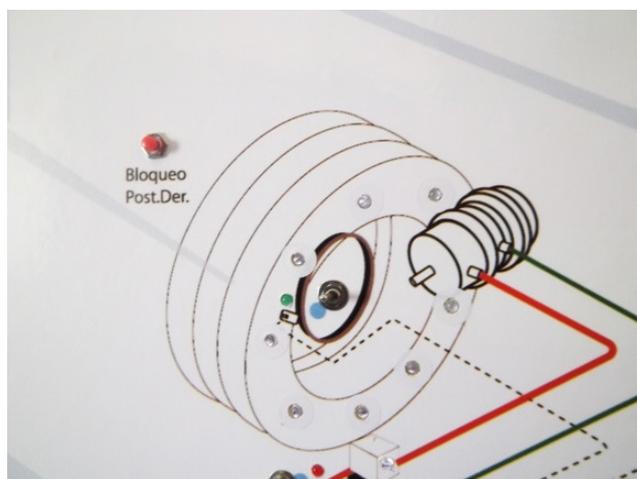


Figura 7. Simulación de falla del sensor

##### **Causa**

Cuando el sensor de rueda no funciona, el sistema ABS no deja de trabajar en esa rueda, el sistema se desempeña bajo condiciones de funcionamiento previstas ante este tipo de anomalía con relación a lo que pase en las otras ruedas, pero no recibe obviamente la señal de bloqueo de esa rueda ya que no sabe a qué velocidad está girando. Ante esta condición ilumina la lámpara ABS en el tablero hasta que se repare o sustituya el sensor de rueda.

##### **Lámpara abs quemada**

Al simular se presenta que la luz indicadora ABS no se enciende cuando se arranca el

vehículo a pesar de que exista una falla en el sistema.

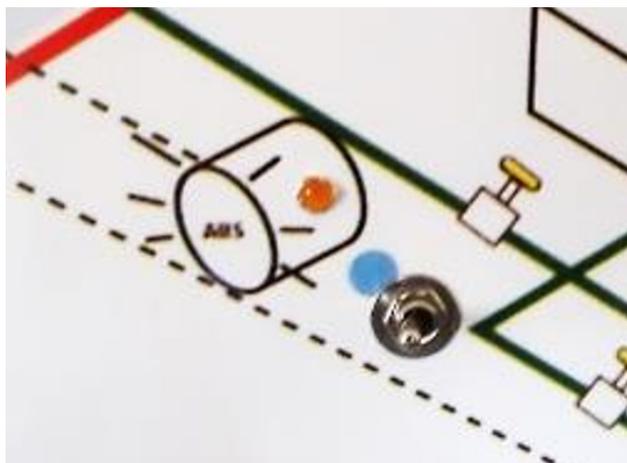


Figura 8. Simulación de falla del indicador ABS

### **Anomalía en la válvulas moduladoras abs**

Para esta falla en el tablero están dispuestas luces montadas sobre la imagen de cada válvula moduladora de color azul que se encienden cada vez que la válvula regula el paso del aire para evitar el bloqueo de la rueda, por lo tanto cuando se simula la falla se presenta el siguiente comportamiento: La lámpara ABS se enciende debido a que existe una falla, la luz de color azul en la imagen de válvula moduladora no se enciende. No funciona la válvula moduladora ABS



Figura 9. Medición de resistencia válvula moduladora

Las válvulas moduladoras presentan algún problema por lo tanto el foco azul en el tablero no enciende, para corregir esta falla se debería revisar la válvula moduladora del ABS (resistencia oscilaría entre 12.0-

17.0 Ohmios), revisar el cable de la válvula y los conectores.

### **Módulo de control electrónico abs averiado**

Siendo uno de los daños más costosos en caso de producirse, los síntomas serían que la lámpara ABS se enciende debido a que existe una falla, el sistema ABS no funciona, no funcionan la válvula moduladora ABS, existe alimentación normal de 12 V al módulo sin embargo el sistema mecánico de frenos neumáticos funciona correctamente

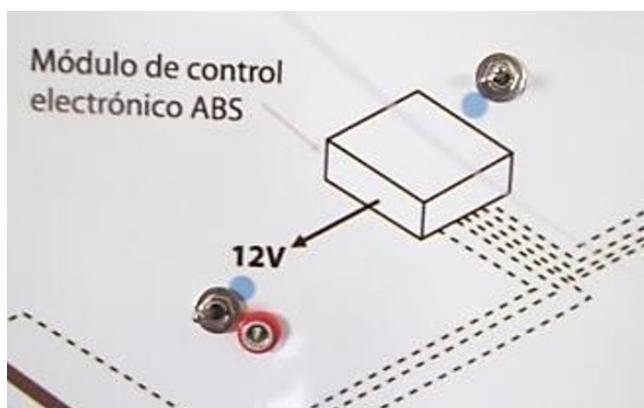


Figura 10. Medición de voltaje alimentación del módulo

Cuando el módulo no funciona lógicamente el sistema ABS no va a funcionar, pero el sistema de frenos neumáticos sigue trabajando normalmente, esto se debe a una falla interna, un error de la configuración del sistema o una mala conexión a tierra, esta simulación va a permitir trabajar solo con el banco de frenos neumáticos sobre todo cuando se desmontan los componentes mecánicos con fines prácticos.

El correcto funcionamiento de los componentes del sistema ABS, depende del correcto funcionamiento de los frenos mecánicos neumáticos, por ello se incorpora esta falla para que después de una práctica, primero se revise el funcionamiento de la parte mecánica y luego verificar el funcionamiento en conjunto con el sistema ABS

## 5. CONCLUSIONES

Al finalizar el proyecto, se establecen las siguientes conclusiones:

- El sistema ABS es un complemento de los frenos comunes; no aumenta ni disminuye la capacidad de frenado normal del vehículo, y se activa cuando las ruedas están próximas a bloquearse.
- Para que exista un normal funcionamiento de sistema ABS, las ruedas del vehículo deben estar con la presión adecuada, permitiendo que los sensores envíen una señal correcta al módulo
- La característica principal del sistema de frenos ABS es permitir la maniobrabilidad del vehículo en caso de un frenado brusco, manteniendo la trayectoria que el conductor elija para evitar obstáculos que se encuentren en la trayectoria del vehículo.
- El sistema antibloqueo ABS constituye un elemento de seguridad adicional en el vehículo, el cual puede reducir las tasas de accidentes de tránsito en el país.
- Debido a que constituye un trabajo de excelente contenido científico que coadyuvará a la aplicación de conocimientos y al desarrollo profesional, es importante su difusión.
- El módulo de frenos neumáticos ABS, ha demostrado su fiabilidad y es un prototipo de aprendizaje como también de ejemplo para la implementación en los transportes que cuentan con frenos de aire.

## 6. REFERENCIAS

- [1] Ming-chin Wu & Ming-chang Shih, « Simulated and experimental study of hydraulic anti-lock braking system using sliding-mode PWM control », 2003. [En línea]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957415801000496> [Último acceso: 12 Febrero 2016].
- [2] Domínguez E. & Ferrer J, « Sistemas de transmisión y frenado », 2012. [En línea]. Available: [https://books.google.com.ec/books?id=kNj2AWAQAQBAJ&pg=PA351&dq=frenos+abs&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi ekdO56MPTAhWE34MKHR\\_](https://books.google.com.ec/books?id=kNj2AWAQAQBAJ&pg=PA351&dq=frenos+abs&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwi ekdO56MPTAhWE34MKHR_)
- [3] Montserrat L. & DaimlerChrysler, Sistema Anti Bloqueo de frenos (ABS) en Tracto-camiones para carga pesada, s.f., [En línea]. Available: <http://www.camionesy buses.com/tecnica/abs-camiones.htm> [Último acceso: 18 Enero 2016].
- [4] Ferrer J. & Checa G, (2010). Mantenimiento mecánico preventivo del vehículo, EDITEX.
- [5] Orozco, J. L. (2009). Reparación de Frenos Convencionales y ABS. México: México Digital Comunicación
- [6] BOSH. (2012). Automotive Brake Systems. England: American Technical Pub. Ltd
- [7] MERITOR WABCO. (2008). [En línea]. Available: [http://www.meritorwabco.com/MeritorWABCO\\_document/mm30sp.pdf](http://www.meritorwabco.com/MeritorWABCO_document/mm30sp.pdf) [Último acceso: 18 Abril 2016].
- [8] ANT, (2016) [En línea]. Available: <http://www.ant.gob.ec/index.php/noticias/estadisticas#.WQGIW0V97IU> [Último acceso: 30 Abril 2016].

[9] Arellano M, Noriega S. (2013) Diseño y construcción de un módulo de control ABS para el banco de frenos neumáticos, del laboratorio de mecánica de patio - ESPE extensión Latacunga. Unviversidad e Fuerzas Armadas ESPE.

## 7. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Luis Marcelo Arellano Rodríguez.- Ingeniero Automotriz, Coordinador de prácticas pre profesionales, Coordinador de seguimiento a graduados de la Tecnología en Mecánica Automotriz- Docente de la Universidad

de Fuerzas Armadas ESPE – Unidad de la Gestión de Tecnologías.

<sup>2</sup>



María Gabriela Tapia Carrillo.- Ingeniera Comercial, Docente de Nivelación SNNA en la Universidad Técnica de Cotopaxi

### REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	20 junio 2016
Fecha aceptación	06 noviembre 2016

## **DIAGNÓSTICO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN EL PROCESO DE CALENTAMIENTO EN DISTRIBUIDORES DE ASLFALTO MODELO ROSCO**

### **DIAGNOSIS OF THERMAL EFFICIENCY IN THE WELDING PROCESS IN ASLFALTO MODEL ROSCO DISTRIBUTORS**

*Emilia Aimacaña Sánchez<sup>1</sup>, Roberto Salazar Achig<sup>2</sup>*

*1,2. Universidad de Fuerzas Armadas ESPE – Departamento de Ciencias Exactas, Quijano y Ordoñez y Marques de Maenza s/n.*

*Email: <sup>1</sup>eeaimacana1@espe.edu.ec <sup>2</sup>ersalazar@espe.edu.ec*

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 14 (15)

#### **RESUMEN**

El consumo excesivo de diésel por parte del quemador asociado con la falta de control de los principales parámetros operacionales del proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto modelo Rosco genera una baja eficiencia térmica.

Para determinar la baja eficiencia térmica se realizaron mediciones de los parámetros de temperatura, tiempo de calentamiento de asfalto y consumo de diésel por parte del quemador, mediante instrumentación para establecer un procedimiento de cálculo que permita la evaluación del proceso de calentamiento de distribuidores.

La evaluación del intercambiador actual muestra que las pérdidas de calor por los gases producto de la combustión llega a 275,5 KW, estos datos son útiles para en simulaciones y futuros cálculos relacionados a consumo de combustible e implementación de un nuevo sistema de intercambio térmico.

#### **Palabras Clave:**

Eficiencia térmica, calentamiento de distribuidores, intercambio térmico, quemador rosco.

#### **ABSTRACT**

Excessive consumption of diesel by the burner associated with the lack of control of the main operational parameters of the heating process in Rosco asphalt distributors generates a low thermal efficiency.

In order to determine the low thermal efficiency, measurements of the parameters of temperature, asphalt heating time and diesel consumption by the burner were carried out by means of instrumentation to establish a calculation procedure allowing evaluation of the heating process of distributors.

The evaluation of the current exchanger shows that the heat loss from the combustion gases reaches 275.5 KW, this data is useful for simulations and future calculations related to fuel consumption and implementation of a new heat exchange system

#### **Keywords:**

Thermal efficiency, heating of distributors, heat exchange, burner screw.

## 1. INTRODUCCIÓN

El consumo de diésel por parte del quemador representa el gasto energético considerable en comparación a sistemas actuales para imprimación asfáltica, presentando un consumo teórico de 30 litros de diésel para calentar 2000 litros de asfalto; a diferencia del proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto modelo Rosco que consume aproximadamente 72 litros para calentar 1500 litros de asfalto desde una temperatura de 293K a 373K, siendo el diésel el mayor portador energético utilizado.

Al mismo tiempo que la operación del quemador de diésel genera gases producto de la combustión entre ellos CO<sub>2</sub> constituyéndose en un agente contaminante del ambiente.

Los principales problemas no resueltos relacionados con el proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto modelo Rosco son los siguientes:

- Baja eficiencia del proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto en el consumo de diésel.
- Temperatura variable de salida de asfalto para la imprimación.
- Pérdidas de energía por calor perdido en el proceso de calentamiento en el distribuidor de asfalto.

El intercambiador de serpentín sumergido, que actualmente se emplea en el proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto modelo Rosco, trabaja de forma ineficiente debido al elevado consumo de diésel y la pérdida de calor al exterior, dando como resultado el tiempo que se demora en calentar el asfalto y la cantidad de diésel que se necesita.

Se aplica una investigación de tipo experimental al actuar directamente

sobre los parámetros operacionales en el proceso de calentamiento de asfalto es lógico obtener una variación en la eficiencia térmica de dicho proceso, siendo el portador diésel y dejando puerta abierta a la evaluación sistemática el comportamiento energético del proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto modelo Rosco.

## 2. METODOLOGÍA

El estudio se realizará en el MTOP de Cotopaxi que cuenta con un equipo caminero para el proceso constructivo de carreteras, que consta de volquetas, motoniveladora, compactador, rodillo, distribuidor de asfalto modelo Rosco, barredora y pavimentadora, que cumple con la construcción y mantenimiento de vías en la provincia.

La metodología para el análisis y selección de intercambiadores de calor desde el punto de vista térmico analiza el flujo de calor aportado, el flujo de calor aprovechado y el flujo de calor perdido [1].

En el caso específico del tanquero de asfalto de la investigación, se analiza el calor aprovechado para el calentamiento del asfalto, el calor por transferencia al exterior a través del tanque de asfalto, el calor por pérdidas mediante los productos de combustión y el calor producido por la combustión de diésel.

### **Algoritmo de cálculo para el calor absorbido por el asfalto**

El análisis del calor absorbido por el asfalto se realiza mediante el siguiente algoritmo:

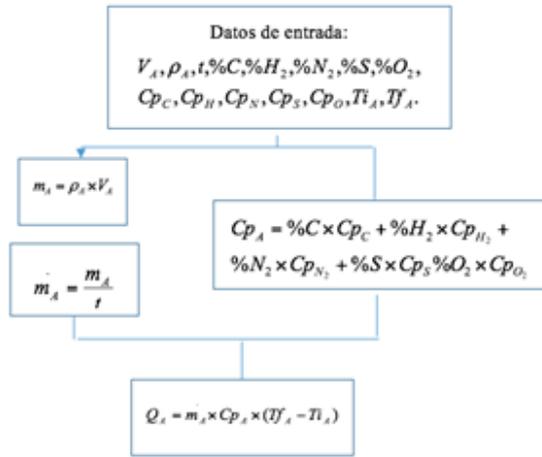


Figura 1. Algoritmo para el calor absorbido por el asfalto.

Donde:

$m_A$ : Flujo másico

$V_A$ : Volumen de asfalto contenido en el distribuidor;  $m^3$ .

$\rho_A$ : densidad del asfalto a 323 K;  $kg/m^3$ .

$T_{i_A}, T_{f_A}$ : temperaturas de entrada y salida del asfalto; K.

t: tiempo de calentamiento del asfalto, s.

$Cp_A, Cp_C, Cp_H, Cp_N, Cp_S, Cp_O$ : capacidad calorífica del asfalto, capacidad calorífica del carbono, capacidad calorífica del hidrógeno, capacidad calorífica del nitrógeno, capacidad calorífica del azufre, capacidad calorífica del oxígeno;  $J/kg \text{ } ^\circ C$ .

Algoritmo de cálculo para el calor por pérdidas mediante los gases de combustión. El análisis de los parámetros de pérdida de calor mediante los gases producto de la combustión se obtiene aplicando el algoritmo siguiente:

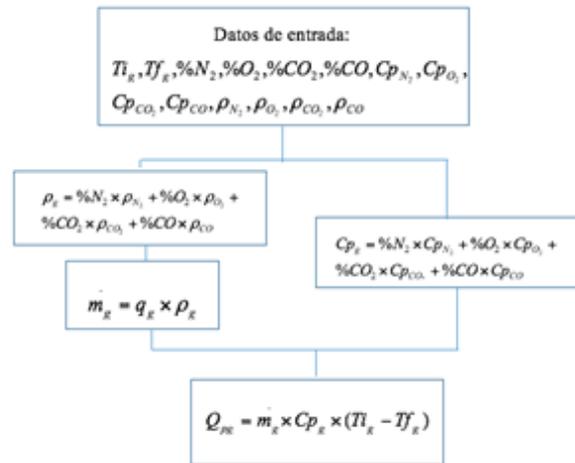


Figura 2. Algoritmo de cálculo de calor de los gases producto de la combustión

Donde:

$(m_g)$ : flujo másico los gases producto de la combustión del diésel (fluido caliente);  $kg/s$ .

$Cp_g$ : capacidad calorífica del gas de escape producto de combustión del diésel;  $J/kg \text{ } K$ .

$T_{i_g}, T_{f_g}$ : temperaturas inicial y final del gas producto de combustión del diésel; K.

$Cp_{gases}, Cp_{N_2}, Cp_{O_2}, Cp_{CO_2}, Cp_{CO}$ : capacidad calorífica de los gases producto de la combustión, capacidad calorífica del nitrógeno, capacidad calorífica del oxígeno, capacidad calorífica del dióxido de carbono, capacidad calorífica del monóxido de carbono;  $J/kg \text{ } ^\circ C$ .

$\%N_2, \%O_2, \%CO_2, \%CO$ : representan los porcentajes de nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono y monóxido de carbono respectivamente, en la masa de gases de combustión.

$\rho_g$  la densidad de la totalidad de los gases producto de la combustión, seccionando los componentes principales del gas en porcentaje, con su respectiva densidad a la temperatura al final de la chimenea.

**Algoritmo de cálculo del calor perdido por transferencia (convección).**

El análisis del calor perdido por transferencia (convección) se realiza mediante el siguiente algoritmo:

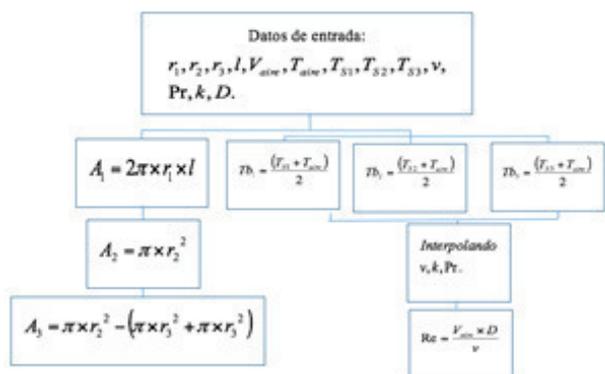


Figura 3. Algoritmo de cálculo del calor perdido por transferencia (convección)

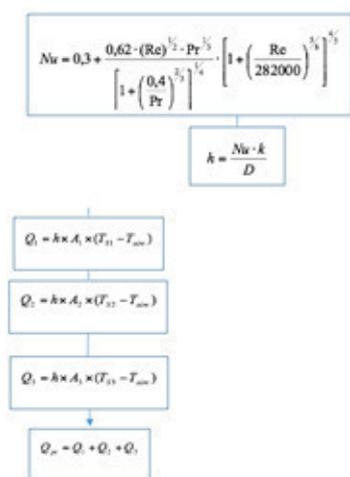


Figura 4. Algoritmo de cálculo del calor perdido por transferencia

Donde:

h: coeficiente transferencia de calor por convección; adimensional.

A: área de transferencia de calor por convección; m<sup>2</sup>.

T<sub>s</sub>, T<sub>aire</sub>: temperatura promedio de la superficie del tanquero de asfalto y la temperatura del aire; K.

Re: razón de las fuerzas de inercia y viscosas; Reynolds.

ν: velocidad de aire que circula por el exterior; m/s.

D: longitud característica, diámetro del tanquero contenedor de asfalto; m.

ν: viscosidad relativa o estática; m<sup>2</sup>/s.

Según Churchill y Bernstein; el número de Nusselt se obtiene por la siguiente ecuación experimental [2]:

$$Nu = 0,3 \frac{0,6 \cdot Re^{1/2} Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{1/4}\right]^{1/4}} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

Nu : gradiente de temperatura adimensional de una superficie; Nusselt.

Pr : razón de las difusiones de momento y temperatura; Prandtl.

**Algoritmo de cálculo del consumo teórico de diésel en el quemador.**

Análisis de los resultados en el cálculo del consumo de combustible en el distribuidor de asfalto modelo rosco es el siguiente:

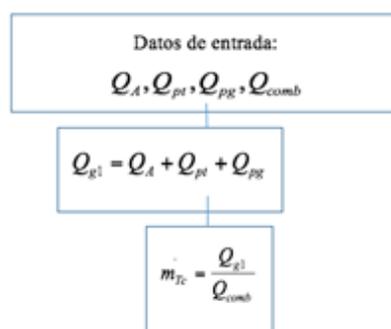


Figura 5. Algoritmo de cálculo del consumo de diésel en el quemador

**Algoritmo de cálculo del consumo experimental de diésel en el quemador**

El proceso de cálculo es el siguiente:

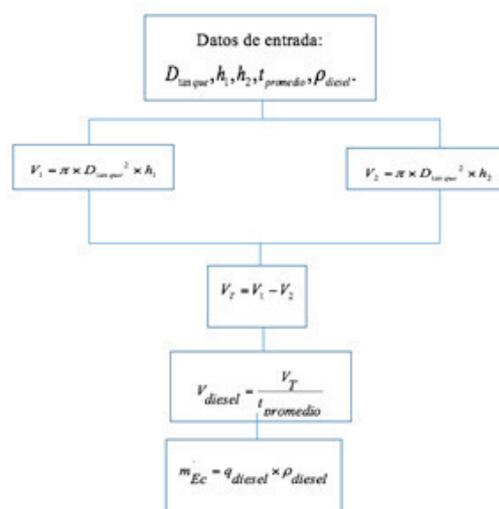


Figura 6. : Algoritmo de cálculo del consumo experimental de diésel

### Algoritmo de cálculo para la eficiencia sistema actual

Los resultados obtenidos del calor  $Q_{g1}$ , es decir, el calor gastado en el proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto en relación con el calor utilizado para calentar el asfalto  $Q_A$ , permite evaluar el proceso en relación a su eficiencia de acuerdo al siguiente algoritmo:

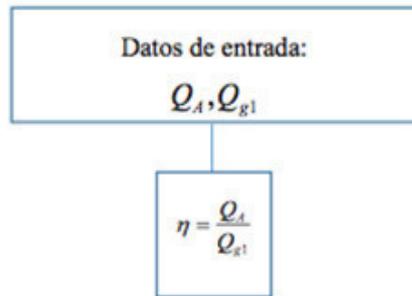


Figura 7. Algoritmo para el cálculo de la eficiencia del sistema actual

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Resultados del calor absorbido por el asfalto

Los resultados del algoritmo de la figura 1 para el cálculo del calor absorbido por el asfalto se muestra en las tablas siguientes:

Tabla 1. Flujo másico del asfalto

K	%C	Cp <sub>c</sub>	%H <sub>2</sub>	Cp <sub>A</sub> (kJ/kg K)							
				Cp <sub>H<sub>2</sub></sub>	%N <sub>2</sub>	Cp <sub>N<sub>2</sub></sub>	%S	Cp <sub>S</sub>	%O <sub>2</sub>	Cp <sub>O<sub>2</sub></sub>	Cp <sub>A</sub>
373	0,7800	0,9215	0,11	14,4530	0,01	1,0434	0,05	0,7080	0,05	0,9350	2,4012
375	0,7800	0,9268	0,11	14,4550	0,01	1,0435	0,05	0,7080	0,05	0,9355	2,4056
377	0,7800	0,9322	0,11	14,4570	0,01	1,0436	0,05	0,7080	0,05	0,9360	2,4100
379	0,7800	0,9376	0,11	14,4590	0,01	1,0437	0,05	0,7080	0,05	0,9365	2,4145
381	0,7800	0,9430	0,11	14,4610	0,01	1,0439	0,05	0,7080	0,05	0,9371	2,4189

Tabla 2. Capacidad calorífica del asfalto

Calor del asfalto (KW)					
Tf <sub>A</sub> (K)	Ti <sub>A</sub> (K)	ΔT <sub>A</sub> (K)	m <sub>A</sub> (kg/s)	Cp <sub>A</sub> (kJ/kg K)	Q <sub>A</sub> (KW)
373	293	80	0,1833	2,4012	35,2170
375	294	81	0,1980	2,4056	38,5810
377	295	82	0,2080	2,4100	41,1022
379	296	83	0,1731	2,4145	34,6848
381	297	84	0,1793	2,4189	36,4414
PROMEDIO					37,2053

Tabla 3. Calor absorbido por el asfalto

Calor del asfalto (KW)					
Tf <sub>A</sub> (K)	Ti <sub>A</sub> (K)	ΔT <sub>A</sub> (K)	m <sub>A</sub> (kg/s)	Cp <sub>A</sub> (kJ/kg K)	Q <sub>A</sub> (KW)
373	293	80	0,1833	2,4012	35,2170
375	294	81	0,1980	2,4056	38,5810
377	295	82	0,2080	2,4100	41,1022
379	296	83	0,1731	2,4145	34,6848
381	297	84	0,1793	2,4189	36,4414
PROMEDIO					37,2053

### Resultados del calor por pérdidas mediante los gases de combustión

Los resultados del algoritmo de la figura 2 se muestran en las tablas siguientes:

Tabla 4. Capacidad calorífica de los gases producto de la combustión

Cp <sub>g</sub> de los gases (kJ/kg K)									
K	N <sub>2</sub>	Cp <sub>N<sub>2</sub></sub>	O <sub>2</sub>	Cp <sub>O<sub>2</sub></sub>	CO <sub>2</sub>	Cp <sub>CO<sub>2</sub></sub>	CO	Cp <sub>CO</sub>	Cp <sub>g</sub>
402	0,805	1,0452	0,062	0,9432	0,121	0,94356	0,012	1,04924	1,0266
403	0,796	1,0453	0,059	0,9438	0,132	0,94434	0,013	1,04936	1,0260
406	0,777	1,0456	0,078	0,9456	0,135	0,94668	0,01	1,04972	1,0245
407	0,782	1,0457	0,083	0,9462	0,13	0,94746	0,005	1,04984	1,0247
408	0,792	1,0458	0,072	0,9468	0,128	0,94824	0,008	1,04996	1,0262

Tabla 5. Densidad de los gases producto de la combustión

Densidad (kg/m <sup>3</sup> )									
K	N <sub>2</sub>	ρ <sub>N<sub>2</sub></sub>	O <sub>2</sub>	ρ <sub>O<sub>2</sub></sub>	CO <sub>2</sub>	ρ <sub>CO<sub>2</sub></sub>	CO	ρ <sub>CO</sub>	ρ <sub>g</sub>
402	0,80	0,8387	0,062	0,9577	0,121	1,3198	0,01	0,8383	0,904
403	0,79	0,8368	0,059	0,9556	0,132	1,3178	0,01	0,8364	0,907
406	0,77	0,8312	0,078	0,9492	0,135	1,308	0,01	0,8308	0,904
407	0,78	0,8293	0,083	0,947	0,13	1,305	0,00	0,8289	0,900
408	0,79	0,8274	0,072	0,9449	0,128	1,3021	0,00	0,827	0,896

Tabla 6. Flujo másico de los gases producto de la combustión

Flujo másico (kg/s)			
K	V m <sup>3</sup> /s	ρ <sub>g</sub> kg/m <sup>3</sup>	m <sub>g</sub> kg/s
402	0,28	0,9043	0,7686
403	0,29	0,9073	0,7349
406	0,27	0,9048	0,6876
407	0,31	0,9009	0,6487
408	0,29	0,8966	0,6904

Tabla 7. Calor de pérdida por los gases producto de la combustión

Calor de pérdida de los gases KW					
Tf <sub>g</sub> (K)	Ti <sub>g</sub> (K)	ΔT <sub>g</sub> (K)	m <sub>g</sub> (kg/s)	Cp <sub>g</sub> (kJ/kg K)	Q <sub>g</sub> (KW)
402	789	387	0,7686	1,0266	100,5975
403	791	388	0,7349	1,0260	104,7471
406	792	386	0,6876	1,0245	96,6039
407	805	398	0,6487	1,0247	113,8985
408	793	385	0,6904	1,0262	102,7320
PROMEDIO					103,7158

**Resultados calor perdido por transferencia al exterior (convección)**

Los resultados del algoritmo de cálculo de la figura 3 se muestran en las tablas siguientes:

Las áreas de transferencia de calor por convección se dividen en tres así:

Tabla 8. Áreas del tanquero contenedor de asfalto

Áreas del tanquero (m <sup>2</sup> )	
A1	27,143
A2	4,524
A3	4,459

Los promedios de temperaturas en las diferentes áreas de transferencia de calor por convección a lo largo del tanquero contenedor de asfalto.

Tabla 9. Datos del proceso de transferencia por

T <sub>S1</sub> (K)	T <sub>S2</sub> (K)	T <sub>S3</sub> (K)	T <sub>aire</sub> (K)	V <sub>aire</sub> (m/s)	D (m)	Tb <sub>1</sub> (K)	Tb <sub>2</sub> (K)	Tb <sub>3</sub> (K)
295	297	303	288	5,278	2,4	291,5	292,5	295,5

Con las temperaturas promedio Tb, de las diferentes áreas consideradas para la experimentación alrededor del tanquero contenedor de asfalto permiten interpolar las propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica consideradas en tablas, resultados que se observan en la tabla siguiente:

Tabla 10. Propiedades termofísicas del aire

Propiedades termofísicas del aire a presión atmosférica			
Tb	v	Pr	k
291,5	15,1335	0,70921	0,0257
292,5	15,2225	0,70895	0,0257
295,5	15,4895	0,70817	0,02594

Tabla 11. Resultados de los números adimensionales

Re	Nusselt	h
836995,19	1062,3856	11,376379
832101,6	1057,0634	11,319387
817758,27	1041,4469	11,256305

El calor perdido por transferencia (convección), se presenta en la siguiente tabla dividido por áreas para al final mostrar la suma del calor total perdido por convección en el proceso.

Tabla 12. Calor perdido por transferencia

Calor perdido por transferencia al exterior (KW)			
Qp1 (W)	Qp2 (W)	Qp3 (W)	Qpt (KW)
2161,55714	460,870388	752,885601	3,375

**Resultados del calor disponible por la combustión de diésel**

Para calcular el poder calorífico se hace referencia a la tabla 13 y se aplican las fórmulas para el proceso de cálculo del poder calorífico [3].

Tabla 13. Temperatura de cocción del diésel

Tiempo (min)	Temperatura (°C)
0,5	26,107
1	26,09
1,5	26,079
2	26,07
2,5	26,06
3	26,054
3,5	25,043
4	26,037
4,5	26,03
5	26,023

ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO  
No. 5 Vol. 1 / 2016 (15) ISSN 1390 - 7395 (14/15)

$$t = t_c - t_a - r_1 (b - a) - r_2 (c - b) \quad \text{Ec.2}$$

$$t = 30,398 - 26,023 - (-0,017) (6,5 - 5) - 0,028 (9 - 6,5)$$

$$t = 4,3305 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$e_1 = \frac{c_1}{1000} = \frac{23900}{1000} \quad \text{Ec.3}$$

$$e_1 = 23,9 \text{ cal}$$

$$e_2 = 13,7 \# c_2 \# m = 13,7 \# 1,021,02 \quad \text{Ec.4}$$

$$e_2 = 13,974 \text{ cal}$$

$$e_3 = 2,3 \# c_3 = 2,3 \# 9,15 \quad \text{Ec.5}$$

$$e_3 = 21,045 \text{ cal}$$

$$Q_{st} = \frac{t \# W \# (e_1 - e_2 - e_3)}{m} \quad \text{Ec.6}$$

$$Q_{st} = \frac{4,3305 \# 2426 - 23,9 - 13,974 - 21,045}{1,02}$$

$$Q_{st} = 10242,0333 \frac{\text{cal}}{\text{gr}} = 42881,3452 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

Sabiendo que el porcentaje de hidrógeno del combustible es 11% y el porcentaje de humedad es 1,5% se calcula el calor disponible mediante la ecuación 7 [4].

$$Q_{it} = Q_{st} - 2500 \# \left( \frac{9H}{100} t + \frac{W}{100} t \right) \quad \text{Ec.7}$$

$$Q_{it} = 42881,3452 - 2500 \# \left( \frac{9 \# 11}{100} t + \frac{1,5}{100} t \right)$$

$$Q_{it} = 40368,8452 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

El calor disponible por la combustión de diésel en el quemador es de:  
 $Q_{comb} = Q_{it} = 40368,8452 \text{ kJ/kg}$ .

### Consumo teórico de diésel en el quemador.

Aplicando el algoritmo de cálculo de la figura 4 para el consumo teórico de diésel por parte del quemador se obtienen los siguientes resultados mostrados en las tablas a continuación:

Tabla 14. Flujo másico de combustible

$Q_{asf} \text{ (KW)}$	$Q_{pt} \text{ (KW)}$	$Q_{pg} \text{ (KW)}$	$Q_{g1} \text{ (KW)}$	$Q_{comb} \text{ (kJ/kg)}$	$\dot{m}_{Tc} \left( \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)$
37,2053	3,375	272,8212	313,402	40368,8452	0,00776346

El calor utilizado en el proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto es de  $Q_{g1} = 313,402 \text{ kW}$  en promedio y el consumo teórico de diésel en el quemador es de  $\dot{m}_{Tc} = 7,763 \times 10^{-3} \text{ Kg/s}$ .

### Consumo experimental de diésel en el quemador

Según el algoritmo de cálculo mostrado en la figura 5 se obtienen los resultados mostrados en las tablas a continuación: La densidad del diésel a 293 K, es de  $875 \text{ kg/m}^3$  [5].

Tabla 15. Consumo experimental de diésel en relación a las alturas

$h_1 \text{ (m)}$	$h_2 \text{ (m)}$	$t_{promedio} \text{ (s)}$
1,2	0,21	7920

Tabla 16. Flujo másico de diésel

$V_1 \text{ (m}^3\text{)}$	$V_2 \text{ (m}^3\text{)}$	$V_t \text{ (m}^3\text{)}$	$V \text{ (m}^3\text{/s)}$	$\dot{m}_{Ec} \text{ (kg/s)}$
0,085	0,015	0,07	8,836E-06	0,00773402

Dando como resultado el consumo experimental de diésel en el quemador  $\dot{m} = 7,734 \times 10^{-3} \text{ kg/s}$ .

### Eficiencia del sistema actual

De acuerdo al algoritmo de cálculo de la figura 6 los resultados se muestran en las tablas siguientes:

Cabe mencionar que se presentan los valores promedio, tanto del calor del asfalto  $Q_A$  como del calor gastado en el proceso  $Q_{g1}$ .

Tabla 17. Eficiencia del proceso actual

$Q_A \text{ (KW)}$	$Q_{g1} \text{ (KW)}$	$\eta \text{ (\%)}$
37,2053	313,4018	11,87

### Discusión

En el proceso de calentamiento en distribuidores de asfalto el calor utilizado para llevar al asfalto desde una temperatura inicial hacia una temperatura final de trabajo en relación al calor por pérdidas por los gases producto de la combustión y las pérdidas por transferencia de calor al exterior, muestran una eficiencia promedio



de 11,87%, con las mayores pérdidas por parte de los gases producto de la combustión que salen por la chimenea a altas temperaturas, es posible analizar este fenómeno mediante gráficas que muestran el calor por pérdidas por los gases producto de la combustión en relación a la eficiencia. Figura 8.

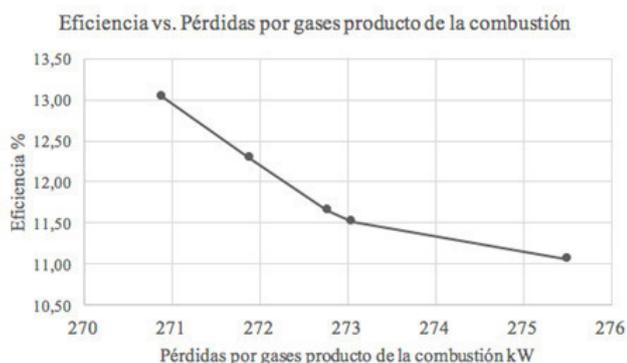


Figura 8. Eficiencia vs. Pérdidas por gases producto de la combustión

En la figura 9 se expone el comportamiento de las pérdidas de calor por transferencia al exterior (convección) en función de la eficiencia del proceso, es posible concluir que la eficiencia no se ve afectada por las pérdidas por transferencia.

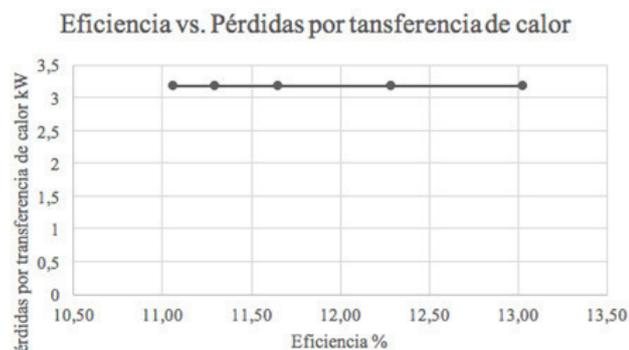


Figura 9. : Eficiencia vs. Pérdidas por transferencia de calor

### **Eficiencia del sistema actual**

La figura 10 muestra el flujo másico de combustible (diésel) consumido durante el calentamiento en el distribuidor de asfalto modelo Rosco del MTOP de Cotopaxi y las pérdidas por los gases producto de la combustión, mientras más son las pérdidas también aumenta el consumo de diésel.

Flujo másico de diésel vs. Pérdidas por gases producto de la combustión

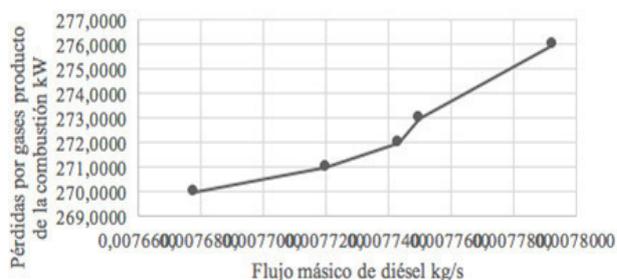


Figura 10. Flujo másico de combustible versus pérdidas por gases producto de la combustión

En la figura 11 se expone el comportamiento del flujo másico de combustible en función de las pérdidas por transferencia de calor por convección al exterior, los resultados obtenidos muestran que el consumo de diésel no se ve afectado por las pérdidas por transferencia por convección, debido a que permanece constante.

Flujo másico de diésel vs. Pérdidas por transferencia de calor

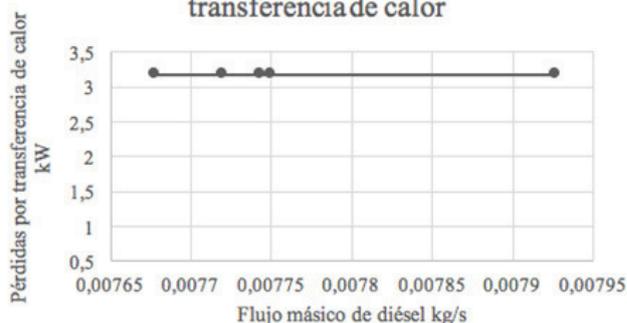


Figura 11. Flujo másico de diésel versus Pérdidas por transferencia de calor por convección

## **4. CONCLUSIONES**

Se obtuvieron los flujos másicos del asfalto 0,1883kg/s, de los gases producto de la combustión 0,6873 Kg/s; capacidades caloríficas del asfalto 2,4112KJ/Kg.K como de los gases producto de la combustión 1,026KJ/Kg.K y el poder calorífico del diésel 403688KJ/Kg. Los algoritmos de cálculo para los flujos de calor en el asfalto 37,2015KW, en los gases producto de la combustión 272,8212KW y las pérdidas por convección 3,375KW, en esta investigación permitieron establecer consumos de combustible teórico

El comportamiento de la eficiencia disminuye con el incremento de las pérdidas y con la reducción del consumo de combustible. El valor máximo alcanzado es de 13,03% con pérdidas de 270 KW. Los valores promedio son de 11,87% con pérdidas de 272 KW.

## 5. REFERENCIAS

- [1] J.P. Holman, "Heat Transfer," McGraw-Hill Higher Education. 10th Edition. New York United States, 2009.
- [2] F. Incropera, "Fundamentals of Heat and Mass Transfer", John Wiley & Sons. New York. U.S.A, 2013.
- [3] I.Parr, "Colorímetro de bomba de oxígeno de chaqueta sencilla Parr 1341". Parr Instruments Company, 2014.
- [4] E. Torrella, "La Combustión, combustibles y tipos", Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España, 2014.
- [5] L.Valencia, "Caracterización de mezclas diésel-biodiésel orientadas a disminuir las emisiones contaminantes provocadas por Fuentes móviles. Densidad del diésel a 15°C", 2013.

## 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup>Emilia Aimacaña Sánchez. Magíster en Gestión de Energías, Ingeniera Automotriz, Docente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.



<sup>2</sup> Roberto Salazar A. Magíster en Gestión de Energías, Ingeniero en Electromecánica, Docente en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga.

REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN	
Fecha recepción	20 junio 2016
Fecha aceptación	06 noviembre 2016

## COMPARACIÓN ENTRE ANÁLISIS ESTÁTICO Y DINÁMICO DEL CÁLCULO DE CARGA SÍSMICA SEGÚN LA NORMA ECUATORIANA DE CONSTRUCCIÓN

### COMPARISON BETWEEN STATIC AND DYNAMIC ANALYSIS OF SEISMIC LOAD CALCULATION ACCORDING TO THE ECUADORIAN CONSTRUCTION STANDARD

Geovanny Guillermo Novillo Andrade<sup>1</sup>, Javier Enrique Orna Chávez<sup>2</sup>  
<sup>1,2</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Panamericana sur km. 1 ½  
Riobamba - Ecuador

Email: <sup>1</sup>geovanny.novillo@esPOCH.edu.ec, <sup>2</sup>javier.orna@esPOCH.edu.ec

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 15 (15)

#### RESUMEN

En la región andina los países como Ecuador, Chile, Perú, Colombia tienen riesgo sísmico elevado, por lo cual sus estructuras deben cumplir con requisitos de resistencia frente a un sismo. El presente artículo pretende calcular y comparar cargas sísmicas calculadas según la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC la cual propone un análisis estático en estructuras de hasta 10 pisos con las cargas determinadas en un análisis dinámico específicamente se utilizará métodos modales, con la finalidad de establecer una relación entre los 2 análisis. Para ello se estudiará el comportamiento de una estructura frente a una carga sísmica para ello se empleará el espectro de aceleraciones que ofrece la Norma Ecuatoriana de Construcción.

#### Palabras Clave:

Riesgo sísmico, análisis estructural, cortante basal.

#### ABSTRACT

In the Andean region countries like Ecuador, Chile, Peru, Colombia have high seismic risk, so their structures must meet resistance requirements against an earthquake. The present article aims to calculate and compare seismic loads calculated according to the Ecuadorian Construction Standard NEC which proposes a static analysis in structures of up to 10 floors with the loads determined in a dynamic analysis specifically using modal methods, with the purpose of establishing a Relationship between the 2 analyzes. For this purpose, the behavior of a structure against a seismic load will be studied. For this purpose, the acceleration spectrum offered by the Ecuadorian Construction Standard will be used.

#### Keywords:

Seismic risk, structural analysis, basal shear.



## 1. INTRODUCCIÓN

Una de las cargas más peligrosas que debe afrontar una estructura es la carga de sismo, la cual se produce por una rápida y repentina liberación de energía, está produce vibración en la tierra que genera una aceleración en las bases de una estructura, esta liberación de energía principalmente se produce por el deslizamiento de la corteza terrestre, normalmente éstas se producen a lo largo de fallas preexistentes [1], el mecanismo de generación de un sismo no era muy entendido por parte de los geólogos, hasta que en 1906 después del sismo de San Francisco se pudo comprobar que la placa del Pacífico se había desplazado 4.7 metros hacia el norte con respecto a la placa de Norteamericana [1], estudios sobre el riesgo sísmico se remontan a 1980[2], donde se pretende estimar el riesgo de un sector frente a cargas sísmicas.

Se han desarrollado varias metodologías para evaluar el riesgo debido a riesgos naturales, por lo general estas metodologías proporcionan una estimación del daño físico potencial en una zona determinada, el daño físico se evalúa en edificios, personas muertas, heridas, sin hogar, desempleados [3].

El riesgo sísmico se define como la función de probabilidad de pérdidas derivadas de los daños a una estructura como consecuencia de la acción de un sismo [4] el mismo depende de 3 factores principalmente que son la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad[5], la peligrosidad sísmica se define como la capacidad de daño del movimiento del suelo[6], por otra parte la vulnerabilidad sísmica de una estructura expresa la relación entre la intensidad del movimiento del suelo generado por el sismo y el desplazamiento de un elemento de la estructura[4].

La intensidad de un sismo es una medida indirecta de la fuerza del sismo, que se observa en edificaciones, personas, objetos

y en si la naturaleza, entre las escalas más conocidas son la Mercalli Modificada que consta con 12 grados [7], los mismo se pueden relacionar fácilmente con la PGA, que es la aceleración que sufre la superficie del suelo, otra escala muy utilizada es la Escala Macrosísmica Europea (EMS-98), y la escala de Richter que mide la magnitud del sismo.

Muchos países de la región andina tienen en sus territorios fallas, países como Ecuador, Chile, Perú, Colombia entre otros se encuentran sobre la placa Sudamericana en su borde occidental donde convergen y generan zonas de subducción las placas de Nazca[8], por lo cual estos países tienen un riesgo sísmico elevado. El Centro de Sismología Nacional de Chile CSN, contabiliza 1570 sismos ocurridos en Chile con una magnitud mayor o igual a 7 en la escala de Richter, el primero de abril del 2014 se produjo un sismo de 8.2 a una profundidad de 38.9 km, que afecto a varias poblaciones del norte de Chile.

En Ecuador se han registrado varios sismos de gran magnitud en los últimos 50 años, el factor que más pesa en la magnitud es la dimensión de la superficie de falla que se rompe y se desplaza considerablemente para producir un sismo [9], el último sismo de gran magnitud se produjo el 16 de Abril del 2016 con una magnitud de 7.8 con epicentro en la costa ecuatoriana entre las provincias de Esmeraldas y Manabí, a una profundidad de 20 km, causando la muerte de 661 personas[10], y el colapso de la mayoría de las estructuras cercanas al epicentro del sismo en el gráfico 1 se muestra una edificación de 3 pisos que colapso debido al sismo producido.



Figura 1. Edificación colapsada en sismo producido en Ecuador, 2016.

La aceleración medida en la superficie del suelo PGA en cercanía del epicentro del sismo fue de 10.41 m/s<sup>2</sup>[11], la aceleración es importante en el diseño de edificaciones debido a que es directamente proporcional a la fuerza que debe soportar la estructura durante un evento sísmico.

El sismo tuvo una intensidad máxima de 9 EMS en la escala Macrosísmica Europea en las zonas de Pedernales y Chamanga, en estas poblaciones la mayoría de edificaciones sufrió daños severos [11], un sismo de esta categoría se define como un sismo destructivo según la EMS-98, con las siguientes características: “Pánico general. Muchas construcciones endebles colapsan. Aun los edificios ordinarios bien construidos muestran daños serios: fallas graves en los muros y falla estructural parcial.” [12], [13].

Este sismo ha demostrado que la mayoría de las construcciones en el país no cumplen con los requisitos mínimos para soportar este tipo de fenómenos naturales, desde el 2011 se encuentra vigente en el país la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC, esta norma establece los requerimientos mínimos para diseñar y construir una edificación resistente a sismos, la norma NEC-SE-DS divide al territorio ecuatoriano en 6 zonas sísmicas[14], como se muestra en la gráfica 2.

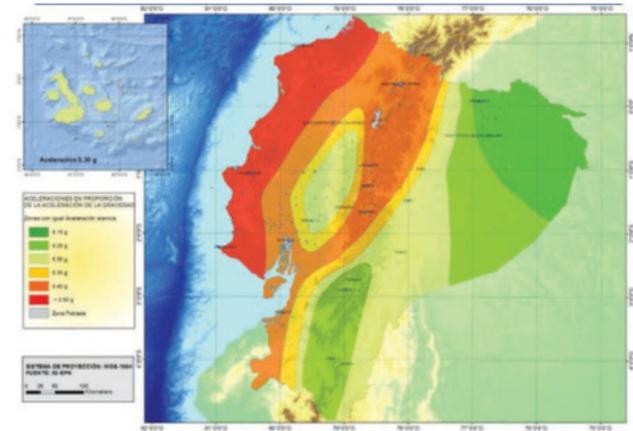


Figura 2. Zonas sísmicas en Ecuador

El mapa de las zonas sísmicas de Ecuador se basa en un período de retorno de 475 años, y establece un factor Z que es la aceleración esperada en roca, las unidades son gravedades, es decir 9.81 m/s<sup>2</sup>, como se aprecia en el gráfico la zona de más alto riesgo es la costa ecuatoriana con un factor Z igual a 0.5.

Adicional a la zona sísmica la NEC-SE-DS reconoce 6 tipos de suelos siendo el más adecuado para edificaciones el tipo A y el menos apropiado el tipo F, en las zonas de Pedernales los estudios post sismo demuestran que el suelo es tipo F, por lo que para construir edificaciones en esos terrenos se debió primero hacer un análisis de suelos para establecer el verdadero riesgo sísmico de estas áreas.

La NEC-SE-DS establece 2 métodos para el cálculo de la carga sísmica, un método estático en el cual se calcula una carga cortante basal de diseño V, la misma se calcula en función a la zona sísmica y el tipo de terreno, adicional se puede calcular la carga dinámica que el sismo produce por medio de la respuesta de espectro, en el presente artículo se analizará una estructura simple para calcular la carga de sismo en base a los 2 métodos mencionados para establecer un rango en donde esta suposición es válida.

En ambos casos es necesario determinar espectro de respuesta de aceleraciones, ya que es el punto de partida para el cálculo

de las fuerzas laterales de diseño[15]. Un espectro de respuesta indica la reacción del suelo frente a una vibración producida por un sismo, lo más común es indicar esta reacción en función de aceleraciones principalmente ya que las normas ofrecen espectro de respuesta elástico, es decir considerando que la reacción del suelo y la estructura son similares, pero debido al comportamiento elástico de las estructuras estas no son iguales aunque si tienen una relación entre sí, para corregir esta variación se debe aplicar factores de reducción por ductilidad [16].

El espectro de respuesta de aceleraciones principalmente depende de 2 factores la aceleración de la base y el período de vibración de la estructura. La norma NEC-SE-DS utiliza espectros de respuesta elásticos de aceleraciones como se muestra en la gráfica 3.

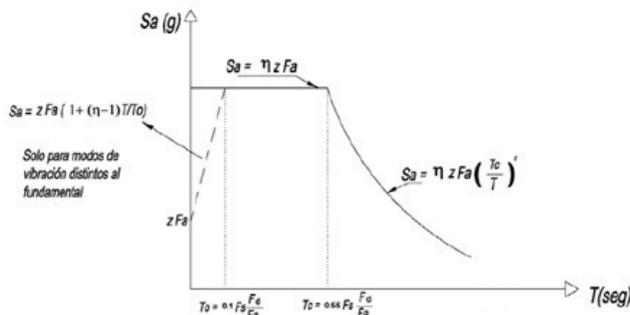


Figura 3. Espectro de respuesta elástico de aceleraciones según NEC-SE-DS

El espectro de respuesta elástico mostrado en la gráfica anterior varía dependiendo el tipo de suelo, la zona sísmica, y la región. Por lo cual se deberá fijar estas condiciones para así calcular las fuerzas laterales de diseño en las estructuras a analizar y poder comparar las mismas con un análisis estático y dinámico a fin de compararlas y establecer un rango en el cuál es aceptable utilizar una carga estática equivalente en vez del análisis dinámico.

## 2. METODOLOGÍA

Para el cálculo de la carga de sismo primero se deben establecer las condiciones de la estructura, las mismas que se mencionan a continuación:

- Zona sísmica: VI ( $Z = 0.5$ )
- Tipo de suelo: C ( $F_a = 1.18$ ,  $F_d = 1.06$ ,  $F_s = 1.23$ )
- Región: Costa- Esmeraldas ( $\eta = 2.48$ )

La estructura a analizar será una estructura tipo pórtico con vigas infinitamente rígidas y un grado de libertad por piso, para simplificar los cálculos, en la figura 4 se muestra un esquema de la estructura a analizar, progresivamente se aumentará el número de pisos para la comparación entre el análisis estático y dinámico.

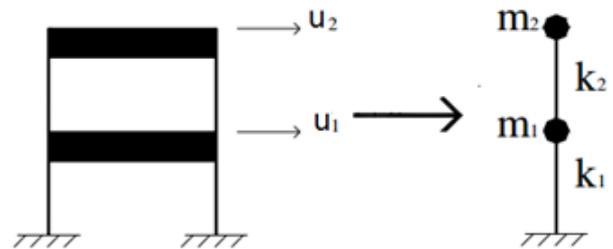


Figura 4. Modelado de la estructura a analizar

Las características del modelo a utilizar son:

- Columnas = 50x50 cm
- Módulo de Elasticidad del Concreto = 240 000 kgf/cm<sup>2</sup>
- Altura de cada piso = 3 m
- Peso en cada nivel = 25 T
- Longitud = 6 m
- Factor de ductilidad = 3
- Amortiguamiento = 5%

Con estas restricciones a continuación se detallan los cálculos para las cargas laterales de sismo para un análisis estático y dinámico. Se utilizará estructuras desde 2 pisos hasta 10 pisos para evaluar las cargas calculadas. Con las condiciones establecidas para una zona sísmica VI y un tipo de suelo

tipo C para una construcción ubicada en Esmeraldas el espectro de respuesta elástico de aceleraciones se muestra en la gráfica 5.

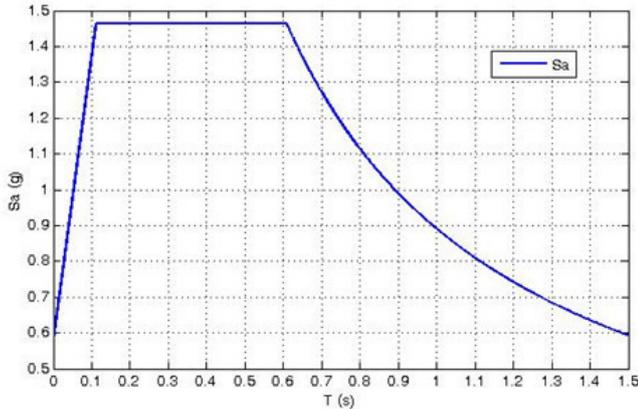


Figura 5. Espectro de respuesta elástico de aceleraciones para la estructura propuesta

### Cálculo de la carga de sismo análisis dinámico - análisis estático [17]

Cuando una estructura soporta una carga de sismo, lo que se somete es a una aceleración de su base que provocará fuerzas laterales, la aceleración producida por un sismo tiene un espectro con varias frecuencias por lo que es una carga dinámica, entonces la ecuación diferencial que controla la respuesta de sistemas con un grado de libertad ante una excitación externa es:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = -m\ddot{x}_g(t) \quad Ec. 1$$

Como se puede apreciar las propiedades requeridas de la estructura para el análisis son la masa (m), el amortiguamiento del sistema(c) y la rigidez (k). Si introducimos la razón de amortiguamiento ( $\xi$ ), el período fundamental de vibración ( $T_n$ ) y dividimos para la masa se tiene:

$$\ddot{x}(t) + \left(\frac{4\pi}{T_n}\xi\right)\dot{x}(t) + \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad Ec. 2$$

La mayoría de estructuras de acero y concreto tienen un factor de amortiguamiento bajo alrededor de 5 a 7% (Newmark, 1982,

pág. 54) lo que provoca una respuesta subamortiguada en la cual la estructura presenta oscilaciones, la norma NEC recomienda para los cálculos considerar un 5% como razón de amortiguamiento para las estructuras y edificaciones [14].

Para la solución del problema se considerará un sistema elástico lineal por lo que se puede utilizar métodos de análisis modal, la mayoría de normas de diseño sísmico consideran adecuado un análisis espectral en la cual se calcula la respuesta máxima en cada modo de vibración de la estructura y la respuesta total se determina por medio de una combinación de máximos modales CQC (Combinación Cuadrática Completa).

A continuación se detallan los pasos a seguir con este método:

- Definir la dirección del sismo.
- Calcular la matriz de masa y rigidez de la estructura.
- Definir el factor de amortiguamiento de la estructura.
- Calcular los períodos y modos de vibración.
- Calcular los factores de participación de cada modo.
- Calcular la respuesta máxima en cada modo.
- Obtener la respuesta total por medio de CQC.

### 3. RESULTADOS

Para el análisis de la carga sísmica con el cálculo propuesto por la NEC 2015 y por un análisis dinámico se analiza la estructura mencionada considerándola desde 1 piso hasta 10 pisos, manteniendo constante las características del suelo y la zona sísmica en los siguientes cuadros se detallan los resultados obtenidos.

Tabla 1. Cortante basal para estructuras en toneladas

Pisos	Cortante Basal Estática	Cortante Basal Dinámica
1	14.63	13.42
2	29.26	27.78
3	43.89	40.29
4	58.53	52.57
5	70.65	64.75
6	71.95	66.40
7	73.07	68.13
8	74.05	69.94
9	74.93	71.81
10	75.72	73.70

Tabla 2. Período fundamental de vibración

Pisos	Según NEC 2015	Según análisis dinámico
1	0.1478	0.0952
2	0.2759	0.1540
3	0.3974	0.2138
4	0.5148	0.2740
5	0.6293	0.3343
6	0.7415	0.3947
7	0.8518	0.4552
8	0.9606	0.5156
9	1.0680	0.5761
10	1.1743	0.6367

En las siguientes gráficas se muestran las tendencias de la cortante basal y el período fundamental de vibración obtenido con el análisis estático y dinámico.

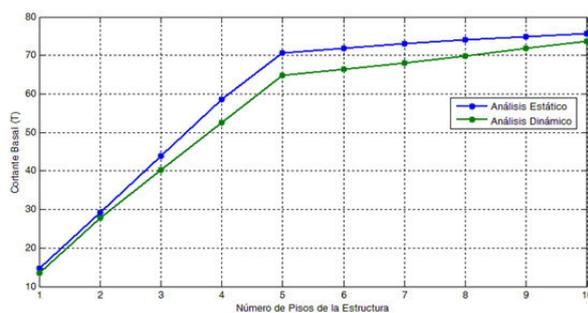


Figura 6. Cortantes Basales vs. Número de pisos

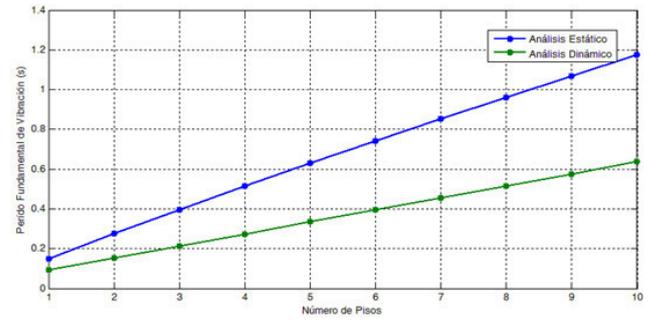


Figura 7. Períodos fundamentales vs. Número de pisos

#### 4. CONCLUSIONES

Se puede notar que en estructuras hasta de 10 pisos la cortante calculada por el análisis estático es mayor a la calculada por el análisis dinámico, por lo que se puede concluir que el análisis estático proporcionado por la Norma Ecuatoriana de la Construcción es una carga conservadora que puede ser tomada en el cálculo de cargas sísmicas en este tipo de estructuras.

Se debe tomar en cuenta que en el método estático se considera un solo período como base mientras que en el análisis dinámico la NEC recomienda que se utilice los modos de vibración necesarios de tal forma que se considere el 90% de participación de masas en el análisis, en estructuras regulares el primer periodo es el más crítico por lo que se recomienda un análisis estático, mientras que en estructuras especiales no regulares no siempre el primer período de vibración es el más crítico y es en estos casos en donde se recomienda un análisis dinámico.

Se puede apreciar un decrecimiento muy notorio en la cortante basal en estructuras superiores a 5 pisos, esto se debe a que en estas estructuras y dadas las condiciones el período fundamental de vibración es mayor a  $T_c$  por lo que según el espectro de aceleraciones proporcionado por la NEC la aceleración  $S_a$  disminuye, este comportamiento es similar tanto para el análisis estático como el dinámico.

El período fundamental de vibración a

medida que aumenta el número de pisos de la estructura tiene una diferencia mayor en el análisis estático y dinámico, pero la variación se puede apreciar que no afecta en gran medida en el cálculo de la cortante basal, hay que considerar que el método estático utiliza una ecuación empírica mientras que en el análisis dinámico se considera a la estructura solo con columnas y losas, esta simplificación hace que el período fundamental calculado con el método dinámico sea menor al real.

El análisis de los métodos para el cálculo de la carga sísmica demuestra que para estructuras de hasta 10 pisos es suficiente realizar un análisis estático como lo recomienda la norma debido a su facilidad de cálculo y se ha demostrado que los resultados son más conservadores que el análisis dinámico.

En el presente estudio se ha utilizado una estructura regular por lo que se desprecian los efectos de torsión que puede ocurrir en la estructura, de ser una estructura irregular se recomienda un análisis dinámico.

El análisis demuestra que la carga sísmica en una estructura es considerable por lo que su omisión en el proceso de diseño puede ser fatal en el momento que ocurra un sismo por lo que se recomienda un mayor control para que todas las edificaciones cumplan con los requisitos mínimos establecidos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

Se puede apreciar que la cortante basal depende de la zona sísmica y el tipo de suelo, por lo que un análisis de suelos es fundamental para determinar el tipo de suelo sobre el cuál se construirá una edificación, suelos más blandos transmiten mayor aceleración que es perjudicial para la estructura, lo recomendable es construir sobre suelos rígidos.

## 5. REFERENCIAS

- [1] TARBUCK, E. (2005). Ciencias de la Tierra. Una introducción a la geología física. Madrid: Pearson Educación S.A. Pág. 308-310.
- [2] MARTÍN, A. J. (1983). Riesgo sísmico en la Península Ibérica. Madrid: Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Pág. 90
- [3] JARAMILLO, N. (2016). Evaluation of social context integrated into the study of seismic risk. International Journal of Disaster Risk Reduction, Pág. 185-198.
- [4] LÓPEZ, A. (1999). Metodología Simplificada para el Análisis del Riesgo Sísmico. Física de la Tierra, Pág. 269-284.
- [5] CRICHTON, D. (1999). The Risk Triangle. Natural Disaster Management, Pág. 102-110.
- [6] UNDRO. (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report Expert Group Meeting, Pág. 49.
- [7] LEYTON, F. (2010). Re-evaluation of probabilistic seismic hazard in central Chile. Revista Geológica de Chile, Pág. 455-472.
- [8] CSN. (2014). Sismicidad y terremotos en Chile. Santiago de Chile: CSN.
- [9] CAPOTE, R. (2011). Where and why earthquakes occur in the Iberian. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, Pág. 317-329.
- [10] DINASED/FGE. (2016). Informe de Situación N°71 – 19/05/2016 (20h30). Quito: Secretaría de Gestión de Riesgos.

- [11] IGEPN. (15 de 02 de 2017). IG EPN. Obtenido de IG EPN: <http://www.igepn.edu.ec/mapas/mapa-evento-20160416.html>
- [12] EMS-98. (1998). Escala Macrosísmica Europea 1998. Luxemburgo: Comisión Sismológica Europea.
- [13] ALVAREZ. (1999). Intensidad Macrosísmica. Física de la Tierra, 237 - 252.
- [14] NEC. (2015). Peligro sísmico. Diseño Sismoresistente. Quito: MIDUVI.
- [15] ORDAZ, E. (2003). PROPUESTA DE ESPECTROS DE DISEÑO POR SISMO PARA EL DF . Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras, 189-207.
- [16] VIELMA, W. (2005). Factores de reducción de respuesta por ductilidad de estructuras. REVISTA INGENIERÍA UC, Pág. 14-22.
- [17] CHOPRA, A. (2014). Dinámica de Estructuras. México: Pearson Educación.

## 6. BIOGRAFÍA



<sup>1</sup> Geovanny Guillermo Novillo Andrade es Ingeniero Mecánico, Máster en Ciencias Mención Diseño Mecánico y Magister en Formulación Evaluación y Gestión de Proyectos Sociales y Productivos. Es consultor de proyectos de análisis estructural. Actualmente se desempeña como docente principal a tiempo completo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.



<sup>2</sup> Javier Enrique Orna Chávez es Ingeniero Mecánico, Magíster MSc. en Diseño, Producción y Automatización Industrial. Consultor de proyectos de diseño mecánico y estructural. Actualmente se desempeña como docente ocasional a tiempo completo en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

### REGISTRO DE LA PUBLICACIÓN

Fecha recepción	26 junio 2016
Fecha aceptación	09 diciembre 2016

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)

<sup>1</sup>Nombre Apellido Autor , <sup>2</sup> Nombre Apellidos Autor, <sup>3</sup> Nombre Apellidos Autor,  
<sup>1-2-3</sup> Institución o filiación , Dirección  
E-mail : <sup>1 2,3</sup>

Revista Energía Mecánica Innovación y Futuro, V Edición 2016, No. 1 (15)

RESUMEN

ABSTRACT

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.

Redacción del resumen en inglés

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.

Keywords:

Palabras claves en inglés.

Palabras clave:

Palabras que relacionan el contenido del artículo que se encontrarán en el resumen serán de 3 a 5 citándose en orden alfabético.

## 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 ,  
einnovacion-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 a 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.

## **NORMAS PARA LA PRESENTACIÓN DE ARTÍCULOS EN LA REVISTA ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO**

*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 considerará su publicación.*

*Se realizará la convocatoria de manera escrita y mediante uso de la página WEB Institucional.*

*Es de responsabilidad del autor obtener el permiso para utilizar el material de otras publicaciones.*

*Los autores respetar el uso de normas y citas de otras autorías mediante la cita adecuada.*

*Los autores entregarán sus artículos impreso y en digital formato WORD, escrito a dos columnas, espacio sencillo en letra Calibri 11, Arial o Times 11.*

*Los autores presentarán el acuerdo de autorización de publicación, de responsabilidad y declaración de ética.*

*El título será en letra 14 Calibri negrita, Arial o Roman.*

*Incluir el nombre del autor, institución en la que trabaja, correo electrónico, dirección de la institución.*

*Incluir su biografía y fotografía actualizada.*

*Se presentará el resumen en español y en inglés, como máximo 200 palabras. Se respetará la normatividad para citar textos y derechos de autor mediante el uso de la norma APA.*

*No dejar títulos de temas, tablas o gráficos sueltos en hojas en blanco.*

*Los gráficos, tablas deberán contener la numeración detalle y fuente, debiendo ser de calidad gráfica adecuada.*

*Las referencias serán en orden alfabético incluyendo Apellidos, Nombre, Año, Título, Revista, País y otras que considere la norma.*

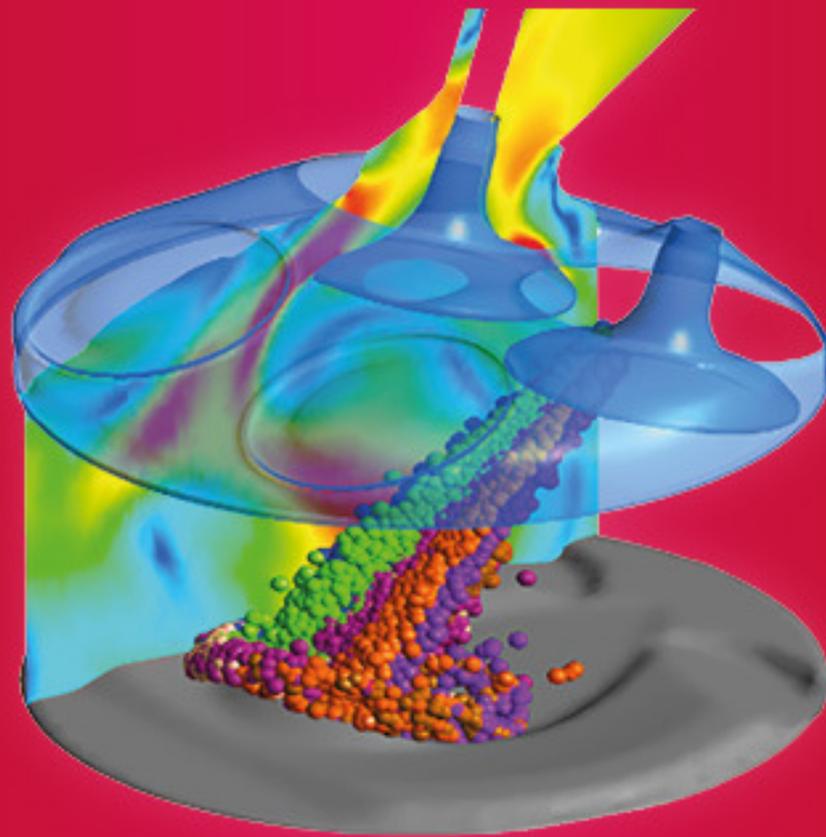
*Enumerar fórmulas y ecuaciones.*

*Otras indicaciones o pautas serán de decisión del comité editorial, el mismo que proporcionará un formato para que los artículos se ajusten a los requerimientos de la edición.*



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



## ENERGÍA MECÁNICA INNOVACIÓN Y FUTURO

Revista de difusión No. 5  
ISSN: 1390 - 7395  
Publicación Anual

RESPONSABLE LEGAL  
Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE  
Av. General Rumiñahui s/n  
Sangolquí - Ecuador  
P.O. Box. 171 - 5 - 31B  
[einnovacion-el@espe.edu.ec](mailto:einnovacion-el@espe.edu.ec)  
[wgerazo@espe.edu.ec](mailto:wgerazo@espe.edu.ec)

