



Nuevos avances tecnológicos  
aplicados a la ingeniería

2

CONGRESO  
INTERNACIONAL  
DE INGENIERÍA

do



Facultad de Mecánica

2018

ISBN: 978-9942-801-01-2





En el año dos mil dieciocho la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo presentó, por segundo año consecutivo, el evento denominado “II Congreso Internacional de Ingeniería” dedicado a profesionales, docentes y estudiantes interesados en la temática “Nuevos avances tecnológicos aplicados a la ingeniería” buscado fortalecer el espacio que el congreso internacional representa para la presentación de la producción científica y tecnológica de nuestra planta docente y docente, además para perfeccionar los estándares de calidad que plantean los nuevos retos de la educación superior y con la finalidad de establecer contextos de comunicación y colaboración con otras universidades nacionales e internacionales.

En los días 12 al 15 de noviembre de 2018 se desarrolló el evento con connotado éxito; reuniendo a decenas de investigadores locales, nacionales e internacionales para presentar sus experiencias profesionales, investigaciones, proyectos y patentes en las siguientes temáticas: Desarrollo de nuevas tecnologías, diseño y gestión de la producción y manufactura, emisiones contaminantes de la industria, formación empresarial y emprendimientos, sistemas de gestión integrados, materiales metálicos y no metálicos, diseño de maquinaria y eficiencia energética.

Los seis conferencistas internacionales, provenientes de USA, México, España, Cuba y Bélgica, a través de ponencias magistrales y mesas redondas presentaron sus aportes. Los conferencistas nacionales, representantes de instituciones de educación superior como la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Universidad del Azuay y de la propia ESPOCH, compartieron en los mismos escenarios. Los artículos aprobados fueron evaluados mediante revisión a doble ciego por investigadores de reconocida experiencia; siendo aceptadas 17 ponencias y 4 posters científicos.

Finalmente, con la expresión de agradecimiento y reconocimiento a las autoridades institucionales por su total apoyo en la consecución de este evento científico, presentamos con mucho agrado los resultados obtenidos, a través del presente libro de memorias.

*Ing. Carlos Santillán Mariño, Msc.*

DECANO  
FACULTAD DE MECÁNICA  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

# 2do Congreso Internacional de Ingeniería

"Nuevos avances tecnológicos aplicados a la ingeniería"

Facultad de Mecánica  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

ISBN: 978-9942-801-01-2

## COMITÉ ORGANIZADOR

*Presidente:*

Gloria Elizabeth Miño Cascante

*Vicepresidente:*

Carlos José Santillán Mariño

*Miembros:*

Edwin Fernando Viteri Núñez  
Jhonny Marcelo Orozco Ramos  
Celin Abad Padilla Padilla  
Eduardo Francisco García Cabezas  
Juan Carlos Cayán Martínez  
Juan Marcelo Ramos Flores  
Eduardo García  
Paúl Vega  
Mario Audelo

## COMITÉ CIENTÍFICO

Otto Fernando Balseca Sanpedro  
Javier Enrique Orna Chávez  
Néstor Alcibar Ulloa Auqui  
Lenin Santiago Orozco Cantos  
José Antonio Granizo  
Luis Fernando Buenaño Moyano  
Eduardo Francisco García Cabezas  
Javier Gavilánez Carrión  
Carlos Oswaldo Serrano Aguiar  
Jhonny Marcelo Orozco Ramos  
Jorge Isafas Caicedo Reyes  
Mario Efraín Audelo Guevara  
Juan Rafael Pérez Pupo  
Edwin Ángel Jácome  
Diego Fernando Mayorga Pérez  
Carlos José Santillán Mariño  
Edwin Fernando Viteri Núñez  
Dalton Paul Orellana Quezada  
Paul Alejandro Montufar Paz  
Abel Polivio Remache Coyago  
Juan Carlos Rocha Hoyos  
Edilberto Antonio Llanes Cedeño  
Celin Abad Padilla Padilla  
Bolívar Alejandro Cuaical Angulo  
Julio César Moyano Alulema  
Juan Carlos Cayán Martínez

## LIBRO DE MEMORIAS

*Comité Editorial:*

Carlos José Santillán Mariño  
Jhonny Marcelo Orozco Ramos  
Edwin Fernando Viteri Núñez  
Celin Abad Padilla Padilla  
Eduardo Francisco García Cabezas  
Juan Carlos Cayán Martínez  
Juan Marcelo Ramos Flores

*Diseño y producción:*

Juan Marcelo Ramos Flores

*Impresión:*

Editorial Pedagógica Freire

*Fecha de publicación:*

30 de noviembre de 2018

## CONTACTO:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Facultad de Mecánica

Panamericana Sur, km 1 1/2  
Telf.: +593 03 2998200 ext 3201  
eMail: fmecanica@epoch.edu.ec  
www.epoch.edu.ec

Riobamba - Ecuador

© 2018

## ÍNDICE DE PONENCIAS

Value stream mapping como mejora en gestión, calidad y productividad en la industria del calzado	1
<i>Ortiz Gongález, T.; Guamán Lozano, A.; García Flores, A.; Miño Cascante, G.; Moyano Alulema, J.</i>	
Repotenciación y automatización de una envasadora de líquidos vertical que permita envasar cuatro distintas presentaciones	6
<i>Ojeda, D.; Ochoa, M.; Orozco, J.; Santillán, C.; García, E.</i>	
Modelación y verificación de malla para un análisis aerodinámico mediante el método de volúmenes finitos	13
<i>Medina, E.; Aucatoma, R.; Padilla, C.; Aquino, M.</i>	
Diseño y construcción del bastidor de un vehículo monoplaza multipropósito	19
<i>Curisaca, J.; López, D.; Asto, C.; Vaca, O.; Quinga, M.</i>	
Rediseño de las manguetas de un vehículo fórmula SAE mediante optimización topológica y manufactura con CNC	22
<i>Reyes, D.; Rockwood, R.; Pozo, J.</i>	
Determinación de la variación de consumo de combustible en taxis de Cuenca utilizando vehículos híbridos	29
<i>Saldaña, X.; Astudillo, C.; Torres, F.</i>	
Análisis de la funcionalidad del filtro de aire de un vehículo liviano dentro del periodo de mantenibilidad	34
<i>Antamba Guasgua, J.; Reyes Campaña, G.; Pachacama, D.</i>	
Desarrollo de un sistema de recuperación de energía de los gases de escape mediante un turbo generador en un motor de combustión interna de 4 cilindros a gasolina.	38
<i>Buenaño Moyano, L.F.; Cuaical Angulo, B.; Moreno Pinduisaca, L.; Cazorla B., F.; Chimborazo, S.</i>	

Diseño y construcción fondo plano y difusores del vehículo de competencia fórmula SAE en fibra de carbono	43
<i>Laguas, W.; Jácome, R.; Padilla, C.; Quinga, M.</i>	
Evaluación del consumo de combustible con conducción eficiente a 2750 metros de altura	50
<i>Leguísamo Milla, J.; Rocha Hoyos, J.; Llanes Cedeño, E.</i>	
Lean manufacturing en aplicación de mejoras de productividad de cajas eléctricas	55
<i>Velasco, J.; Orozco, J.; Fuertes, M.; García, E.; Cayán, J.</i>	
Homogeneous load on by compression and variable compression relationship	62
<i>Pancha, J.; Rojas, V.; Romero, V.; Néjer, J</i>	
Diseño y construcción de un prototipo para la obtención de polvo metálico a partir de la viruta de los procesos de mecanizado del CIRT Unidad de Negocios Hidroagoyán	68
<i>Gusqui Martínez, E. P.; Rivera Enríquez, M. I.; Orna Chávez, J. E.; Villavicencio Cevallos, J.</i>	
Análisis de la eficiencia de una turbina francis de una central hidroeléctrica utilizando software de elementos finitos y dinámica de fluidos computacional (CFD)	78
<i>Mora Sánchez, C.</i>	
Resistencia mecánica y elástica de cinturones de seguridad originales y elaborados localmente	86
<i>Reyes, G.; Chas, S.; Bohórquez, A.</i>	
Estudio y análisis de calidad de servicio en la transmisión por AM digital mediante el uso de códecs en USRP	91
<i>Pérez Insuasti, J.; Zabala, M.; Pazmiño, A.; Moreno, H.</i>	
Análisis de la situación actual de la red móvil celular de la ciudad de Riobamba y propuesta de optimización de recursos para mejora la transmisión de datos	99
<i>Díaz, O.; Benítez, V.; Álvarez, J.; Pazmiño, A.</i>	
Selección y análisis de un refuerzo externo para ensayos de impacto CHARPY	105
<i>Caicedo Reyes, J. I.; Viteri Núñez, E. F.; Saca Llamba, E. D.</i>	

## VALUE STREAM MAPPING COMO MEJORA EN GESTIÓN, CALIDAD Y PRODUCTIVIDAD EN LA INDUSTRIA DEL CALZADO

Ortiz González, Tatiana; Guamán Lozano, Ángel;  
García Flores, Alcides; Miño Cascante, Gloria; Moyano Alulema, Julio

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador  
Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Industrial  
tatiruska@gmail.com; an\_garcia@esPOCH.edu.ec; a\_guaman@esPOCH.edu.ec;  
gmino@esPOCH.edu.ec; j\_moyano@esPOCH.edu.ec

### **RESUMEN**

El objetivo principal de esta investigación es el de poder demostrar la aplicabilidad de la técnica VSM, herramienta del lean Manufacturing en el proceso de elaboración de capelladas sublimadas identificando los problemas, cuantificando los principales desperdicios de recursos con la finalidad de mejorar el flujo de proceso, eliminando aquellas tareas que no agreguen valor y le permitan adaptarse a las exigencias del mercado mediante herramientas de control de proceso como son el Kanban lo que me permitirá nivelar la carga de producción y emisión de órdenes de producción

*Palabras clave: Value stream map , capelladas, diagramas de procesos, kanban*

### **ABSTRACT**

The main objective of this research is to be able to demonstrate the applicability of the VSM technique, a lean manufacturing tool in the process of elaborating sublimated capelladas, identifying the problems, quantifying the main waste of resources in order to improve the process flow, eliminating those tasks that do not add value and allow it to adapt to market demands through process control tools such as the Kanban, which will allow me to level the production load and issue production orders

*Keywords: Value stream map, capelladas, process diagrams, kanban*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se enfatizan en las empresas acerca de la importancia del control de materiales, con la finalidad de optimizar las existencias, procesos y registro de productos terminados generando así un proceso eficiente que deriva mayor rentabilidad.

Bajo esta Premisa TEIMSA al implementar el proceso de sublimación de capelladas requiere se establezca un control de operaciones debido a que estas juegan un rol vital en la diagnóstico que nos permita la toma de decisiones más acertadas para mejorar lo arriba mencionado.

La determinación de la competitividad de la empresa, los costos asociados con el manejo de materiales constituyen una parte importante en la totalidad de gastos para producir un producto dentro del sector industrial. Es así que se requiere la implementación de nuevas tecnologías en maquinarias con controles agregados, un adecuado manejo de la información y la aplicación de métodos para hacer más asertivos los procesos de Producción.

Cabe recalcar que el Lean Manufacturing consisten en un compendio de herramientas orientadas a la gestión de producción con la finalidad de minimizar el despilfarro de recursos por lo tanto esta comprende una de los modelos de producción más acertado para la implementación en las industrias que requieran mejoras en sus procesos

El VSM es parte de una técnica desarrollada bajo la premisa de la producción ajustada, cuyo fin primordial es un riguroso proceso de calidad mediante la eliminación de todo despilfarro, y en el que la producción fluye sin conflictos por los procesos, minimizando el inventario de componentes y productos en curso, sin paros injustificados de maquinaria y tendiendo al cero defectos en el área productiva.

La aplicación del VSM se realiza con la finalidad del soporte a las empresas manufactureras en el rediseño de las áreas productivas permitiendo mejorar la capacidad de respuestas de las mismas con enfoque a desarrollar cadenas de valor competitivas.

El propósito del VSM es visualizar el flujo del proceso que sigue una familia de productos desde los proveedores hasta los clientes, así como el flujo de información desde los clientes a los proveedores de materias primas, mediante pautas establecidas.

Una vez que la empresa traza el VSM de su situación actual (mapa VSM actual) y reconoce las áreas de desperdicio o despilfarro, el siguiente paso (elemento clave del VSM) es identificar las oportunidades de mejora, generando el también denominado mapa VSM futuro.

Aplicando la metodología propuesta por los autores del VSM (Rother y Shook, 1998; Tapping et al., 2000; Duggan, 2002), las etapas principales de un proyecto de desarrollo de la técnica VSM se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Elección de una familia de productos
- Mapeado de la situación inicial o actual
- Mapeado de la situación futura
- Definición de un plan de trabajo
- Implantación del plan de trabajo

El estudio está orientado a determinar la aplicabilidad de la técnica VSM en la empresa TEIMSA, en el área de sublimación, un área que en la última década a tenido un crecimiento desmedido y ha requerido un avance a pasos agigantados, obligando que el sistema productivo de esta empresa requiera de una flexibilidad que le permita obtener una respuesta oportuna y que no provoque demoras en la entrega de pedidos. Con ese objetivo, el presente trabajo enmarca un análisis y rediseño del proceso de sublimación, para la determinación de procesos requeridos y optimización de los mismos.

## METODOLOGÍA

De lo anteriormente expuesto denotamos que parte de las Herramientas ofrecidas por el modelo de Gestión Lean Manufacturing, tenemos una de diagnóstico el VSM (Value Stream Mapping). El Value Stream Mapping es la herramienta que ayuda a visualizar más allá del nivel del proceso productivo en el que se encuentra, muestra el flujo, es decir que no representa únicamente los pasos que se llevan a cabo dentro del proceso sino la manera en que estos se comportan a lo largo de la cadena. Permitiendo así delimitar los diferentes tipos de desperdicios existentes.

Adicional de permitir aplicar una de las herramientas de sistemas de manejo de información que conlleva a una armonía entre cada uno de los productos requeridos en la fabricación de capelladas, controlando el tiempo requerido y la ubicación de los mismo dentro de los procesos denominado sistema Kan Ban. Con la culminación de dicho Proyecto la Empresa TEIMSA contará con un Mapa de la Cadena de Valor que permitirá una gestión eficiente de recursos productivos en su línea de capelladas sublimadas y un sistema Kan Ban que admitirá mejorar el control y seguimiento de los recursos requeridos

Los productos fabricados son:

- CAPELLADAS SUBLIMADAS

Nuestra área de estudio es:

- SUBLIMADO
- LAMINADO
- TROQUELADO

Tabla 1: Símbolos utilizados en el diagrama de procesos

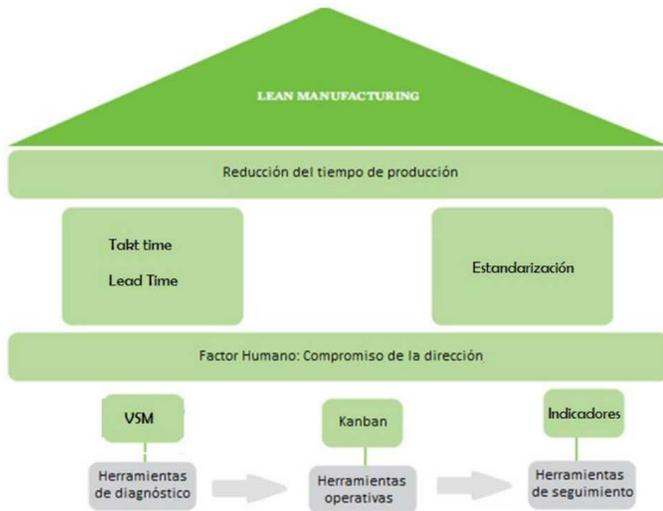
Actividad	Símbolo
Operación	
Transporte	
Inspección	
Demora	
Almacenaje	

Fuente: García, R.

El proceso a utilizar es

- Recolección de Datos In situ (Hojas de Proceso)
- Elaboración de Diagramas de Proceso
- Análisis de BDD Sistema ERP
- Calificación según tipo de Defectos

De igual forma se utiliza la filosofía *Lean Manufacturing*.



Los diagramas de procesos en las áreas mencionadas con anterioridad se evidencia (ver tabla en columna siguiente), y cuyos resultados se detallan a continuación.

### MAPEO DE LA SITUACIÓN INICIAL

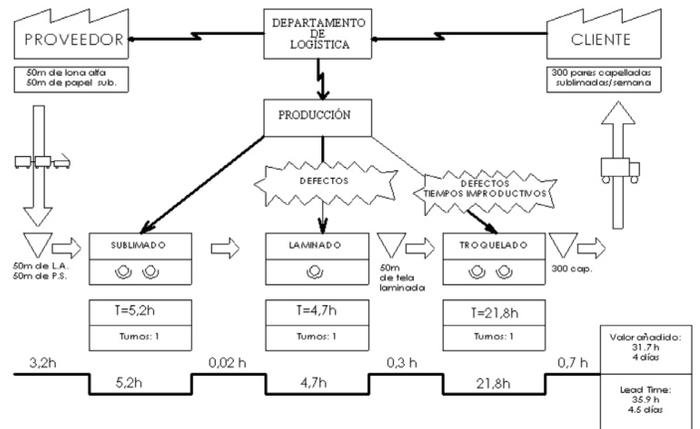
El mapeo de la situación inicial del producto se realizó mediante el diseño del mapa de sus componentes, definiendo así las rutas que siguen cada uno de los subensambles y los procesos requeridos para fabricarlos (hilado, tejido, tinturado, laminado, sublimado y troquelado)

EMPIEZA EN:		TERMINA EN:						REALIZADO POR: Tatiana Ortiz		
Almacenamiento de Tela Sublimada		Despacho del cliente						HOJA Nº		
Nº	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	SÍMBOLOS DEL DIAGRAMA						N	DIST m	TIEMPO segundos
		●	→	⬇	⬅	⬇	⬅			
1	Planificar y Generar las órdenes de producción Área de Troquelado.	●	→	⬇	⬅	⬇	⬅	1		420
2	Transportar la tela laminada a la mesa de preparación.	○	→	⬇	⬅	⬇	⬅	1	5	180
3	Verificar el Troquel dependiendo de la orden de producción.	○	→	⬇	⬅	⬇	⬅	1		300
4	Transportar el troquel del área de almacenamiento a la máquina troqueladora manual.	○	→	⬇	⬅	⬇	⬅	2	4	180
5	Colocar el troquel en la máquina troqueladora manual.	●	→	⬇	⬅	⬇	⬅	2		300
6	Troquelar 300 pares.	●	→	⬇	⬅	⬇	⬅	3		72000
7	Verificar y Empaquetar en fundas de 20 pares cada una.	○	→	⬇	⬅	⬇	⬅	1		1800
8	Trasladar los paquetes al área de Etiquetado.	○	→	⬇	⬅	⬇	⬅	3	4	180
9	Generar la etiqueta del producto.	●	→	⬇	⬅	⬇	⬅	4		2400
10	Verificar y Notificar de las unidades No Conformes.	○	→	⬇	⬅	⬇	⬅	2		300
11	Cierre de Orden de producción Troquelado.	●	→	⬇	⬅	⬇	⬅	5		180
12	Generar la transferencia a la Bodega de Logística.	●	→	⬇	⬅	⬇	⬅	6		300
<b>TOTAL</b>		<b>6</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2</b>	<b>13</b>		<b>78540</b>

RESUMEN DE RESULTADOS DE LA SUBLIMACIÓN DE TELA				
ACTIVIDAD	SÍMBOLOS	CANT.	TIEMPO (h)	DIST (m)
Operación	●	13	2.6	
Transporte	→	6	0.1	62.8
Demora	⬇	2	1.5	
Inspección	⬅	1	0.1	
Almacenaje	⬇	0	0.0	
Op. Combinada	⬅	1	0.8	
<b>TOTAL</b>		<b>23</b>	<b>5.2</b>	<b>62.8</b>

RESUMEN, DIAGRAMA DE PROCESO DE LAMINADO				
ACTIVIDAD	SÍMBOLOS	CANT.	TIEMPO (h)	DIST (m)
Operación	●	11	1.6	
Transporte	→	5	0.3	86.8
Demora	⬇	1	2	
Inspección	⬅	0	0	
Almacenaje	⬇	0	0	
Op. Combinada	⬅	1	0.8	
<b>TOTAL</b>		<b>18</b>	<b>4.7</b>	<b>86.8</b>

RESUMEN, DIAGRAMA DE PROCESO DE TROQUELADO				
ACTIVIDAD	SÍMBOLOS	CANT.	TIEMPO (h)	DIST (m)
Operación	●	6	21.0	
Transporte	→	3	0.2	13
Demora	⬇	0	0.0	
Inspección	⬅	1	0.1	
Almacenaje	⬇	0	0.0	
Op. Combinada	⬅	2	0.6	
<b>TOTAL</b>		<b>12</b>	<b>21.8</b>	<b>13</b>



### RESULTADOS

Como parte de la implementación de la herramienta VSM es menester focalizar el proceso de mapeo en una única familia de productos dentro del marco de los ofertados a su cartera de clientes.

Tabla: Lista de productos ofertados

PRODUCTOS OFERTADOS
Hilo 14/1
Hilo 14/2
Hilo 25/1
Lona Cruda
Gabardina Cruda

Sesgo Crudo
Lonas Tinturadas
Gabardinas 2000 Tinturadas
Sesgos Tinturados
Rib Descrudado
Plantitex
Bramantes Tinturados
Telas Laminadas con Látex
Pasta o Pega Látex
Telas Laminadas con Thermofilm
Cintas de Sesgo de 13 o 7 mm
Cintas de Sesgo Planchadas
Cintas de Lona Planchadas
Plantillas Troqueladas
Plantillas Termo formadas
Capelladas Troqueladas
Telas Sublimadas
Capelladas Sublimadas
Suelas de PVC
Suelas de TR

Fuente: autor

La empresa ha elegido para el desarrollo del proyecto el artículo capelladas sublimadas, dado que este es un producto relativamente nuevo en el cual asocia la gran mayoría de procesos de fabricación y que al momento no están siendo tan eficientes como se desearía, este artículo supone un producto de gran envergadura para la empresa no solo por costo, sino también por la cantidad de trabajo y la experticia en el mismo.

La capellada sublimada comprende una pieza troquelada de tela laminada que resulta de la unión de lona alfa (poliéster) con Thermofilm y lona negro (algodón) que posteriormente se sublima con el diseño requerido. La empresa tras el incremento de pedidos de dicha línea debe rediseñar el proceso ya que el tiempo de fabricación es demasiado prolongado lo que retrasa la entrega del producto final al cliente, adicional que los índices de PNC superan el estipulado en los cálculos de costos y precio. La empresa al momento no tiene planificado la contratación de personal adicional y dado el elevado costo de dicho producto debe reducirse sino representa pérdidas representativas.

Procesos como el de hilatura donde se fabrican los hilos se encuentran normados este cuenta un tiempo de producción de 50.76Kg/h que contemplan los procesos de apertura, cardado, estirado hilado y retorcido.

Adicional Tisaje cuenta con un tiempo de producción estándar de 31.25m/h

Estas plantas manejan un sistema de producción Push el cual planifica una producción mensual aproximada de:

- En Hilatura 79940Kg de Hilo
- En Tisaje 301800m de Tela

En la planta de Acabados el tinturado y Ramado de 1650m de lona negro (componente de la capellada) tiene un tiempo promedio de 20horas distribuidas en sus dos procesos:

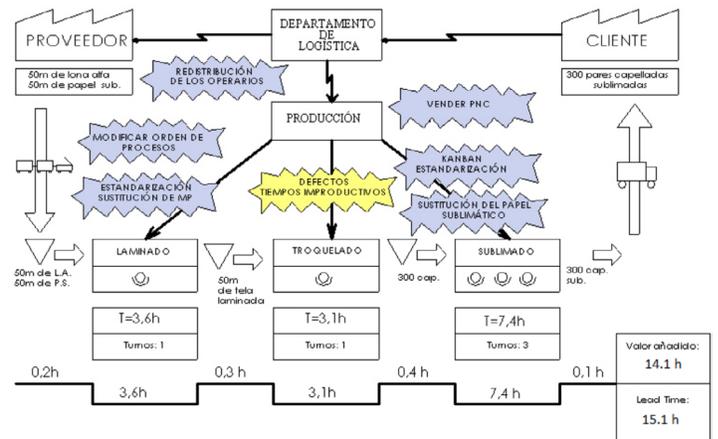
- Tinturado (desde la Carga hasta la descarga) 18h00
- Ramado (Incluido el proceso de enhebrado 2h00)

En cuello de botella de dicho proceso resulta en la sublimación, laminado y posterior troquelado ya que es en estos procesos donde se genera el mayor porcentaje de desperdicio, PNC y demoras.

El proceso de sublimación consiste en aplicar un diseño mediante termo transferencia en la lona Alfa, en este proceso no contamos con ningún control ni planificación previa.

El proceso de laminado de Paño es un proceso que se encuentra normado, pero al utilizar un diseño sublimado este tiende a manchar algunas partes del tejido por lo que es necesario definir las condiciones óptimas de temperatura y velocidad para este proceso sin que afecte la fusión del thermofilm.

Finalmente, el proceso de troquelado en el cual se obtienen las capelladas de la tela laminada sublimada, aquí el principal inconveniente corresponde al centrado del troquel, el cual a pesar de que el diseño contenga líneas guía estas se deforman en el paso de la laminación. Este inconveniente ralentiza el trabajo hace que la producción sea de capellada por capellada y genera un alto índice de PNC, el tiempo promedio de este ciclo es de 4 min por par de capelladas.



$$\begin{aligned} \text{Tiempo de proceso} &= \text{Laminado} + \text{Troquelado} + \text{Simulado} \\ &= 3.6 \text{ h} + 1.31 \text{ h} + 7.4 \text{ h} \\ &= 14.1 \text{ h} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Takttime} &= \frac{\text{Tiempo de proceso}}{\text{Producción}} \\ &= \frac{14.1 \text{ h}}{300 \text{ unidades}} \\ &= 0.047 \frac{\text{h}}{\text{unidad}} \\ &= 2.82 \frac{\text{min}}{\text{unidad}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Lead time} &= \text{Tiempo de valor añadido} + \text{tiempo de valor no añadido} \\ &= 14.1 \text{ h} + 0.1 \text{ h} \\ &= 15.1 \text{ h} \end{aligned}$$

## ANÁLISIS DE LA PRODUCTIVIDAD

$$\text{Productividad} = \frac{\text{Producción de capelladas}}{\text{Tiempo de proceso}}$$

### Situación Actual

$$\text{Productividad} = \frac{300 \text{ pares}}{31.7 \text{ horas}}$$

$$\text{Productividad} = 9.46 \frac{\text{pares}}{\text{h}}$$

$$\text{Productividad} \approx 10 \frac{\text{pares}}{\text{h}}$$

### Mejora

$$\text{Productividad} = \frac{300 \text{ pares}}{14.1 \text{ horas}}$$

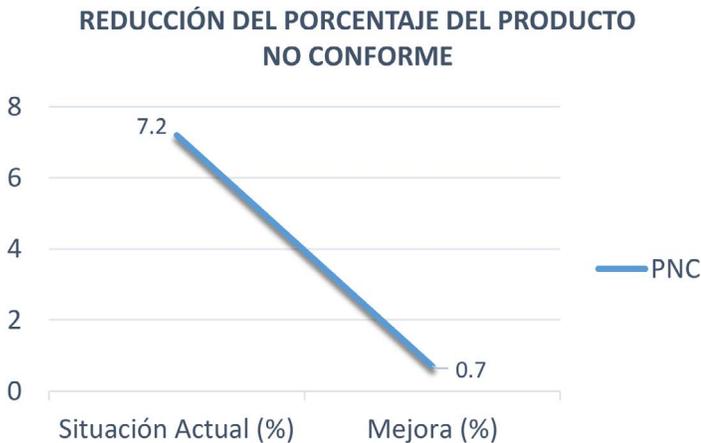
$$\text{Productividad} = 21.3 \frac{\text{pares}}{\text{h}}$$

$$\text{Productividad} \approx 22 \frac{\text{pares}}{\text{h}}$$

Obteniendo una comparación de



Reducción del producto no conforme



## CONCLUSIONES

- Se evaluó la situación actual de la producción de capelladas sublimadas mediante el vsm: los desperdicios lean manufacturing detectados fueron defectos y tiempos improductivos; se determinó un lead time de 4,5 días, un tiempo de valor añadido de 4 días, un tiempo de valor no añadido de 4,22 horas y un porcentaje de productos no conformes de 7,7%.

- Se elaboró un Value Stream Map mejorado en base a las siguientes opciones de mejora; redistribución del personal en las áreas de trabajo, alteración del orden de los procesos, sustitución de materiales utilizados en el proceso de laminado y sublimado, estandarización de los procesos, aplicación del kanban, comercialización de los productos no conformes. Además se determinó un lead time de 1,3 días, un tiempo de valor añadido de 1,2 días, un tiempo de valor no añadido de 1 hora y un porcentaje de productos no conformes de 0,7%.
- Se aplicó kanban en la sublimación con el fin de obtener un control adecuado del proceso, para lo cual se elaboraron cinco tarjetas kanban: amarilla, verde, blanca, rosada y roja.
- Con la implementación de las mejoras se redujo: 3.2 días el lead time, 2.8 días el tiempo de valor añadido, 3.22 horas el tiempo de valor no añadido y el 7% del producto no conforme

## REFERENCIAS

- Tapping D., Luyster T., Shuker T. (2000). *Value Stream Management. Eight steps to planning, mapping and sustaining lean Improvements*. Ed. Productivity Press.
- Womack J.P., Jones D.T. (1994). *From lean production to the lean enterprise*. Harvard Business review, 72:93-103..
- Cruz, R. C. (s.f.). *El proceso de la mejora continua en la empresa*.
- Womack, James y otros (2008) *Harvard business review on manufacturing excellence at Toyota*, Massachusetts: Harvard Business School Press
- Womack, James y Jones, Daniel (2007) *Soluciones Lean* Barcelona: *Gestión 2000*
- Womack, James y Jones, Daniel (2005) *Lean Thinking* Barcelona: *Gestión 2000*
- Cautrecasas, Lluís (2010) *Lean Management: La gestión competitiva por excelencia*, Barcelona: Bresca
- Evolucion, Bravo, J, (2010) *Gestión de Procesos* (1ª ed.). Santiago de Chile
- MCS Media, Blanco, L. (2007). *La nueva guía lean de bolsillo (producción lean)*. New York
- D'Alessio, F. (2002) *Administración y Dirección de la Producción*. Prentice Hall. Bogotá
- Amacom, Carreira, B. (2005) *Lean Manufacturing that works*. New York
- Krajewsky, L., Ritzman, L., y Malhotra, M. (2008). *Administración de Operaciones Procesos y Cadenas de Valor*. Pearson, México

## REPOTENCIACIÓN Y AUTOMATIZACIÓN DE UNA ENVASADORA DE LÍQUIDOS VERTICAL QUE PERMITA ENVASAR CUATRO DISTINTAS PRESENTACIONES

Ojeda, David; Ochoa, Marcelo; Orozco, Jhonny; Santillán, Carlos; García, Eduardo

Escuela de Ingeniería Industrial, Facultad de Mecánica, Escuela Superior  
Politécnica de Chimborazo, Riobamba - Ecuador  
ojedavid.1992@gmail.com, margabjar92@hotmail.com, ingjmorozco@gmail.com,  
carlos.santillan@esoch.edu.ec, edugarciac\_87@hotmail.com

### **RESUMEN**

La repotenciación y automatización de una envasadora de líquidos vertical, plasma el proceso de llenado de varios tipos de bebidas, mejorando una máquina inoperante que tenía daños en su sistema de mando, esto acompañado de una falta de interés por su inmediata reparación y la falta de un plan de mantenimiento llevaron al deterioro progresivo, considerándose un proceso obsoleto. Para llevar a cabo la repotenciación se analiza cada elemento tratando de conservar y minimizar los costos de implementación en la máquina considerando el 5,72% desechable, 42,85% recambio y el 51,43% reutilizable. Para conseguir este objetivo se utilizó un dispositivo de mando o control Logo con módulo de expansión para satisfacer la demanda de elementos de control. Al repotenciar y automatizar la embotelladora de bebidas en envase de plástico flexible en cuatro presentaciones de 100 ml, 160 ml, 250 ml y 300 ml sin modificar los sistemas, manteniendo estándares de calidad con baja variabilidad, considerando la incorporación de nuevos procesos modernos en base a las buenas prácticas de manufactura en elementos de consumo humano se determina que por cada dólar invertido se obtiene una ganancia de \$0,13 centavos protegiendo el medio ambiente con una propuesta que supera a un proceso normal de cualquier tipo de maquinaria.

*Palabras clave: Repotenciación, automatización, logo, mantenimiento, envases, plástico flexible.*

### **ABSTRACT**

The repowering and automation of a vertical liquid filling machine, plasma the filling process of several types of beverages, improving an inoperative machine that had damage in its control system, this accompanied by a lack of interest for its immediate repair and the lack of a maintenance plan led to progressive deterioration, considering it an obsolete process. To carry out the repowering, each element is analyzed trying to conserve and minimize the costs of implementation in the machine considering the 5.72% disposable, 42.85% spare part and the 51.43% reusable. To achieve this goal, a Logo control or control device with expansion module was used to satisfy the demand for control elements. By repowering and automating the bottling of beverages in flexible plastic packaging in four presentations of 100 ml, 160 ml, 250 ml and 300 ml without modifying the systems, maintaining quality standards with low variability, considering the incorporation of new modern processes in base to the good practices of manufacturing in elements of human consumption it is determined that for every dollar invested a profit of \$ 0.13 cents is obtained protecting the environment with a proposal that surpasses a normal process of any type of machinery.

*Keywords: Repowering, automation, logo, maintenance, packaging, flexible plastic.*

## INTRODUCCIÓN

El desarrollo está fundamentado en la evolución de la demanda por parte de unos clientes cada vez más exigentes a los que los fabricantes intentan satisfacer con nuevos productos de mayor calidad y mejores especificaciones técnicas. Debido a esto la industria en general se vuelve más competitiva, por lo tanto, las empresas deben diseñar sus productos con tecnología mejorada para lograr sobresalir en un mercado global cada vez más competitivo. (García, 2005)

En este artículo se detalla el proceso de repotenciación y automatización de una envasadora de líquidos vertical que, en un principio, se encontraba totalmente inoperante debido a la avería de muchos de sus elementos y a la falta de otros, la falta de planos o manuales de la máquina obliga a que se analicen las mejoras correspondientes en este tipo de maquinaria, controlando las sobrecargas como protección de la maquinaria, evitando la destrucción de los aislamientos, de una red o de los equipos inmersos en la misma. Por lo general, una sobrecarga no protegida degenera siempre en un cortocircuito. (Electromecánica, 2016)

La maquinaria moderna de este tipo que se puede encontrar en el mercado nacional permite envasar solo una o hasta dos presentaciones, con el proyecto, se podrán envasar cuatro distintas presentaciones, siendo la máxima de 300 ml. Fortaleciendo los elementos o sistemas de la máquina con el fin de aumentar la productividad, el tiempo de vida útil y/o reducir costos tanto de producción como de mantenimiento, gracias a los procesos de redimensionamiento o rediseño. Por su parte la automatización permitirá accionar y controlar el proceso productivo con el mínimo de intervención humana.

## METODOLOGÍA

La metodología aplicada va en consideración de todas las características prestadas por la maquinaria y a las que se quiere llegar con la repotenciación, por medio de etapas que se detallan a continuación, los actuadores neumáticos pueden ser lineales, de giro o especiales, siendo los lineales los más comunes en la industria para automatización de procesos y maquinaria. (Torner & Fernández, 2016)

### PRIMERA ETAPA: TIPO DE MAQUINARIA

Una envasadora de líquidos vertical se encarga de formar, llenar y sellar empaques de plástico flexible llenos de producto en estado líquido. Este tipo de maquinaria realiza el llenado atendiendo al volumen de producto que cada envase debe contener. Aunque el control de volumen es usado en su mayoría para envasar líquidos, este tipo de maquinaria se puede usar también para envasar polvos o granulados.

### SEGUNDA ETAPA: SITUACIÓN INICIAL

Después del análisis inicial de la envasadora se logran identificar ocho sistemas, la mayoría de ellos cubiertos de grasa, oxidados, con elementos descompuestos o elementos faltantes, a los sistemas identificados se les asignó un código alfabético como se indica en la Tabla N° 1 para realizar una mejor repotenciación.

Tabla N° 1. Identificación de sistemas

SISTEMA	CÓDIGO
Estructural	A
Mecánico	B
Arrastre de plástico	C

Formado	D
Llenado	E
Sellado y corte	F
Neumático	G
Control y mando	H

Identificados los distintos sistemas se da inicio al desarmado de cada uno de ellos analizando el estado de todos sus componentes, el propósito de esta actividad es determinar la obsolescencia de los sistemas con el fin de identificar las áreas de repotenciación, además, con esta actividad se busca definir qué elementos deben ser reemplazados y cuales se puede reutilizar, siendo los más críticos el sistema mecánico y el sistema de control y mando, por tal motivos se genera unas tablas de evaluación de cada uno de los sistemas como se presenta en la Tabla N° 2.

Tabla N° 2. Evaluación del sistema de control y mando

SISTEMA: CONTROL Y MANDO (H)				
ESQUEMA				
OBSERVACIONES GENERALES: Gran cantidad de cables sueltos, faltan algunos elementos, la caja ha sido utilizada para guardar tornillos viejos, algunos elementos están rotos, el controlador es obsoleto.				
				
COD.	PARÁM.	DETALLE	EVALUA.	DIAGNÓST.
H-1	Elemento	Caja de control	Presenta golpes, rayaduras, agujeros, suciedad	Recambio
	Cantidad	1		
	Material	Varios		
H-2	Elemento	Logo	Obsoleto, módulo de expansión fuera de mercado	Recambio
	Cantidad	1		
	Material	Varios		
H-3	Elemento	Interruptor térmico	Presenta manchas de suciedad	Reutilizable
	Cantidad	1		
	Material	Varios		

H-4	Elemento	Contactador 220V	Presenta manchas de suciedad	Reutilizable
	Cantidad	3		
	Material	Varios		
H-5	Elemento	Árbol de levas	Tecnología antigua Obsoleto	Desechar
	Cantidad	1		
	Material	Acero AISI-SAE 1045		
H-6	Elemento	Microswitch	Tecnología antigua Obsoleto	Desechar
	Cantidad	4		
	Material	Varios		
H-7	Elemento	Selectoras 2 posiciones	Obsoletas	Recambio por selectoras de 3 posiciones
	Cantidad	2		
	Material	Varios		

Después de identificar los sistemas que conforman la máquina y analizando los formatos de evaluación se procedió a analizar el estado de servicio de cada elemento de la máquina clasificándolos como reutilizables, recambio o desechables, analizando 35 elementos en total y obteniendo los resultados que se encuentran en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. Resultados de la evaluación

ELEMENTOS ANALIZADOS		
CATEGORÍA	CANT.	PORCENTAJE
Reutilizables	18	51,43 %
Recambio	15	42,85 %
Desechar	2	5,72 %
<b>TOTAL</b>	<b>35</b>	<b>100%</b>

De los sistemas analizados los más afectados fueron los sistemas neumáticos y de control y mando, muchos de sus elementos estaban averiados, con mangueras rotas, electroválvulas desarmadas, cables sueltos, enredados y con elementos ausentes.

Dentro de la industria alimenticia varios son los empaques flexibles que se emplean de acuerdo con el producto que se envasa, siendo en forma general la misión fundamental del mismo: preservar el producto en su interior desde el momento del empaque, durante el transporte, almacenamiento, distribución y exhibición, hasta el momento que es abierto para su consumo. (Mespach, 2016)

El sistema mecánico y el sistema neumático como se observa en la Figura N° 1 utilizaba elementos obsoletos para la transmisión de movimiento, lo cual requería mayor cantidad de conexiones eléctricas complicando aún más la identificación de los sistemas y circuitos.

**RESULTADOS**

Una vez analizado la situación actual de la máquina permite realizar un estudio minucioso y las mejoras que se le puede dar considerando el incremento de producción con las Buenas prácticas de manufactura (BPM)

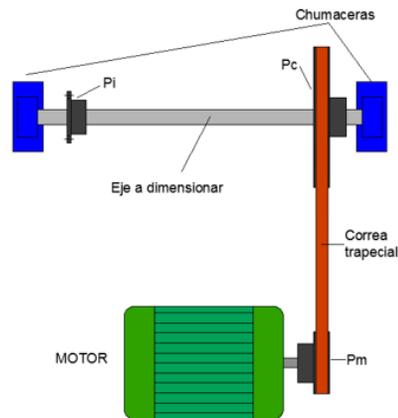


Figura N° 1. Situación inicial del sistema neumático

**TERCERA ETAPA: REPOTENCIACIÓN**

Con ayuda de la resistencia de materiales se determina los requerimientos mínimos con los que debe contar el eje transmisor de movimiento de la envasadora vertical de líquidos. (Mott, 2009)

Algunos elementos reutilizables solo necesitaban ser limpiados y pintados mientras que otros requirieron de un dimensionamiento, como es el caso de los elementos de transmisión de movimiento del sistema mecánico donde fue necesario dimensionar el eje de transmisión:



**TORQUE DEL MOTOR:**

$$T_{min} = \frac{P}{w_{max}} = \frac{750 W}{46,08 \text{ rad/seg}} = 16,27 \text{ Nm}$$

$$T_{max} = \frac{P}{w_{min}} = \frac{750 W}{25,43 \text{ rad/seg}} = 29,49 \text{ Nm}$$

Para el dimensionamiento del eje se tomará en cuenta el torque máximo que este deberá soportar.

**TORQUE EN EJE CONDUCIDO:**

$$i = \frac{N_2}{N_1} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{MT_1}{MT_2}$$

$$i = \frac{62 \text{ mm}}{140 \text{ mm}} = \frac{MT_1}{MT_2}$$

$$MT_2 = (29,49 \text{ Nm}) \left(\frac{140}{62}\right) = 66,59 \text{ Nm}$$

Eficiencia de la banda = 96%  
 $MT_2 = (62,59 \text{ Nm})(0,96)$   
 $MT_2 = 60,09 \text{ Nm}$

Figura N° 2. Dimensionamiento y cálculo del eje de transmisión de movimiento del sistema mecánico

El eje es dimensionado en acero de transmisión AISI 1018 donde se obtuvo un eje calculado de 11,93 mm de diámetro, comercialmente los ejes de acero están normalizados siendo el eje de media pulgada, es decir, 12,7 mm de diámetro el más cercano al calculado y será el eje para implementar.

Dos elementos fueron desechados ya que eran equipos antiguos y obsoletos y que fueron reemplazados por elementos distintos y nuevos o simplemente ya no eran necesarios instalarlos en la envasadora, algunos elementos, especialmente elementos metálicos, se encontraban oxidados y con rayaduras, dichas piezas fueron reconstruidas en acero inoxidable en base al diseño del elemento original.

**CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS NUEVOS**

A parte de los ocho sistemas iniciales de la envasadora, es necesario diseñar y construir dos sistemas nuevos, se trata del sistema de fechado y del sistema de desinfección por luz UV, la máquina no poseía estos sistemas debido a su antigüedad, pero son sistemas que máquinas modernas que se les puede adaptar y mejorar, para ello se adquirieron dos equipos, seleccionados según catálogo: una fechadora semiautomática para el sistema de fechado y un germicida para el sistema de desinfección juntamente con balastro. Se construyeron los acoples y soportes para cada uno de ellos, estos equipos serán accionados por el controlador del sistema de control y mando de la envasadora.

**AUTOMATIZACIÓN DEL PROCESO**

Para automatizar la máquina se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros:

- Producto a envasarse: bebidas a base de agua.
- Variable a controlar: volumen
- Volumen a envasar: 100 ml, 160 ml, 250ml y 300ml.

Se utilizará la envasadora de líquidos vertical para envasar bebidas a base agua en cuatro distintas presentaciones, para aquello se requieren un total de 10 señales de entrada, denominadas i, provenientes de distintos elementos de control y mando, los cuales se detallan a continuación:

Tabla N° 4. Señales de entrada

ENTRADA	SIGNIFICADO	TIPO DE ENTRADA
I1	Botón Verde	DIGITAL
I2	Botón Rojo	DIGITAL
I3	Parada de Emergencia	DIGITAL
I4	Selectora 1 100 ml	DIGITAL
I5	Selectora 1 160 ml	DIGITAL
I6	Selectora 2 250 ml	DIGITAL
I7	Selectora 2 300 ml	DIGITAL
I8	Botón Negro	DIGITAL
I9	Botón Blanco	DIGITAL
I10	Perilla	DIGITAL

El sistema neumático de la envasadora utiliza tres cilindros de doble efecto, cada cilindro es comandado por una electroválvula 5/2, todo el aire que ingresa al sistema pasa primero por una unidad de mantenimiento FLR donde la presión del aire es regulada y el aire

es lubricado con pequeñas partículas de aceite, esto es necesario para arrastrar el aceite al interior de los cilindros para lubricarlos y prolongar su vida útil. Una toma adicional se deriva hacia la mordaza de corte horizontal, la cual posee un conducto interno, conocido como enfriador, por donde circula el aire con el fin de facilitar su enfriamiento, ya que la niquelina de corte le comunica altas temperaturas.

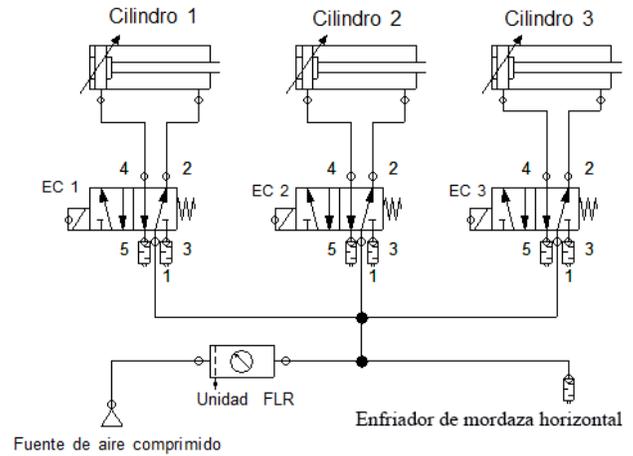


Figura N° 3. Diagrama unifilar del sistema neumático

Para lograr el envasado y control de proceso deseado se necesita accionar un total de 12 actuadores, entre contactores, electroválvulas, señales luminosas y sonoras, entre otras, a continuación del detalle de los elementos actuadores para las salidas denominadas Q en la Tabla N° 5.

Tabla N° 5. Actuadores de salida

SALIDA	SIGLA	SIGNIFICADO
Q1	eLA	Encender Luz Amarilla
Q2	eLR	Encender Luz Roja
Q3	eLsPT	Encender Luz Verde, Luz UV, pirómetros, contactor del Transformador
Q4	eFEC	Encender Fechadora
Q5	eELCK	Encender Electrocheck
Q6	cMEC3	Contactor del motor y Electroválvula del cilindro 3
Q7	EC2	Electroválvula del cilindro 2
Q8	ESTF	Estampar fecha
Q9	EC1	Electroválvula del cilindro 1
Q10	eLrB	Encender Luz roja 2 y Buzzer
Q11	cNH	Contactor de la Niquelina Horizontal
Q12	cNV	Contactor de la Niquelina Vertical

El equipo standard posee solamente 8 entradas y 4 salidas, es necesario adquirir un módulo de expansión 8 entradas y 8 salidas de tipo digitales por lo que se ve la necesidad de la adquisición de un módulo de expansión (ver Figura N° 4)

Para energizar todo el sistema se trabajará con dos líneas de alimentación, la línea 1 proveerá de energía a los siguientes sistemas: sistema de control y mando, sistema neumático, sistema de fechado, sistema de llenado, todos estos sistemas cerrando sus circuitos en neutro, es decir, son sistemas que funcionan a 110 V. Los sistemas

que funciona a 220 V son los sistemas de sellado y corte y el sistema mecánico, para estos sistemas se hace uso de las líneas 1 y 2. Todas las conexiones se realizan en paralelo, el siguiente diagrama demuestra todas las conexiones realizadas (ver Figura N° 5).

**PRESENTACIONES A ENVASAR**

La selección del volumen a envasar se realiza por medio de dos selectoras de tres posiciones, cada selectora permite elegir dos de las cuatro posibles presentaciones, ya que las selectoras son independientes la una de la otra, existe la posibilidad de accionarlas al mismo tiempo, lo cual des coordinará la programación ocasionando problemas en el envasado, para evitarlo se ha creado una programación de bloqueo, una vez seleccionada una de las presentaciones en una de las selectoras será imposible activar otra presentación aunque se manipule la selectora libre, esto es posible gracias a la programación de bloqueo de doble señal que a su vez accionará una alarma sonora-visual que advertirá cada vez que las dos selectoras sean activadas.

La mayoría de maquinaria de este tipo ofrece solamente una presentación a envasar y cuando mucho dos presentaciones por un precio que varía entre 7000 a 15000 dólares, es decir que para envasar cuatro distintas presentaciones se necesitaría entre 28 000 y 30 000 dólares.

El polietileno es un material barato, no tiene olor ni sabor que pueda afectar al producto empacado, y se lo puede sellar fácilmente por calor. La temperatura de sellado de este tipo de material oscila entre los 120 y 200 °C. (QuimiNet, 2016)

Las selectoras de presentación son independientes la una de la otra, existe la posibilidad de que las dos selectoras sean accionadas al mismo tiempo, esto activaría simultáneamente dos bloques de programación originando fallos en el envasado. Para evitar este problema se ha desarrollado un sistema de bloqueo de doble señal, cada vez que la envasadora esté funcionando en una presentación será imposible activar otra, aun cuando la segunda perilla sea accionada. Si se llegasen a accionar ambas perillas se disparará una alarma sonora-visual que indicará que una de las perillas debe ser puesta en estado off.

La utilización de la radiación ultravioleta (UV) con una longitud de onda germicida suficiente para esterilizar los microorganismos y destruir los ácidos nucleicos de manera que su ADN es interrumpido por la radicación UV impidiéndole realizar sus funciones celulares de reproducción e infectar. (Carbotecnia, 2016)

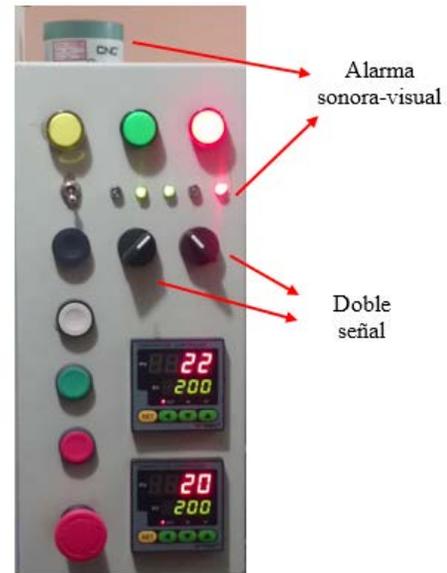


Figura N° 6. Alarma sonora-visual accionada por doble señal de presentación

Durante el proceso de automatización de la envasadora se diseña una programación del controlador que permite envasar cuatro presentaciones accionando solamente dos selectoras, una selectora accionará las presentaciones de 100 ml y 160 ml mientras que la otra selectora accionará las presentaciones de 250 ml y 300 ml. Cada posición de cada selectora acciona un bloque de programación.

**CUARTA ETAPA: PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO**

Cada sistema fue probado una vez que la envasadora se encontraba repotenciada y automatizada. Para ello se elaboraron formatos de registro donde constan: los resultados que se obtienen al finalizar las pruebas, los resultados obtenidos en cada corrida, las acciones correctivas en caso de que los resultados no sean positivos y conclusiones de cada sistema probado para cada uno de los sistemas en este caso tenemos un ejemplo de la Tabla N° 6 del sistema de sellado y corte que es uno de los más importantes para el envasado de líquidos.

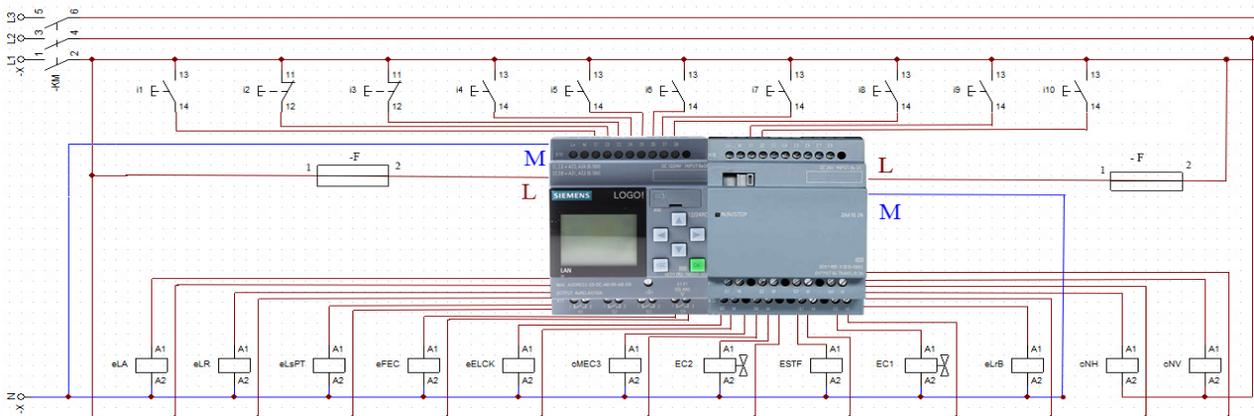


Figura N° 4. Conexiones de entradas y salidas de logo

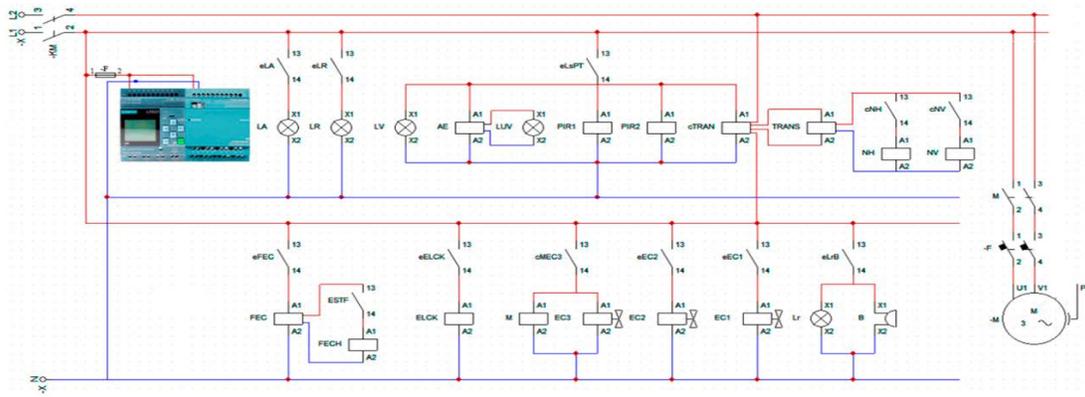


Figura N° 5. Diagrama de conexiones Logo

Tabla N° 6. Prueba del sistema de sellado y corte

SISTEMA: SELLADO Y CORTE (F)	
<p><b>EXPECTATIVA:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. La mordaza vertical sella en toda su longitud el plástico.</li> <li>2. La mordaza horizontal sella y corta el plástico.</li> <li>3. Las mordazas están alineadas con sus respectivas contra-mordazas.</li> </ol>	
<p><b>ACTIVIDADES:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comprobar la alineación de las mordazas.</li> <li>2. Accionar las niquelinas vertical y horizontal.</li> <li>3. Activar el sistema neumático.</li> <li>4. Comprobar el sellado y corte del plástico.</li> </ol>	
PRUEBA	RESULTADOS
1	1. Mordazas no alineadas. Alinear reajustando la sujeción de los portamordazas.
2	1. Mordazas alineadas. 2. Niquelina vertical no caliente. Verificar conexiones eléctricas. 3. Niquelina horizontal caliente demasiado, daña el plástico. Calibrar la temperatura de la niquelina horizontal.
3	1. Conexiones eléctricas revisadas, contactor de la niquelina vertical averiado. Cambiar por un contactor en buenas condiciones. 2. Niquelina horizontal calibrada.
4	1. Contactor de la niquelina vertical sustituido. 2. Niquelina vertical caliente demasiado, rompe el sello. Calibrar la temperatura de la niquelina vertical.
5	1. Niquelina vertical calibrada
CONCLUSIONES	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Las mordazas desalineadas provocan sellos y cortes no parejos.</li> <li>2. Demasiada temperatura en las niquelinas daña el plástico.</li> <li>3. Un elemento eléctrico o una conexión eléctrica defectuosa puede afectar al desempeño de las niquelinas.</li> </ol>	

Al finalizar con la repotenciación se tiene una máquina que cumple la función de por lo menos dos máquinas del mismo estilo consiguiendo el envase de cuatro presentaciones programables y estos a su vez pueden ser distribuidos en jornadas laborales por medio de selectoras lo que nos permite tener autonomía y ganancia con la maquinaria automatizada.



Figura N° 7 Envasadora lineal repotenciada y automatizada

Se estima un precio de venta de 0,13 dólares a los principales distribuidores de este producto, es decir, tiendas y panaderías; considerando una inflación del 3.5% anual consiguiendo los siguientes resultados puestas en la Tabla N° 7 en ingresos del proyecto.

Tabla N° 7 Ingresos del proyecto

AÑO	CANTIDAD (lt)	NÚMERO DE ENVASES	Precio Unitario (\$)	Ventas Totales (\$)
1	202752	2027520	0,13	263577,60
2	202752	2027520	0,13	263577,60
3	202752	2027520	0,14	283852,80
4	202752	2027520	0,14	283852,80

5	202752	2027520	0,15	304128
6	202752	2027520	0,15	304128
7	202752	2027520	0,16	324403,20
8	202752	2027520	0,16	324403,20
9	202752	2027520	0,16	324403,20
10	202752	2027520	0,17	344678,40

Con los datos obtenidos en el flujo neto de efectivo, punto de equilibrio, rentabilidad, Valor actual neto, tasa interna de retorno, periodo de recuperación de capital se tiene el siguiente beneficio / costo.

$$\begin{aligned} \text{RB/C} &= \text{beneficio} / \text{costo} \\ &= 263577,60 / 233494,55 \\ &= 1,13 \end{aligned}$$

La relación beneficio/costo de 1,13 indica que por cada dólar invertido se obtiene una ganancia de \$0,13 incrementando la producción, lo que muestra que la repotenciación y automatización de la máquina es una de las mejores alternativas en la reutilización de maquinaria y con la ayuda de la academia mejorar estos servicios por medio de la inserción de nuevas tecnologías en este tipo de maquinarias.

## DISCUSIÓN

La repotenciación y automatización de maquinaria es una de las maneras de mejorar e insertar nuevas tecnologías que permitan optimizar e incrementar la producción con estándares de calidad elevados y mejores prestaciones a la hora del trabajo en la planta.

La academia se encuentra en un nivel de tecnología donde se puede brindar asesoramiento y mejoras productivas tomando como base las maquinarias existentes en las empresas, de esta manera vincular a la academia dentro de la industria y los dos caminar en un futuro donde los estándares mundiales solicitan.

Al repotenciar y automatizar una máquina o proceso se tiene un incremento de producción de al menos un 40% del original esto permite tener procesos más rápidos, versátiles y con sistemas de seguridad automáticos que permite proteger a los usuarios o trabajadores que utilicen este tipo de maquinaria.

## CONCLUSIONES

Se genera matrices y tablas para el evaluó del estado de servicio de los elementos de la máquina de la envasadora considerando los siguientes porcentajes un 51,43% de elementos reutilizables, 42,85% de elementos de recambio y 5,72% de elementos a ser desechados, de esta manera garantizo la empleabilidad de los elementos, el recambio y la inserción de nuevas tecnologías en los procesos de llenado.

La máquina permite obtener 4 distintas presentaciones de productos

líquidos lo que se considerada como dos o hasta tres máquinas en una comparando a las existentes en el mercado además de un sistema inteligente de bloqueo de doble señal de presentación con alarma sonora-visual para que no se mezclen la producción de determinados envases.

Si se desea envasar líquidos cuya densidad sea distinta a la del agua, se deberán modificar los tiempos de llenado establecidos en la programación, si la densidad del nuevo líquido es mayor a la del agua se deberá aumentar el tiempo de llenado, caso contrario, si la densidad del líquido es menor a la del agua el tiempo de llenado debe ser reducido, dando la garantía de poder envasar cualquier elemento líquido

## BIBLIOGRAFÍA

- Moreno, Eduardo. 2010. *Diseño de una máquina empacadora dosificadora y selladora de arroz* (tesis). Escuela Politécnica Nacional, Mecánica, Ingeniería Mecánica. Quito-Ecuador. pp. 5-22
- Ortega Rogelio. 2016. *Componentes de control y protección en circuito de potencia*. [en línea] Talca, Marzo de 2016. [Consulta: 04 de Abril de 2016]. Disponible en: <http://www.electrotelex.hol.es/guia%207%20-%20componentes%20control%20y%20proteccion%20circuito%20potencia.pdf>
- Carbotecnia. 2016. *Luz ultravioleta UV*. [en línea] Jalisco, 2016. [Consulta: 04 de Abril de 2016]. Disponible en: <http://www.carbotecnia.info/encyclopedia/luz-ultavioleta-uv/>
- Molina José. 2014. *Electromecánica*. [en línea] San Pedro de los Pinos, 4 de Julio de 2014. [Consulta: 05 de abril de 2016]. Disponible en: <http://www.profesormolina.com.ar/electromec/index.htm>
- García, Andrés. 2005. *Control automático en la industria* [en línea]. La Mancha-España: Unversidad de Castilla. 2005. [Consulta: 05 de abril de 2016]. Disponible en: <https://books.google.com.ec/books?id=MzLgX4uM-O0C&printsec=frontcover&dq=Control+autom%C3%A1tico+en+la+industria+de+garcia+&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKewjM1pWS0rzRAhUGQSYKHXD-BDMQ6wEIGTAA#v=onepage&q=Control%20autom%C3%A1tico%20en%20la%20industria%20de%20garcia&f=false>
- Navarrete Andrés. 2013. *Automatización de procesos en la empresa*. [en línea] Bogotá, 5 de Noviembre de 2013. [Consulta: 05 de Abril de 2016]. Disponible en: <http://www.gestiopolis.com/automatizacion-de-procesos-en-la-empresa/>
- Mespack. 2016. *Materiales de película flexible*. [en línea] Barcelona. [Consulta: 05 de Abril de 2016]. Disponible en: [www.mespack.com](http://www.mespack.com)
- Mott, Robert. 2009. *Resistencia de Materiales*. 5ª ed. México: Pearson Educación, pp. 191-199
- Teqma. 2012. *Desinfección ultravioleta*. [en línea]. Barcelona. [Consulta: 10 de Junio de 2016]. Disponible en: <http://www.teqma.com/ultravioleta/desinfeccion-ultravioleta>
- Valdes Christian. 2015. *Controles Eléctricos*. [en línea]. Colombia. [Consulta: 06 de Abril de 2016]. Disponible en: <http://controlelectricos.weebly.com/contactores.html>

## MODELACIÓN Y VERIFICACIÓN DE MALLA PARA UN ANÁLISIS AERODINÁMICO MEDIANTE EL MÉTODO DE VOLÚMENES FINITOS

Medina, Eduardo <sup>1</sup>; Aucatoma, Ricardo <sup>1</sup>; Padilla, Celin <sup>1</sup>; Aquino, Miguel <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

Autor de correspondencia: Eduardo.medina@esPOCH.edu.ec

### **RESUMEN**

En la investigación se muestra una metodología para realizar el análisis aerodinámico a través del método de volúmenes finitos a partir de una geometría generada en un software CAD, el caso de estudio corresponde a un alerón de un vehículo de competición donde el efecto aerodinámico es de gran importancia debido al efecto de las líneas de flujo que circulan sobre la superficie del vehículo las mismas que pueden generar turbulencias y desestabilizar el comportamiento del vehículo a altas velocidades. El análisis computacional requiere una condición geométrica apropiada donde se establece los elementos estructurales del vehículo que no generan algún efecto aerodinámico, al contrario incrementa un gasto computacional, analizado la parte geométrica mediante un procedimiento de simplificación se procede al obtención del volumen de control donde se parametriza las dimensiones del área y se proyecta el volumen, además las condiciones de mallado deben tener un criterio de aceptación en la calidad de la malla y los datos de entrada como velocidad, presión, y temperatura calculadas de forma correcta. Los resultados de la investigación muestran la comparación de un vehículo de competencia simplificado con alerón en cuanto a la difusión del flujo sobre la superficie del vehículo evidenciando el comportamiento aerodinámico.

*Palabras clave: Aerodinámica, Volúmenes finitos, Alerón, turbulencia*

### **ABSTRACT**

This research shows a methodology to get the aerodynamic analysis through the finite volume method from a geometry generated in a CAD software, the case study start with a spoiler of a competition vehicle where the aerodynamic effect is very important due to the effect of the flow lines that circulate on the surface of the vehicle, these can generate turbulence and destabilize the behavior of the vehicle at high speeds. The computational analysis requires an appropriate geometric condition, the structural elements of the vehicle are established in order to do not generate any aerodynamic effect, the contrary effect increases the computational needs, analyzing the geometric part through a simplification is possible to procedure to obtain the control volume where is parameterized the dimensions of the area and the volume is projected, in addition the meshing conditions must have a criterion of acceptance in the quality of the mesh and input data such as speed, pressure, and temperature are calculated correctly. The results of the investigation show the comparison of a vehicle of simplified competition with spoiler and it shows that the diffusion of the flow on the surface of the vehicle given an idea of the aerodynamic behavior.

*Key words: Aerodynamics, Finite volumes, Spoiler, turbulence*

## INTRODUCCIÓN

La aerodinámica en los vehículos, se convirtió en un aspecto muy importante dentro del diseño, por lo que, los elementos aerodinámicos tales como los difusores, alerones, pasaron de ser simples elementos de estética, a ser elementos aptos para la mejora en el rendimiento del vehículo, primordialmente en la estabilidad del vehículo en altas velocidades. De esta manera nace la idea de diseñar un alerón que cambie de posición automáticamente en función de la velocidad del vehículo.

Los alerones delanteros como traseros aumentan el apoyo aerodinámico, así como la velocidad en las curvas. En los circuitos rápidos, con largas rectas y pocas curvas, los perfiles son casi horizontales en posición normal para disminuir la resistencia al avance y el apoyo aerodinámico, aumentando la máxima velocidad en rectas. En circuitos lentos, con pocas rectas y muchas curvas, los perfiles tienen más inclinación, sacrificando la velocidad máxima en función del agarre para obtener una mayor estabilidad en curvas. (Admian, 2012)

La Dinámica de Fluidos Computacional o CFD (Computational Fluid Dynamics), es una herramienta computarizada para solucionar las ecuaciones de movimiento de fluidos con el propósito de aplicarlas a problemas reales. La dinámica de fluidos tuvo origen mediante la combinación de dos métodos: mecánica de los fluidos y cálculo numérico. Las ecuaciones que gobiernan el flujo tienen origen en la mecánica de fluidos y pueden ser resueltas por medio de diferentes métodos numéricos. (Kessler, 2016)

El método de volúmenes finitos permite resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Este es un método alternativo a los de elementos finitos y diferencias finitas. La ecuación diferencial a resolver se integra sobre cada poliedro o volumen de control, lo cual entrega como resultado una versión discretizada de dicha ecuación. (Xamán, 2016 págs. 15-17)

## MATERIALES Y MÉTODOS

Con la utilización de un software CAD se procede a diagramar el vehículo de competición el cual presenta detalles significativos como por ejemplo en los aros de los neumáticos y el sistema de suspensión como se muestra en la figura 1.



Figura 1: Vehículo de competición

Con el modelo geométrico se procede a la utilización de un software CAE el cual trabaja con CFD, el primer paso que es la importación de la geometría que se efectuó correctamente, el siguiente paso corresponde a la generación del volumen de control el cual presenta dificultad en cuanto al tiempo de presentar los resultados, se procede a realizar la mallada actividad que produjo un error durante su ejecución generando una malla obsoleta y sin resultados. Como es de entender sin la generación correcta de malla no se puede continuar con el proceso de análisis a través de volúmenes finitos.

Para resolver el problema de generación de malla se procede a simplificar la geometría inicial utilizando herramientas del software CAD que permitan obtener una geometría válida para el análisis como se muestra en la figura 2.

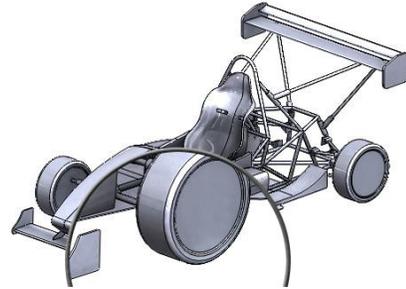


Figura 2: Vehículo de competición simplificado

Con la geometría simplificada procedemos a dimensionar el volumen de control utilizando un croquis en el plano "yz" que permite acotar el boceto dando su respectivo valor a cada cota como se muestra en la figura 3.

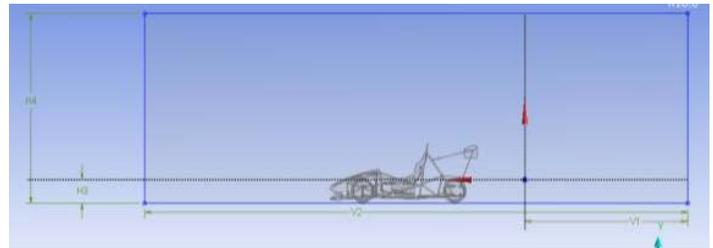


Figura 3: Volumen de control

Después de haber creado el boceto se procede a extruir dicho boceto, como se muestra en la figura 4, generando así nuestro volumen de control o más conocido como el entorno virtual para poder simular.

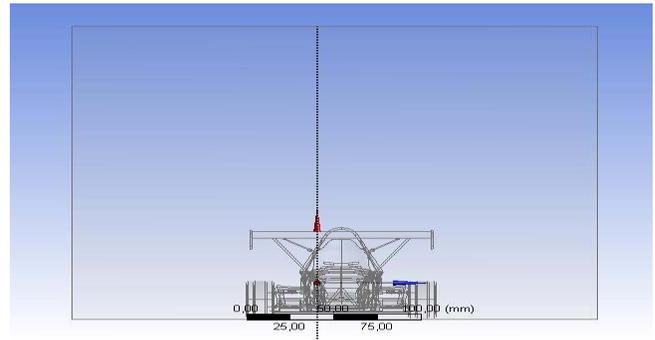


Figura 4: Volumen de control

Una vez realizado el volumen de control se procede con la creación de la malla, la cual se evalúa con el método de calidad de malla "Element Quality" y "Skewness".

El método Element Quality, evalúa la malla de 0 a 1. Esta métrica se basa en la relación del volumen a la suma del cuadrado de las longitudes de borde para los elementos cuadriláteros y triangulares en 2D, o la raíz cuadrada del cubo de la suma del cuadrado de las longitudes de borde para elementos 3D. Un valor de 1 indica un cubo o cuadrado perfecto, mientras que un valor de 0 indica que el elemento tiene un volumen cero o negativo y mediante una barra de colores, siendo el cero de color rojo un valor inaceptable y uno de color azul un valor excelente como se muestra en la figura 5.

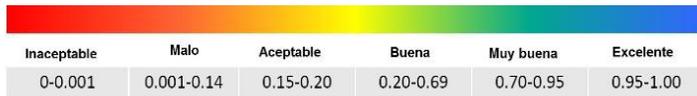


Figura 5: Método “Element Quality”

El método Skewness, evalúa la malla de 0 a 1, Skewness es una de las principales medidas de calidad para una malla. La asimetría determina qué tan cerca de equilátero o equiangular está una cara o una célula y mediante una barra de colores, siendo el cero de color azul un valor excelente y uno de color rojo un valor inaceptable como se muestra en la figura 6.

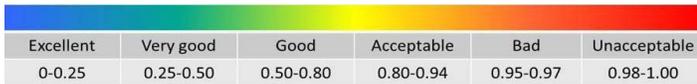


Figura 6: Método “Skwness”

**MALLADO CFD**

El análisis de CFD se puede realizar en 2D o 3D, la malla es una de las etapas críticas del análisis CAE. Si en la malla el tamaño del elemento es demasiado grande, la precisión de la solución se ve comprometida. Si en la malla el tamaño del elemento es demasiado pequeño o muy fino, el modelo tardará demasiado en resolverse y requerirá grandes cantidades de potencia de cálculo. Cuanto más fina es la malla, más pequeños son los volúmenes finitos. Si el modelo es demasiado impedirá el funcionamiento correcto de la computadora debido a la cantidad de potencia de computación requerida. Si esto ocurre, es posible que la computadora se bloquee. Todo el proceso deberá comenzar nuevamente.

En la figura 7, se muestra los elementos de malla 2D y 3D.

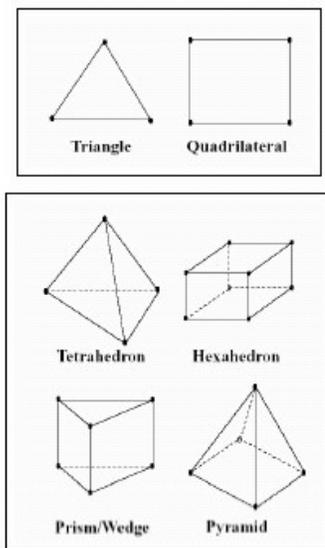


Figura 7: Elementos de malla 2D y 3D

**GENERACIÓN DEL MALLADO 3D**

El mallado 3D se compone de elementos tetraédricos, no es necesario que en el volumen de control el elemento sea del mismo tamaño, por esta razón entre más cerca este la malla de la superficie del prototipo más pequeño es elemento como se muestra en la figura 8.

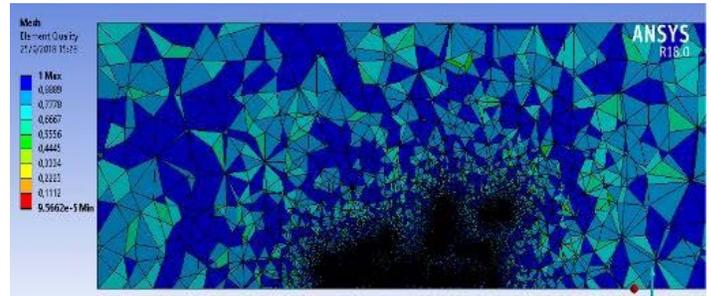


Figura 8: Mallado

**ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE MALLA**

La asimetría es una medida de la calidad de la malla en la geometría CAD. Identifica qué tan bien encajan los elementos de malla regulares en el perfil de geometría.

En algunos casos, cerca del borde de la geometría, la forma del elemento de malla se desvía para encajar en el límite de la geometría CAD. El rango promedio de la calidad de malla se mide de acuerdo al método escogido en el software CFD.

Los tres valores del rango de la calidad de malla son detallados, máximo, promedio y mínimo, los valores de calidad de malla se detallan en las figuras 9, figura 10.

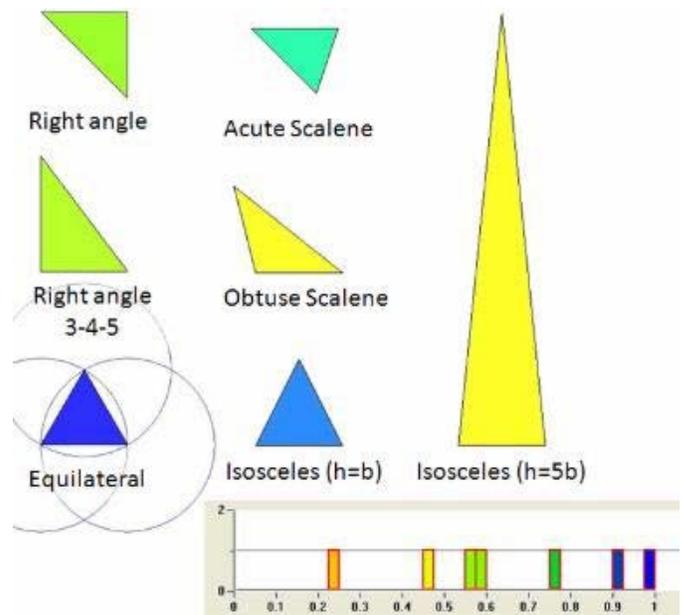


Figura 9: Calidad del elemento en 2D

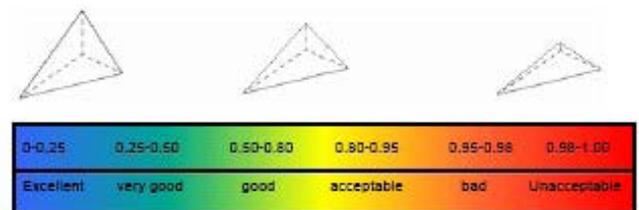


Figura 10: Calidad del elemento en 3D

**Evaluación de la malla mediante el método Element Quality**

En la figura 11, se visualiza que la mayor cantidad de elementos avanzan hacia el color azul, indicando que mediante la escala de colores la calidad de malla es buena.

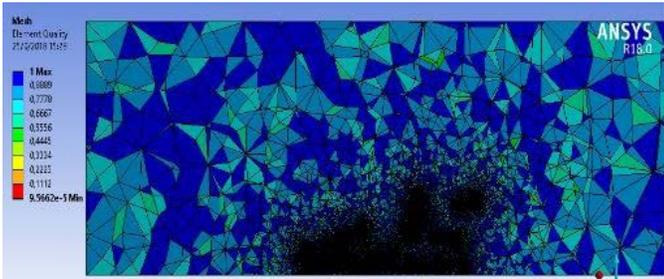


Figura 11: Escala de colores (Element Quality)

En la figura 12 se puede visualizar que la mayor cantidad de elementos están entre 0.5 y 1 indicando, que mediante la escala de valores la calidad de malla es buena.

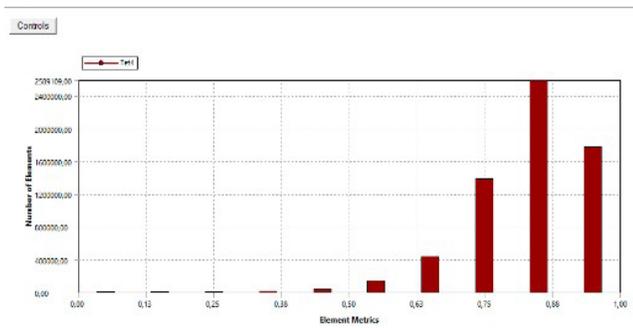


Figura 12: Escala de valores (Skwness)

**Evaluación de la malla mediante el método Skwness.**

Se observa que la mayor cantidad de elementos avanzan hacia el color azul, indicando que mediante la escala de colores la calidad de malla es buena tal como se muestra en la figura 13.

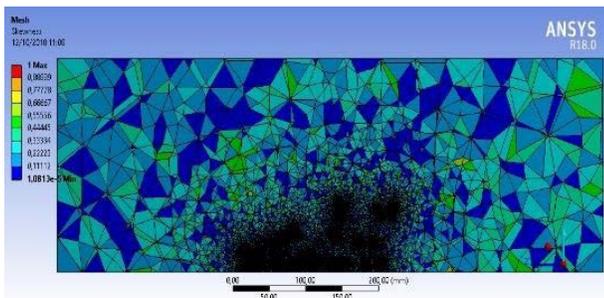


Figura 13: Escala de colores (Skwness)

Se observa que la mayor cantidad de elementos están entre 0.5 y 0 indicando que mediante la escala de valores la calidad de malla es buena tal como se muestra en la figura 14.

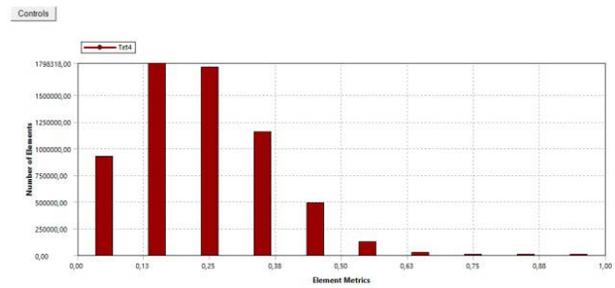


Figura 14: escala de valores (Skwness)

**SIMULACIÓN AERODINÁMICA**

**Velocidad (flap cerrado)**

En las líneas de flujo se puede observar que se genera turbulencia en la parte del centro del alerón posterior a razón de que el asiento se opone al flujo en esa parte.

La turbulencia genera una pérdida considerable al avance o incremento de velocidad, debido a que la turbulencia se genera en la zona del alerón posterior, mientras que el flujo laminar se genera por encima del alerón posterior y no es aprovechado observa en la Figura 15 y Figura 16.

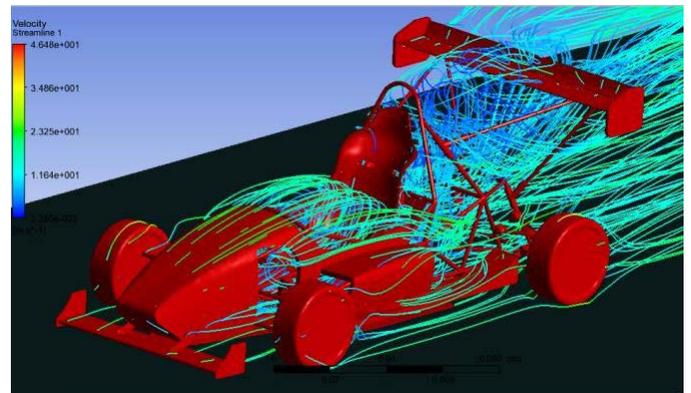


Figura 15: Líneas de flujo de velocidad, vista en 3D

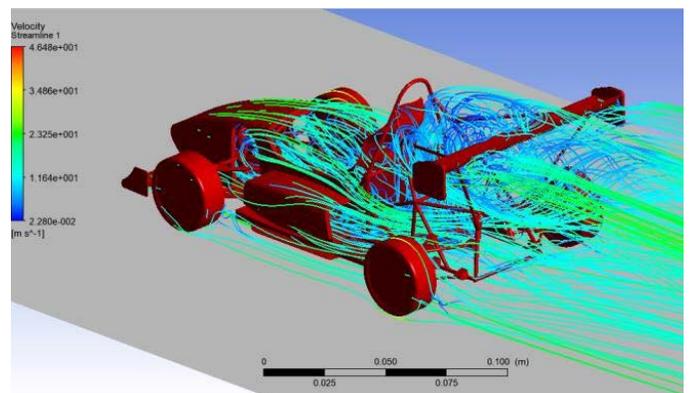


Figura 16: Líneas de flujo de velocidad, vista en 3D

En la figura 17, se observa que la velocidad máxima en el plano medio con un incremento de 23.25 m/s a 34.86 m/s muy por encima del alerón posterior.

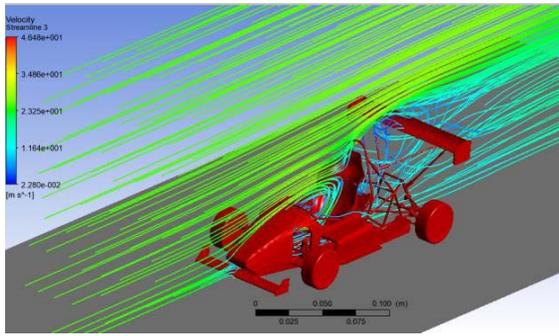


Figura 17: Líneas de flujo de velocidad en el plano YZ, vista en 3D

En la figura 18, la velocidad máxima con un incremento de 23.25 m/s a 34.86 m/s con flujo laminar en la superficie superior del alerón posterior, y una velocidad máxima con incremento de 34.86 m/s a 46.48 m/s en la superficie inferior del alerón trasero.

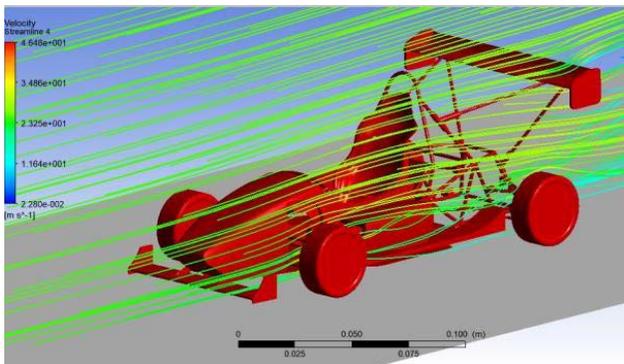


Figura 18: Líneas de flujo de velocidad en el plano YZ, vista en 3D

**Velocidad (flap abierto)**

Con el flap abierto el fluido es un poco menos turbulento en la zona del medio del alerón posterior debido a que la abertura entre el flap y el alerón libera resistencias al aire, y esto permite que el fluido torne hacerse más laminar y menos turbulento tal como se muestra en la figura 19.

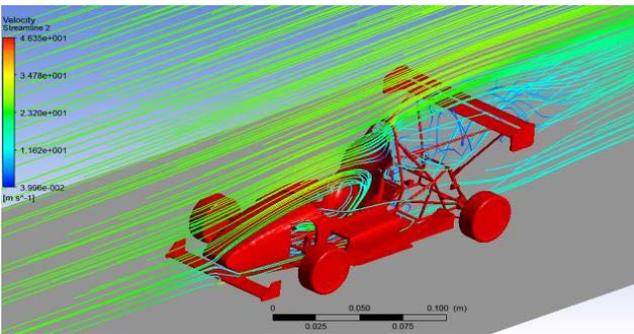


Figura 19: Líneas de flujo de velocidad en el plano YZ, vista en 3D

En la figura 20, la velocidad máxima con un incremento de 23.20 m/s a 34.78 m/s con flujo laminar en la superficie superior del alerón y el flap posterior, y una velocidad máxima con incremento de 34.78 m/s a 46.35 m/s en la superficie inferior entre el alerón y el flap.

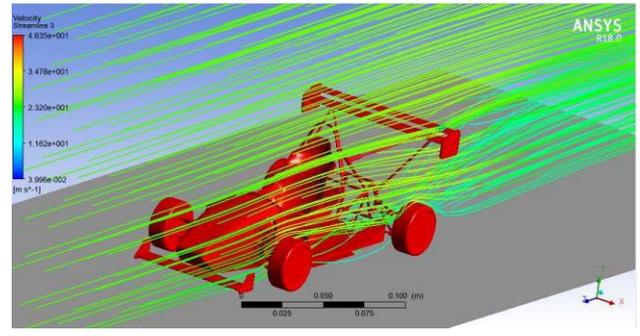


Figura 20: Líneas de flujo de velocidad en el plano YZ, vista en 3D

**RESULTADOS**

En la tabla 1 se observa la calidad del elemento de forma cualitativa y cuantitativa, ambos métodos dan resultado de una calidad de malla buena para el análisis aerodinámico.

Tabla 1: calidad de malla

METODO	NUMERO DE ELEMENTOS	CUANTI-TATIVO	CUALI-TATIVO
Element Quality	2 589 109.00	0.5 a 1	buena
Skewness	1 798 318.00	0.63 a 0	buena

Elaborado por: Autores / Fuente: Autores

En la tabla 2 se observa que hubo una disminución de velocidad, con el flap abierto.

Tabla 2: calidad de malla

FLAP	VELOCIDAD (m/s)
Cerrado (plano lateral)	23.25 a 34.86
Abiero (plano medio)	23.2 a 34.78

Elaborado por: Autores / Fuente: Autores

**CONCLUSIONES**

La calidad de malla con el element quality está entre 0.5 y 1 y con el skewness está entre 0.63 a 0 siendo valores aceptables para realizar un análisis CFD.

El rango de calidad de malla varia de acuerdo con la cantidad de elementos que se calculan con cada método, con el element quality el número de elementos fue de 2589109.00 y en el skewness fue de 1798318.00, debido a esto ambos métodos están con buena calidad de malla, pero con rangos diferentes.

Al optimizar la geometría quitando elementos estructurales que no afecten al comportamiento del fluido en el vehículo de competición se logro disminuir significativamente recurso computacional y se redujo el tiempo de procesamiento del análisis aerodinámico.

En la zona median del vehículo de competición existe un flujo turbulento debido a que todo el flujo choca directamente en la superficie del asiento ocasionado perdidas de velocidad del fluido, mientras que en la parte lateral hay un flujo laminar a razón de que no existen componentes estructurales que hagan resistencia al fluido.

## REFERENCIAS

1. Admian. Aerodinámica. *Carga aerodinámica*. [En línea]. Murcia: A. 2012. [Consulta: 16 de Mayo de 2018.] Disponible en: <http://314jyj.foroactivo.com/t41-tecnica-en-formula-1-laaerodinamica-objetivos#146>
2. Albrodpul. Análisis Técnico. *Mecanismo Pod Pull*. [En línea]. Bilbao: Albrodpul, 2017. [Consulta: 29 de Mayo de 2018.] Disponible en: <https://albrodpulf1.wordpress.com/2017/09/25/analisis-tecnico-drs-drag-reduction-system/>.
3. Aparicio, I. F. *Teoría de los vehículos automóviles*. 2.ª ed. Madrid-España: Bohodón Ediciones, 2001, pp. 165 - 172.
4. Bastero, José M. El metodo de los Elementos Finitos en Ingeniería Mecánica. *Ingeniería e Industria DYNA*, Vol. 52, nº 10 (1977), (Bilbao) pp. 285 - 294.
5. Carmona, Aníbal Isidro. *Aerodinámica y Actualizaciones*. 13.ª ed. Madrid-España: Paraninfo, 2015 pp. 51 - 52.
6. Castañé, Josep. *El equipo de competición*. Barcelona-España: CEAC, 2007. pp. 180-182.
7. Climate-data-org. *Clima. Temperatura*. [En línea] 2018. [Consulta: 10 de Julio de 2018.] Disponible en: <https://es.climate-data.org/>.
8. Hulett, Daniel Ricardo. Activacion del DRS. [blog] *Formula RD*, 2012. [Consulta: 2 de Junio de 2018.] Disponible en: <http://formulauno-auto.blogspot.com/2012/03/que-es-el-drs.html>.
9. Drier, Car and. DRS. *Funcionamiento del Sistema*. [En línea] Hearst España, 2017. [Consulta: 24 de Mayo de 2018.] Disponible en: <http://www.caranddriver.es/formula-1/drsnemesi-de-alonso-en-bahrein-pero-fundamental-para-el-espectaculo-en-f1>.
10. Díaz, Rómulo. Elementos Finitos. *3D Cadcam Magazine*, Vol. 1, nº 2 (2014) (Monterrey), P. 11.
11. Eymard, R. *Manual de Análisis Numérico*. Marsella-España: UMR, 2003, pp. 713-1020.
12. F1, Paddock Club. *DRS del McLaren activado*. [En línea] Canada, 2016. [Consulta: 24 de Mayo de 2018.] Disponible en: <https://paddockclubformula1.com/2014/06/06/tecnica-canadaires-actualizando-a-lo-largo-del-fin-de-semana/>.
13. García, Carlos. Número Reynolds y Tipos. [En línea] *Goconqr*, 2016. [Consulta: 18 de Mayo de 2018.] Disponible en : [https://www.goconqr.com/p/6455819-n-mero-reynolds-y-tipos-flujoslide\\_sets#!](https://www.goconqr.com/p/6455819-n-mero-reynolds-y-tipos-flujoslide_sets#!).
14. Gómez, Sergio. *El gran libro de Solidworks*. 2.ª ed. Barcelona-España: Marcombo, 2015, pp. 90 - 120.
15. International, SAE. *Formula Sae Rules*. [En línea] Digital Engineering Solutions, 2018. [Consulta: 6 de Julio de 2018.] Disponible en: <https://www.fsaonline.com/cdsweb/gen/DocumentResources.aspx>.
16. Jero. *Resistencia aerodinámica*. [En línea] Almeria: 2014. [Consulta: 22 de Mayo de 2018.] Disponible en: <http://virutasfl.com/2014/02/viru-conceptos-basicos-de-ingenieria-de-competicioncapitulo-8/>.
17. Kessler, Martin. *Dinámica de Fluidos Computacional*. [blog] [Consulta: 23 de Mayo de 2018.] Disponible en: <https://www.esss.co/blog/es/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>.
- 18.
19. Lozano, Adrian. *Apuntes sobre Dinamica de Fluidos Computacional*. Discretización Temporal. [En línea] Madrid: 2015. [Consulta: 23 de Junio de 2018.] Disponible en: [https://torroja.dmt.upm.es/adrian/wpcontent/uploads/2015/11/Apuntes\\_CFD\\_2015.pdf](https://torroja.dmt.upm.es/adrian/wpcontent/uploads/2015/11/Apuntes_CFD_2015.pdf)
20. McBeath, Simon. *Aerodinámica del vehículo de competición*. Barcelona-España: BEAC, 2005. pp 73 - 90.
21. Mirlisenna, Giuseppe. *Método de los elementos finitos*. [blog] [Consulta: 12 de Junio de 2018.] Disponible en: <https://www.esss.co/blog/es/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/>.
22. Motoronline. *DRS Activation*. [En línea] Inglaterra: The King of Spa, 2013. [Consulta: 29 de Mayo de 2018.] Disponible en: <http://forum.motoronline.com/index.php?showtopic=25080>.
23. Mott, Robert L. *Mecánica de Fluidos*. 6.ª ed. Mexico: PRENTICE HALL Mexico, 2006. pp. 165 - 231.
24. SAE. *SAE International*. [En línea] Sae Mobilus, 2018. [Consulta: 10 de Mayo de 2018.] Disponible en: <http://students.sae.org/competitions/formulaseries/about.htm>.
25. Santosham, Ivan Sam. *Teorema de Bernoulli. Principio*. [En línea] Los Angeles: Sam, I. 2017 [Consulta: 19 de Mayo de 2018.] Disponible en: [https://www.skybrary.aero/index.php/Bernoulli%27s\\_Principle](https://www.skybrary.aero/index.php/Bernoulli%27s_Principle).
26. Streeter, Victor L. *Mecánica de los Fluidos*. 4.ª ed. Mexico : McGRAW-HILL DE MEXICO, S.A, pp. 127-131.
27. UC3M. *Formula Student*. [En línea] Madrid: 2011. [Consulta: 10 de Mayo de 2018.] Disponible en: [http://formulauc3m.com/formula\\_student/](http://formulauc3m.com/formula_student/).
28. Xamán, J; & Gijón Rivera, M. *Dinámica de Fluidos Computacional para Ingenieros*. Mexico : Copyright. 2016 pp. 1-20.

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BASTIDOR DE UN VEHÍCULO MONOPLAZA MULTIPROPÓSITO

Curisaca, Jhonn <sup>1</sup>; López, Damián <sup>1</sup>; Asto, Cristian <sup>1</sup>;  
Vaca, Oscar <sup>1</sup>; Quinga, Milton <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Carrera de Ingeniería Automotriz, Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Autor de correspondencia: milton.quina@esPOCH.edu.ec

### **RESUMEN**

Uno de los problemas urbanos en la actualidad es sin duda la movilidad, cuando un vehículo se ocupa únicamente por el conductor agrava la situación, por lo que el presente trabajo propone una alternativa económica, viable y ecológica, de un medio de transporte personal con un bajo gasto energético pero que además cumpla con todas las exigencias de seguridad que establecen las normas ecuatorianas. La fase de diseño comienza identificando el material disponible en nuestro medio y que además cumpla con el proceso de manufactura planteado, para lo cual se emplea un software de selección de materiales, que proporciona las características de un material idóneo tomando en cuenta las condiciones de entrada. Posteriormente se bosqueja el bastidor, que es la estructura donde se instalarán todos los sistemas mecánicos y de control, que debe ser lo suficientemente capaces para transportar una persona cómodamente sentada. Al agregar cada sistema y el ocupante del vehículo, aumenta la carga que debe soportar la estructura, la misma que se analiza por medio de software CAE, con el objetivo de garantizar la seguridad de la estructura.

*Palabras clave: Bastidor, Movilidad, Sistemas mecánicos, Vehículo monoplaza.*

### **ABSTRACT**

One of the urban problems today is undoubtedly mobility, when a vehicle is occupied only by the driver aggravates the situation, that is why the present work proposes an economical, viable and ecological alternative of a means of personal transport with a low energy expenditure but that also complies with all the security requirements established by Ecuadorian standards. The design phase begins by identifying the material available in our environment and also complies with the manufacturing process proposed, for which a software selection of materials is used, which provides the characteristics of a suitable material taking into account the conditions of entry. Later the frame is sketched, which is the structure where all the mechanical and control systems will be installed, which must be capable enough to transport a person comfortably seated. By adding each system and the occupant of the vehicle, the load that the structure must support increases, which is analyzed by means of CAE software, with the aim of guaranteeing the structure's safety.

*Keywords: Frame, Mobility, Mechanical systems, Single-seat vehicle.*

# INTRODUCCIÓN

La Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) estima que cerca del 24% de la emisión de CO2 y el 14% de gases de efecto invernadero es producida por el sector de transporte [1], esto ocurre principalmente por el crecimiento del parque automotor privado y la falta de un adecuado sistema de transporte público, el hecho que un auto este ocupado únicamente por el conductor del vehículo agrava la situación, ya que un bus de transporte urbano podría reemplazar el uso de 60 vehículos en estas condiciones, la contaminación provocada por los 60 vehículos será mayor al del transporte masivo de personas. Pero en vista de las limitantes que posee el transporte masivo de personas tales como: horarios, rutas, tiempo, comodidad, disponibilidad, etc. Se presenta una alternativa económica, versátil y segura para transportar una sola persona a la vez, y para ello es imprescindible el diseño de un bastidor que aloje cada uno de los sistemas mecánicos requeridos para su funcionamiento. El bastidor está constituido generalmente por un armazón de vigas que se extiende a lo largo de su estructura, que se unen mediante travesaños por operaciones de ensamble permanente como soldado o ensamble mecánico como atornillado o remachado, dispuestos ya sea de manera transversal o diagonal de acuerdo con la configuración [2].

Existen varias configuraciones de bastidor, entre ellos una alternativa sencilla y económica es el bastidor de tipo tubular con perfil circular [3], material que está disponible en el Ecuador, lo que abarata los costos de producción y es fácil de trabajar con distintos procesos de manufactura como: soldadura eléctrica, doblado, rolado, barrenado, empernado, etc. [4]

# MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño del chasis contempla las etapas de: selección de material, modelado computacional, análisis estructural estático y dinámico, de los cuales uno de los aspectos más importantes para el diseño del vehículo es el material con el que se va a construir, se consideran para el software cada uno de los procesos de manufactura que se emplearán en la construcción tales como: Soldadura manual por arco, procesos de deformación y precio [5]; la figura 1 relaciona el límite elástico con el precio de los materiales que cumplen los criterios propuestos inicialmente, y podemos notar que todos los materiales resultantes pertenecen a la familia de los metales ferrosos, y destacamos los existentes en el mercado nacional, los aceros de bajo contenido de carbono, que comercialmente los podemos encontrar bajo la denominación: tubos de perfil circular ASTM A36 o A500 (Figura 1). Una vez seleccionado el material se bosqueja el bastidor con la ayuda de un software CAD, tomando en cuenta que se debe transportar una persona cómodamente sentada y servir como acople de los sistemas de suspensión, dirección, frenos y propulsión, el resultado preliminar se muestra en la figura 2, donde se asigna el material ASTM A 500 a los tubos de perfil circular.

Para validar la estructura se realiza un análisis estático en un software CAE, donde se consideran las cargas aplicadas en cada uno de los puntos de anclaje del bastidor como se muestra en la figura 3, cada uno de estos puntos críticos se deben analizar para considerar que la estructura sea segura para los ocupantes. [6]

# RESULTADOS

El software CAE resuelve complejas ecuaciones sobre la geometría, considerando las cargas aplicadas en cada sección, el esfuerzo equivalente de Von - Mises máximo en el estudio estructural estático fue de 63,767 MPa; tomando en cuenta que el esfuerzo de cedencia del material empleado es de 250 MPa no resulta útil analizar punto por punto los esfuerzos provocados ya que el material realiza esfuerzos dentro de su límite elástico, los resultados se muestran en la figura 4.

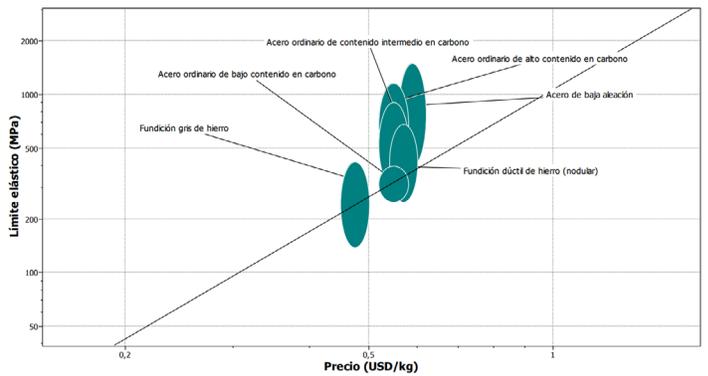


Figura 1: Gráfica que relaciona el límite elástico con el precio.

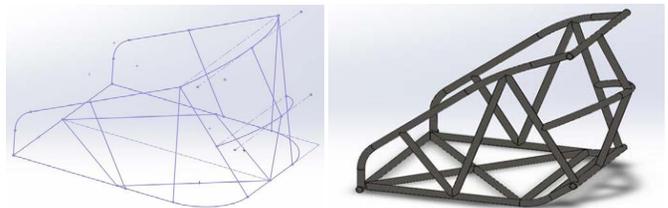
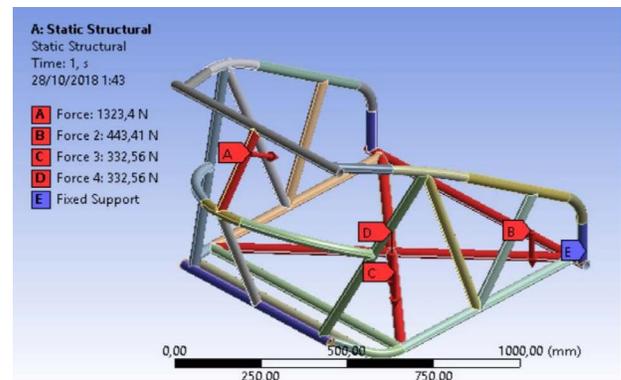


Figura 2a: Bosquejo de bastidor y asignación de material en el software



Para ampliar el estudio se toma en cuenta las deformaciones provocadas en la estructura, y como se sabe que el material esta trabajando en su zona elástica, las deformaciones en la estructura serán leves.

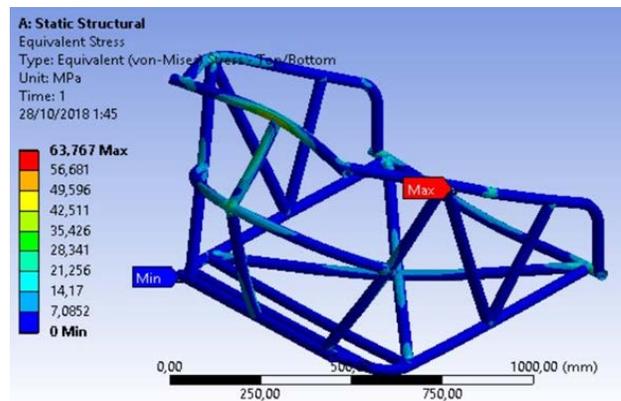


Figura 4: Análisis estructural estático, Esfuerzo equivalente.

En la figura 5 se muestran las deformaciones provocadas en el bastidor, la deformación máxima coincide con el punto donde el esfuerzo es máximo, y es de 0,5289 mm.

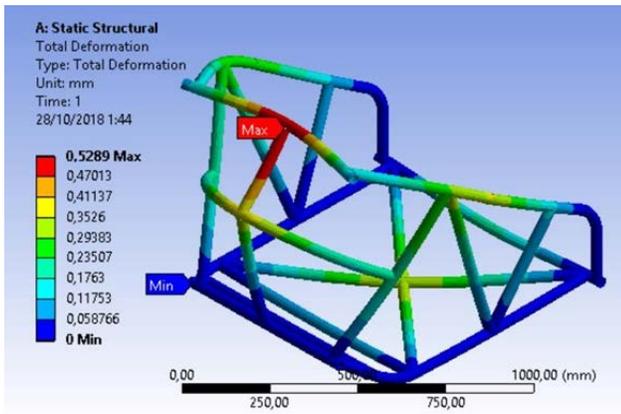


Figura 5: Análisis de las deformaciones provocadas en la estructura.

Si bien se podría estimar el factor de seguridad de la estructura con los datos obtenidos, el software permite analizar y determinar un factor de seguridad global, donde se obtiene un valor mínimo de 3,9205 en la zona crítica y un valor máximo de 15 donde los esfuerzos son mínimos.

Un Estudio adicional considera un aspecto dinámico y posible como una colisión, para lo cual se considera la velocidad permitida en zona urbana de 50 km/h, en este tipo de eventos se producen cargas instantáneas elevadas en la estructura lo que generaría una falla inminente del bastidor, y podría afectar al conductor, se ha considerado un choque frontal y los resultados se muestran en la figura 6.

El esfuerzo máximo generado durante el impacto es de 2253,6 Mpa que supera ampliamente la resistencia a la tensión del material que es de 350 MPa, se produjo una rotura del material en esa zona, pero no significa que la estructura en general falle, para complementar el estudio analizaremos las deformaciones provocadas durante el choque, los resultados se muestran en la figura 7.

La estructura mantiene la misma tonalidad de rojo, esto quiere decir que en conjunto se desplaza hacia la pared, las secciones marcadas en amarillo son las que absorben la energía del impacto provocando que se incrusten en la estructura a razón de 14,308 mm; el material a fallado en esta zona, pero no alcanzaría al conductor.

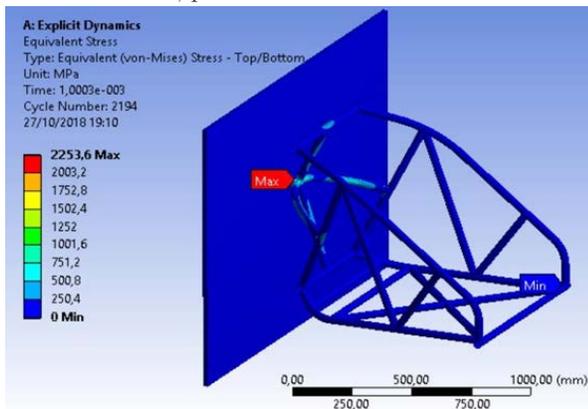


Figura 6: Esfuerzo máximo generado en el impacto.

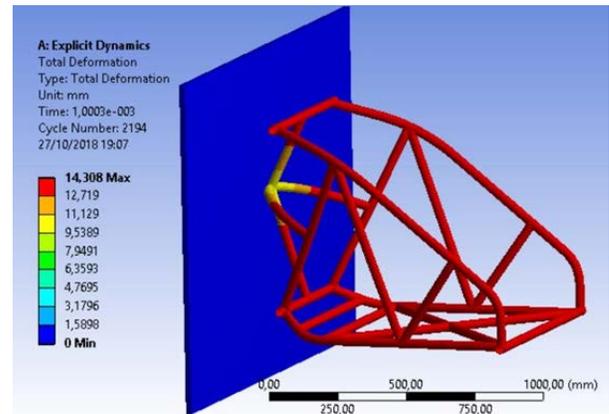


Figura 7: Deformación máxima generada en el impacto

## CONCLUSIONES

Los materiales más económicos a razón de 1 dólar por cada kilogramo y que tienen excelentes cualidades para adaptarse a distintos procesos de manufactura siguen siendo los aceros, y en el mercado ecuatoriano existen alternativas en tubos de perfil circular como la empleada en el presente estudio como el ASTM A 500.

En el análisis estático se presenta una deformación máxima de 0,5289 mm que se considera despreciable, debido a que el esfuerzo máximo del material en ese punto es inferior al límite elástico, lo que indica que la deformación provocada es elástica.

En caso de existir un choque, el esfuerzo puntual generado de 2253,6 MPa lo que supera ampliamente la resistencia a la tensión del material, el material a fallado en esa zona, que esta delimitada por 14,308 mm desde la parte frontal de la estructura, para lo cual se recomienda que todos los mandos, sistemas y anclajes de asiento se diseñen tomando en cuenta esta afectación, para prevenir que existan lesiones en el conductor.

## REFERENCIAS

1. AEADE. Movilidad urbana sostenible, Quito, 2018. Disponible en: <http://www.aeade.net/movilidadurbana-sostenible>
2. Alonso, J. Técnicas del automóvil chasis. 8va. Ed. Madrid, Paraninfo, 2011. Pp
3. Gómez, T; et al. Navarro. Elementos estructurales del vehículo. Madrid, Paraninfo, 2016, pp. 29-89.
4. Kalpakjian, Serope; & Schmid, Steven. Manufactura, ingeniería y tecnología. 4ta.Ed. México, Pearson Educación, 2002. p. 1071.
5. Mott, Robert. Diseño de elementos de máquinas. México, Pearson Education, 2006. pp. 54-58.
6. [Navarro, José. Transporte y mantenimiento de vehículos: Elementos fijos. México, Paraninfo, 2010. pp. 18-159.

## REDISEÑO DE LAS MANGUETAS DE UN VEHÍCULO FORMULA SAE MEDIANTE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA Y MANUFACTURA CON CNC

Reyes, David <sup>1</sup>; Rockwood, Robert <sup>2</sup>; Pozo, Jonatan <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador

<sup>2</sup> Centro de investigación y desarrollo en ingeniería automotriz ERGON, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador

<sup>3</sup> Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Autor de correspondencia: rockwood@uazuay.edu.ec

### **RESUMEN**

En el presente trabajo se realiza el rediseño de las manguetas delanteras y posteriores para un vehículo formula SAE mediante técnicas de optimización topológica estructural y manufactura con CNC. Se logra reducir la masa de las nuevas manguetas sin afectar la resistencia mecánica de las mismas. Inicialmente se fundamentan los sistemas de suspensión, dirección y frenos de un vehículo monoplaza tipo formula SAE, luego a través del proceso de optimización topológica estructural se diseñan las manguetas delanteras y posteriores utilizando el programa de diseño asistido por computadora HyperWorks® obteniendo el modelo 3D que satisface los objetivos y restricciones impuestas. Luego se manufacturan las manguetas mediante control numérico computarizado CNC para lo que se utiliza el software Inventor® con HSM® de Autodesk™, empleando las estrategias de mecanizado que permitan obtener de un solo bloque las cuatro manguetas. Finalmente se realizan pruebas de montaje, interferencia mecánica y funcionamiento en el vehículo formula SAE, a través de este proceso se pudo disminuir el peso de estos componentes en un 40 y 49%.

*Palabras clave: Optimización topológica, diseño de manguetas, manufactura CNC.*

### **ABSTRACT**

In the present work, the redesign of the front and rear stub axles for a SAE formula vehicle is performed through topological structural optimization techniques and CNC machining. It is possible to reduce the mass of the new stub axles without affecting the mechanical strength of the same. Initially the suspension, steering and braking systems of a single-seat SAE formula vehicle are based, then through the structural topological optimization process, the front and rear stub axles are designed using the HyperWorks® computer-aided design program, obtaining the 3D model that it satisfies the objectives and restrictions imposed. The manguetas are then manufactured using CNC computerized numerical control for which Inventor® software with HSM® from Autodesk™ is used, employing machining strategies that allow the four stubs to be obtained from a single block. Finally, assembly tests, mechanical interference and operation in the SAE formula vehicle are carried out. Through this process, the weight of these components could be reduced by 40 and 49%.

*Keywords: topological optimization, stub axles design, CNC Machining*

## INTRODUCCIÓN

Fórmula SAE es una competencia en la que equipos de universidades de todo el mundo, diseñan, construyen y compiten con un vehículo monoplace en diversas pruebas, tanto estáticas como dinámicas. Entre las pruebas estáticas se encuentran: la presentación del proyecto empresarial, ingeniería de diseño y el análisis de costos. Las pruebas dinámicas son: aceleración, sprint y endurance (SAE International, 2015).

El diseño del vehículo está básicamente ligado a la normativa expresada en el reglamento F-SAE (SAE International, 2015). Parte de este diseño es el sistema de suspensión que tienen como función absorber las irregularidades transmitidas por el terrero, garantizar la maniobrabilidad del vehículo y además contribuir a la estabilidad y el confort del conductor al reducir las vibraciones transmitidas (Caraguay & Caraguay, 2015). Por otra parte, el sistema de dirección cumple con las siguientes funciones: orientar las ruedas directrices haciendo que el conductor guíe el vehículo por la trayectoria deseada, evitar vibraciones para el conductor y proporcionar estabilidad (Beramendi Cabodevilla, 2013). Las manguetas son parte de la masa no suspendida del sistema de dirección (Cruz & Mesías, 2013). Sin embargo, las manguetas juegan un papel importante en el sistema de suspensión, ya que son una conexión entre los distintos elementos de este sistema. Además, también pueden ser consideradas como piezas críticas al ser cuerpos no suspendidos sometidos a cargas elevadas provocadas por condiciones de carretera, frenado y desplazamiento. La mayor criticidad ocurre cuando todas estas fuerzas actúan a la vez sobre este cuerpo (Pathri, 2012).

Cuando se piensa en un automóvil deportivo prevalecen aspectos como la velocidad, la capacidad de carrera y rendimiento. Para tener la velocidad máxima, y un mejor rendimiento del combustible el peso debe ser mínimo en los componentes del vehículo, esto sin que se vea afectada su capacidad para soportar esfuerzos (Pathri, 2012; Pozo & Mejia, 2015).

Una de las aplicaciones del algoritmo de optimización topológica es precisamente el reducir el peso de componentes mecánicos sin afectar su desempeño estructural, se han observado importantes aplicaciones en el diseño mecánico en las industrias aeronáutica, aeroespacial y últimamente en la industria automotriz (Jones, 2003); esto en parte debido a regulaciones medioambientales que promueven mejorar la eficiencia energética de los medios de transporte, así también otro factor influyente es la alta competitividad en el sector automotriz, la cual obliga a los fabricantes a reducir sus costos de producción y manufactura, en donde el costo de materia prima es un factor considerable. Estos factores hacen que la utilización de la técnica de optimización topológica sea la tendencia en la industria automotriz. (Saleem, Yuqing, & Yunqiao, 2008; Schumacher, 2013).

El algoritmo de optimización topológica se lo viene aplicando en conjunción con el método de elementos finitos, en programas computacionales de Ingeniería Asistida por computador (CAE); con ello se combinan procesos de análisis estructural y operacional junto al proceso de optimización, así se logra una alta productividad en el diseño de componentes mecánicos al reducir los tiempos de análisis y validación (Altair Engineering, Inc., 2015). La fabricación de este tipo de elementos en Maquinaria Controlada Numéricamente (CNC) permite que los ingenieros tengan mayor flexibilidad en el diseño generando un elemento más ligero y sin limitaciones de geometría (University of Liverpool Motorsport Society, 2012).

El presente estudio presenta el rediseño y posterior manufactura en CNC de las cuatro manguetas del vehículo F-SAE denominado "Bosco 1.0" de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca. El proceso

de rediseño se orientó a la reducción del peso de este componente sin afectar su desempeño estructural, adicionalmente el estudio permitió ajustar de mejor manera los demás elementos acoplados. Se debe tener presente que el diseño de las manguetas presentado está sujeto a la normativa del reglamento F-SAE (SAE International, 2015)

## MATERIALES Y MÉTODOS

### CONDICIONES DE CARGA

Como punto de partida se muestran las manguetas actuales del monoplace F-SAE Bosco 1.0, de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca (figura 1); las cuales han sido manufacturadas en chapa de acero ASTM A36.

La mangueta delantera tiene un peso de 1668 g y la posterior tiene un peso de 1911 g, el elevado peso de estos componentes están afectando la dinámica y el control del vehículo (Caraguay & Caraguay, 2015).



Figura 1. Manguetas originales del monoplace F-SAE

Para el rediseño de este componente en primer lugar se ha evaluado el material que mejores prestaciones tiene para este caso de estudio, se ha considerado la utilización de aluminio, este material resulta conveniente con respecto a otros en aspectos de factibilidad de mecanizado, costo, accesibilidad y peso. Para el primer diseño se utilizó acero con uniones no desmontables (Mejia, 2015) en donde no fue preponderante el criterio de peso. El material seleccionado es la aleación de aluminio 7075 T6 pues se adapta mejor al concepto de solución por peso y accesibilidad. Las propiedades del material se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades del material

Módulo de elasticidad	Coficiente de Poisson	Densidad	Velocidad de corte	Límite de fatiga	Referencia
E (MPa)	$\nu$	$\rho$ (t/mm <sup>3</sup> )	$V_c$ (m/min)	$S'_e$ (MPa)	
72000	0.33	2.80x10 <sup>-9</sup>	50	160a	(Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2013)

Para el cálculo de esfuerzos a los que se encuentran sometidos las manguetas es necesario considerar las acciones de frenado, aceleración y giro en el vehículo, en las que se presenta un incremento de cargas debido a la transferencia de masa; las cargas calculadas para las manguetas como parte de las condiciones de frenado, aceleración y giro en el vehículo, y la presión máxima ejercida por el rodamiento, se muestran en la Tabla 2 , y su esquema en la Figura 2.

**Tabla 2.** Magnitud de las cargas aplicadas sobre las manguetas

Carga	Mangueta delantera	Mangueta posterior
Transferencia de pesos en el frenado $F_o(N \cdot m)$	3048	3048
Momento en el frenado $M_a$	217.50	273.50
Transferencia de pesos lateral $H_o(N)$	3438	3438
Fuerza que genera el brazo de dirección $F_{yr}(N)$	256	N/A
Fuerza que genera al paso sobre un obstáculo $F_{neumáticos}(N)$	20 904	20 904
Presión máxima en el rodamiento $P_c(max)$ (MPa)	11.63	11.63

N/A: No aplica

En el proceso de diseño impulsado por CAE se analiza mediante elementos finitos el comportamiento de las manguetas sometida simultáneamente a los diferentes casos de carga, en este estudio los casos de carga han sido configurados considerando las cargas por frenado, aceleración, paso por obstáculo y paso por curva.

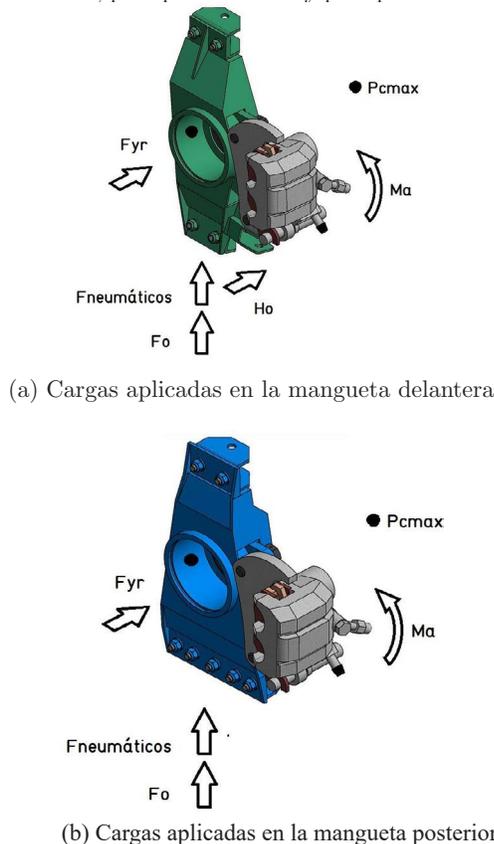


Figura 2. Esquema de cargas aplicadas sobre las manguetas.

Para diseñar componentes sometidos a cargas multiaxiales utilizando datos correspondientes a cargas axiales se hace uso de criterios de falla, los cuales nos dan un equivalente de un esfuerzo máximo ya sea normal o de cizalladura. Otro criterio de falla hace referencia a la energía del componente sometido a carga multiaxial (Gokhale, Deshpande, Bedekar, & Thite, 2008). En la Figura 3 se muestra las cargas aplicadas en las manguetas de acuerdo con los cálculos previamente realizados

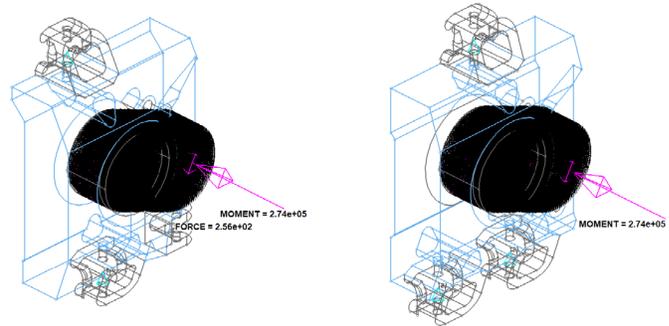


Figura 3. Cargas aplicadas en las manguetas: a) Mangueta delantera, b) mangueta posterior

### OBJETIVOS Y RESTRICCIONES DE DISEÑO

En el proceso de optimización topológica se deben considerar restricciones como la función objetivo, que en este caso es minimizar el compliance, el control del tamaño del miembro teniendo un valor mínimo de 2mm, restricción de fracción de volumen con un valor de 0.4, además restricciones de manufactura como la dirección de desmoldeo, la cual se consideró de tipo simple (Altair Engineering, Inc., 2015; Huang & Xie, 2010; HyperWorks Altair, n.d.), esta última es la más apropiada en desarrollo de piezas manufacturadas en centro de mecanizado de tres ejes lo que redonda en la más rápida y económica solución de fabricación.

En el proceso de optimización se ha considerado; el objetivo del proceso, el cual se ha definido para maximizar la rigidez de la estructura, en base a la respuesta fijada, la cual restringe el modelo a la utilización mínima del 40% de masa, las restricciones del diseño (dirección o plano de manufactura, tamaño mínimo de elementos, esfuerzo máximo permisible, así también se ha establecido la función objetivo, la cual controla el tamaño del miembro, compliance (Esta función evalúa la rigidez de un elemento; al minimizar la función de “compliance” se aumenta la rigidez de un elemento) y la fracción de volumen (Altair Engineering, Inc., 2015; Huang & Xie, 2010; HyperWorks Altair, n.d.).

El resumen del planteamiento de la optimización topológica se observa en la Tabla 3.

### DISCRETIZACIÓN DEL DOMINIO

Para iniciar el proceso de diseño utilizando el algoritmo de optimización topológica, se ha definido un modelo tridimensional que considera la geometría “bruta” de los componentes a diseñar; esto con el fin de que el programa computacional de análisis de elementos finitos pueda establecer con total libertad la geometría “óptima” para las solicitudes de cargas impuestas, en base a los objetivos y restricciones planteadas. La Figura 4 muestra los modelos que sirven de partida para el estudio.

Tabla 3. Planteamiento de la optimización topológica

Caso	Descripción
Variables de diseño	Densidad de cada uno de los elementos de la malla.
Respuestas	Fracción de volumen y Compliance
Objetivo	Minimizar compliance (Maximizar rigidez)
Restricciones	Fracción de volumen 0.4
	Tamaño mínimo de miembros 2mm Restricciones de manufactura (desmoldeo tipo single)
Cargas y condiciones de frontera	3 casos de carga combinados (curva + frenado + paso por obstáculo), se utilizaron restricciones tipo SPC (single point constraint) ubicadas en los puntos de unión con el varillaje de suspensión (rótulas).
Material	Aleación de aluminio 7075 T6 E= 72000 MPa ν=0.33 ρ = 2.80 x10 <sup>-9</sup> Ton/mm <sup>3</sup>

La malla de elementos ha sido generada con elementos tetraédricos, cuyo tamaño promedio es de 5mm, sin embargo, en las zonas en donde el gradiente de esfuerzos tiene relevancia se ha refinado la densidad de elementos, llegando a un tamaño promedio en estas zonas de 2mm, mostradas también en la parte derecha de la Figura 5.

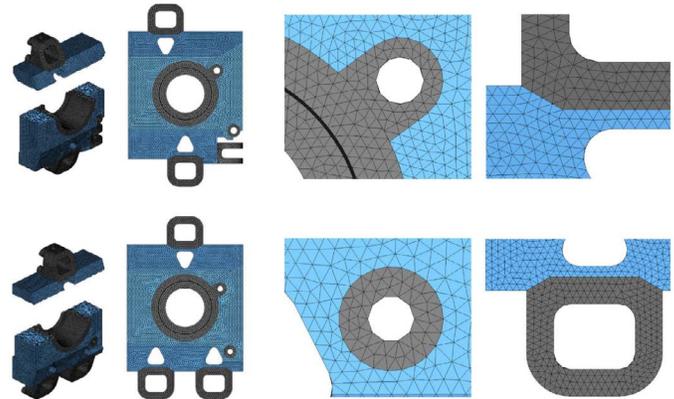


Figura 5. Áreas críticas de las manguetas (original a color)

### ANÁLISIS DE FATIGA

Con el fin de lograr las prestaciones mecánicas solicitadas para estos componentes se ha determinado la resistencia a la fatiga del material, para ello se han considerado los siguientes factores de ajuste. (Tabla 4)

Tabla 4. Factores que modifican el límite de fatiga

Límite de resistencia a la fatiga	Factor de acabado superficial (pulido)	Factor de tamaño (Indeterminado)	Factor de carga (Torsión)	Factor de temperatura	Factor de confiabilidad	Factor de efectos diversos
S' <sub>e</sub> (MPa)	k <sub>a</sub>	k <sub>b</sub>	k <sub>c</sub>	k <sub>d</sub>	k <sub>e</sub>	k <sub>f</sub>
160	1	1	0.59	1.01	0.897	1

Con los factores de ajuste considerados y a partir de la ecuación (1) (Budynas & Nisbett, 2012)., se determinó que la resistencia del material para fatiga (S<sub>e</sub>), es de 86 MPa

$$S_e = k_a \cdot k_b \cdot k_c \cdot k_d \cdot k_e \cdot k_f \cdot S'_e \quad (1)$$

En función a datos de la pista, propiedades del material y valores anteriormente obtenidos el número de ciclos calculados es de 2.67x10<sup>5</sup>, el número de vueltas que podrían presentarse en la longitud de competición es de 18, dando un número de zonas críticas probables de 200, lo que permitiría un total de 1330 veces que podría competir el vehículo sin presentar fallo a fatiga.

### RESULTADOS

#### RESULTADOS DE OPTIMIZACIÓN

Utilizando el módulo “OptiStruct” del programa HyperWorks® se ha realizado el proceso de diseño en base a la utilización del algoritmo de optimización topológica descrito anteriormente, con ello se ha logrado la concepción geométrica “óptima” de acuerdo a las cargas y las consideraciones del proceso, la Figura 6 muestra el resultado de la optimización, al digitalizar los resultados en un modelo geométrico CAD se ha concebido la propuesta de diseño de los componentes de estudio (Figura 7).

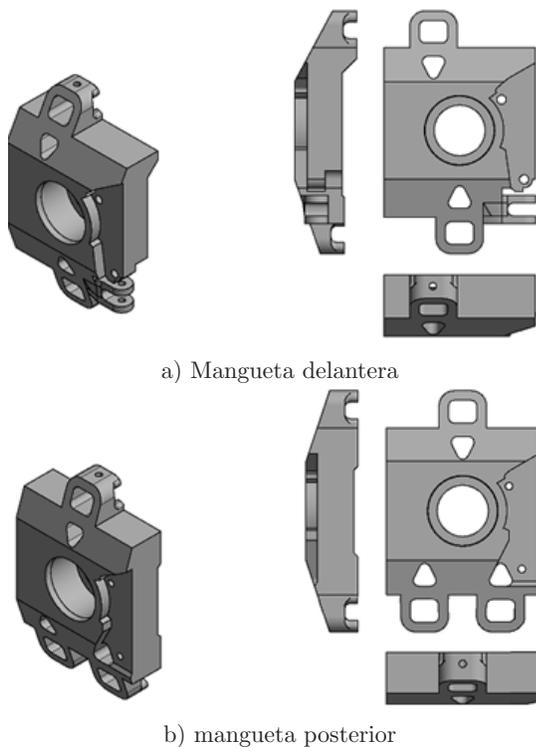


Figura 4. Modelos geométricos de partida para el análisis CAE

Una vez definido el modelo de estudio, es necesario dividirlo en zonas de diseño (Figura 5, color azul) y zonas de no diseño (Figura 5, color negro), así se definen las restricciones geométricas del componente, en este caso las zonas de no diseño son los orificios en donde se acoplará la tirantería de dirección, puntos de apoyo de los componentes con el bastidor y el centro del rodamiento.

La discretización del componente en elementos finitos de igual forma se realizó en dos colectores, uno para los elementos dentro de la zona de diseño y otro para los elementos de la zona de no diseño. La

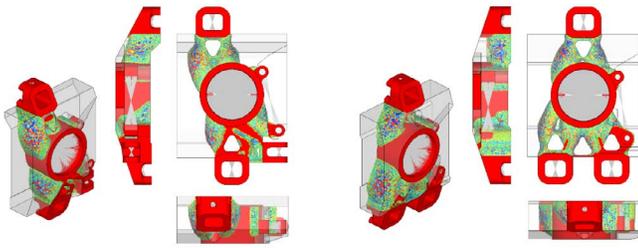


Figura 6. Resultados obtenidos por parte de OptiStruct (original a color). A la izquierda la mangueta delantera, a la derecha la mangueta posterior

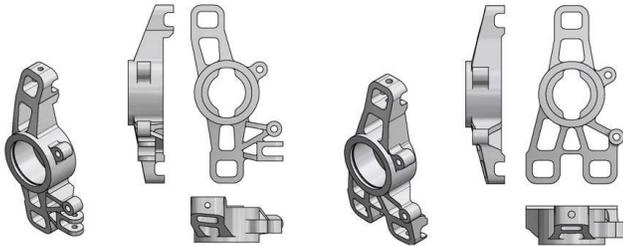


Figura 7. Modelado en CAD en base a los resultados de optimización, a la izquierda la mangueta delantera, a la derecha la mangueta posterior

Una vez que las nuevas manguetas fueron modeladas por un proceso CAD, luego de la optimización, estas fueron analizadas para cada caso de carga estipulado, con el objetivo de conocer si el nuevo diseño satisface las solicitudes impuestas. La magnitud del esfuerzo admisible ( $S_e$ ) es de 160 MPa y de acuerdo con la figura 8, la magnitud del esfuerzo admisible de Von Mises máximo se da en el caso de carga denominado “frenado” y equivale a 120 MPa y 93 MPa para las manguetas delantera y posterior respectivamente. Con esto se determina que para la mangueta delantera el factor de seguridad conseguido es de 1.3 mientras que para la posterior 1.7 a vida finita con  $2.67 \times 10^5$  Ciclos. Considerando que un elemento tiene vida finita cuando el número de ciclos de falla de este excede el umbral de fatiga de amplitud constante [18], en un intervalo de ciclos comprendido entre  $N \times 10^3$  y  $N \times 10^6$ .

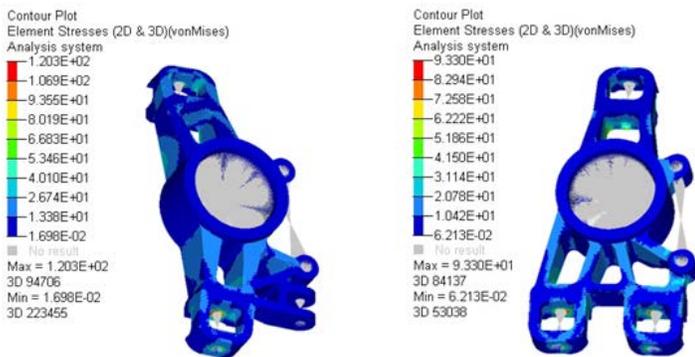


Figura 8. Resultados para el esfuerzo de Von Mises del nuevo diseño (original a color). A la izquierda la mangueta delantera, a la derecha la mangueta posterior

## MANUFACTURA DE LAS MANGUETAS

La manufactura se basa en el sistema CAD/CAM-CNC. En la parte de CAD las manguetas se definen mediante planos, la manufactura asistida por computador (CAM) se basa en el uso de computadores para manejar los equipos CNC. La herramienta de CAM utilizada para

este proceso es HSM Inventor®. El uso de esta herramienta mejora la calidad de diseño además de reducir el tiempo de desarrollo del producto (Autodesk, 2016). El proceso de manufactura se cierra con CNC, incorporado en Máquinas – Herramientas controladas numéricamente (MHNC), para centro de Mecanizado para tres ejes (X, Y, Z).

La responsabilidad de un ingeniero de procesos o de manufactura, generalmente es, por medio del CAM, conseguir programar la maquinaria utilizada en los procesos productivos, reduciendo los tiempos necesarios para el cambio de series.

Previo al mecanizado de las manguetas en aluminio, se maquinó en madera (caoba) el prototipo, este se muestra en la Figura 9.



Figura 9. Prototipo en madera (original a color)

Para el proceso de maquinado CNC de las manguetas en aluminio se utilizó un total de ocho herramientas y el proceso se realizó en un Centro de Mecanizado CNC. La sujeción de la materia prima se observa en la Figura 10.

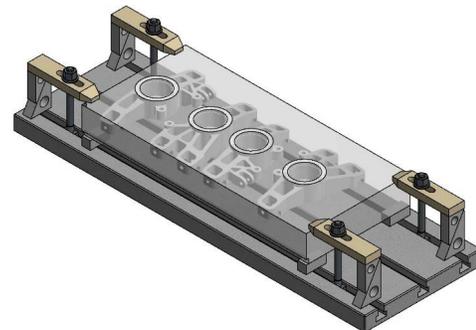


Figura 10. Modo de sujeción

Parte del proceso de mecanizado se muestra en la Figura 11.



Figura 11. Parte del proceso de mecanizado

Aparte del proceso de mecanizado en las máquinas CNC, se requirió el uso de máquinas convencionales para la generación de agujeros para los pernos de sujeción.

## PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Los nuevos diseños de las manguetas tienen un peso de 995 g y 972 g para la delantera y posterior respectivamente. En la Figura 12 se observa el nuevo diseño de las manguetas, mientras que en la Tabla 5 se indica una comparación de pesos entre las manguetas del diseño previo y las actuales



Figura 12. Manguetas en aluminio

Tabla 5. Tabla comparativa pesos de las manguetas

Mangueta	Peso diseño previo	Peso diseño actual	Reducción en peso
	(g)	(g)	(%)
Delantera	1668	995	40
Posterior	1911	972	49

En las pruebas de montaje de las manguetas en el vehículo se comprobó que el diseño realizado cumplía con las características geométricas para el ensamble. Esto se había realizado previamente con las manguetas prototipo de madera anteriormente. El montaje de los nuevos elementos se presenta en la Figura 13.



a) Mangueta delantera

b) Mangueta posterior

Figura 13. Montaje de las manguetas de aluminio

Una vez que las manguetas fueron montadas en el vehículo, este entró en funcionamiento, poniendo en acción los tres casos de carga, donde se comprobó el correcto funcionamiento de este como se observa en la Figura 14.



Figura 14. Pruebas en el vehículo

## CONCLUSIONES

La utilización de técnicas de optimización topológica se presenta como una alternativa válida para la concepción geométrica de elementos mecánicos, y su utilización presenta importantes ventajas; como: mayor competitividad al disminuir costos asociados a la materia prima utilizada; mejora en la eficiencia energética de vehículos automóviles, al reducir el peso de componentes sin comprometer sus prestaciones mecánicas; entre otros. En este estudio se consiguió una reducción de peso de alrededor del 40%, en las manguetas concebidas, en comparación con el diseño original. El diseño de las manguetas delanteras y posteriores para el monoplace de competición FSAE presentado en este estudio consideró vida infinita a fatiga, y se obtuvieron factores de seguridad de 1.3 y 1.7, respectivamente. Vale la pena mencionar además que estos elementos vienen desempeñándose de forma exitosa durante las diferentes competencias en las que ha participado.

Para garantizar la idoneidad del diseño concebido a través de procesos de optimización topológica estructural es indispensable caracterizar correctamente las cargas y licitudes a las que estará expuesto el componente en cuestión, en el caso del diseño de las manguetas presentado en este estudio fue necesario analizar diferentes escenarios o condiciones de carga, como lo son: cargas estáticas, cargas por aceleración, frenado, curva y las que se transmiten al atravesar un obstáculo; así también se consideró la carga que genera el acople a presión del rodamiento de rueda; el análisis de escenarios de falla, junto con el análisis de la literatura relacionada, garantizan la correcta caracterización de las cargas que soportan los componentes mecánicos.

El proceso de diseño del producto presentado en este estudio incorpora la utilización de técnicas CAD, CAE y CAM, explotándose al máximo su potencial; demostrándose que existen los medios tecnológicos, así como el conocimiento necesario para mejorar la productividad de la industria nacional; por otro lado, es necesario impulsar proyectos de investigación – innovación en estrecha cooperación entre universidades, centros de investigación, e industrias, para lograr este fin. El presente proyecto se desarrolló en cooperación entre la Universidad del Azuay, y la Universidad Politécnica Salesiana, en la ciudad de Cuenca.

## REFERENCIAS

- [1] Altair Engineering, Inc. (2015). *Practical Aspects of Structural Optimization, A Study Guide*.
- [2] Autodesk. (2016). *The Integrated CAM Solution for Autodesk Inventor*.
- [3] Beer, F. P., Johnston, E. R., Dewolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2013). *Mecánica de materiales*. McGraw Hill/Interamericana Editores.
- [4] Beramendi Cabodevilla, J. (2013). *Diseño de un sistema de dirección para un fórmula S.A.E*. Universidad Pública de Navarra.
- [5] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley* (9a. ed.).
- [6] Caraguay, C., & Caraguay, S. (2015). *Diseño y construcción del sistema de suspensión de un vehículo monoplaza para la competencia Formula Student*. Universidad Politécnica Salesiana.
- [7] Cruz, G., & Mesías, D. (2013). *Diseño, construcción e implementación de sistemas de suspensión, dirección y frenos del vehículo de competencia fórmula SAE 2012*. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- [8] Gokhale, N. S., Deshpande, S. S., Bedekar, S. V., & Thite, A. N. (2008). *Practical Finite Element Analysis*. Finite To Infinite.
- [9] Huang, X., & Xie, Y. M. (2010). *Evolutionary topology optimization of continuum structures with an additional displacement constraint*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 40(1–6), 409. <https://doi.org/10.1007/s00158-009-0382-4>
- [10] HyperWorks Altair. (n.d.). *Hyperworks Tutorial July 2010 Topology Optimisation of car frame*.
- [11] Jones, D. R. (2003). Optimization in the Automotive Industry. In *Optimization and Industry: New Frontiers* (pp. 39–58). Springer, Boston, MA.
- [12] Mejia, D. (2015). *Diseño de manguetas delanteras y posteriores de un vehículo monoplaza para la competición en la formula SAE*. Universidad Politécnica Salesiana.
- [13] Pathri, B. P. (2012). Design Optimization of Formula One Student Sports Car Upright Using Hypermesh. *International Journal of Mechanical and Industrial Engineering*, 2, 54–59.
- [14] Pozo, J., & Mejia, D. (2015). *Propuesta de diseño de las manguetas para un vehículo de competición en Fórmula SAE*. Universidad Politécnica Salesiana.
- [15] SAE International. 2015 *Formula SAE® Rules* (2015).
- [16] Saleem, W., Yuqing, F., & Yunqiao, W. (2008). Application of Topology Optimization and Manufacturing Simulations-A new trend in design of Aircraft components. In *Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (Vol. 2)*. Citeseer.
- [17] Schumacher, A. (2013). *Optimierung mechanischer Strukturen: Grundlagen und industrielle Anwendungen* (2nd ed.). Springer Vieweg.
- [18] *University of Liverpool Motorsport Society*. (2012). University of Liverpool Motorsport Formula Student Team.

## DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN TAXIS DE CUENCA UTILIZANDO VEHÍCULOS HÍBRIDOS.

### (DETERMINATION OF THE FUEL CONSUMPTION VARIATION IN TAXIS OF CUENCA USING HYBRID VEHICLES)

Saldaña, Xavier <sup>1</sup>; Astudillo, Christian <sup>2</sup>; Torres, Francisco <sup>3</sup>

<sup>1</sup>. Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador

Autor de correspondencia: xavierasc22@hotmail.com

#### **RESUMEN**

En el presente estudio se evalúa la demanda de combustible de los vehículos híbridos en relación a taxis convencionales, se analizan normativas locales y catálogos automotrices para determinar valores de consumo, se define la exactitud de las mediciones mediante métodos de validación física para ejecutar pruebas de consumo y determinar coeficientes de arrastre mediante las normas SAE J1321 y SAE J2264 respectivamente. Se utilizó un dispositivo electrónico de medición de combustible conectado al ECU mientras el vehículo sigue un ciclo de conducción para taxis simulado sobre un dinamómetro, finalmente se comparan consumos de los casos determinados corroborando la existencia de ahorro correspondiente al 22% teniendo en cuenta el precio actual de la gasolina extra y el recorrido diario promedio que efectúa un taxi.

*Palabras clave: Ciclos; coast down; consumo; taxis; híbridos.*

#### **ABSTRACT**

The present study evaluated the fuel demand of Hybrid vehicles compared to conventional taxis. Local regulations and automotive catalogs were analyzed to determine the consumption values. The accuracy of the measurements was defined through physical validation methods that executed consumption test and determined drag coefficients based on SAE J1321 and SAE J2264 standards

An electronic fuel measurement device connected to the ECU was used while the vehicle followed a simulated driving cycle for taxis on a dynamometer. Finally, the consumption values of the determined cases were compared, corroborating the existence of savings corresponding to 22% taking into account the current price of extra gasoline and the average daily journey made by a taxi.

*Keywords: Cycles; coast down test; consumption test, taxis, hybrid.*

## INTRODUCCIÓN

Se realiza un estudio para analizar la factibilidad en el tema de consumo de combustible que tiene la introducción de vehículos híbridos como taxis en la ciudad de Cuenca, para esto se realiza una comparativa mediante pruebas entre el vehículo híbrido y el modelo de taxi que mayor número de unidades presenta en la ciudad. Se medirá el consumo de combustible haciendo uso de un dinamómetro de chasis y se realizará las pruebas bajo un mismo ciclo de conducción representativo para taxis de la ciudad para proponer la mejor tecnología, en lo que se refiere a consumo de combustible.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### TIPOS DE VEHÍCULO

Se realiza la selección del modelo de vehículo híbrido que esté presente en el parque automotor local y el taxi convencional con mayor número de unidades en funcionamiento para efectuar el estudio.

#### Hyundai Sonata

Según el departamento de energía de Estados Unidos, el vehículo que se muestra en la Figura 1 tiene un consumo teórico de 6.35 lt/100km con un motor de 2.4 litros y se considera para el estudio debido a que se comercializa en la ciudad.<sup>1</sup>



Figura 1. Hyundai Sonata Híbrido.

#### Definición del número de taxis que circulan en la ciudad de Cuenca, según la marca del fabricante.

Debido a que se necesita escoger la marca y modelo que mayor número de unidades presente en la ciudad se analiza el parque automotor correspondiente a los taxis, se realizó la investigación del reparto de taxis en la que llega a la conclusión que la marca Hyundai lidera con 1664 taxis circulando en la ciudad de Cuenca, siendo la que mayor porcentaje presenta en la actualidad. El modelo más utilizado como se muestra en la Figura 2 es el "Accent" con 1239 unidades <sup>2</sup>.

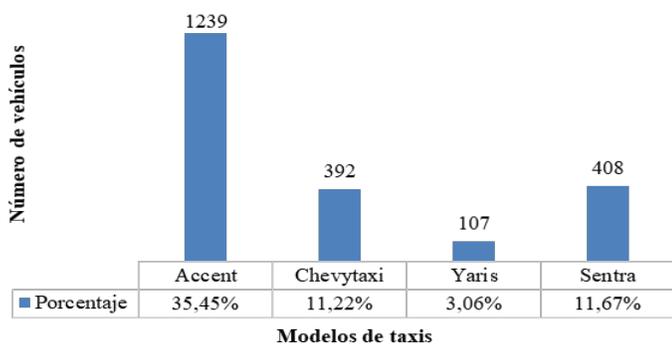


Figura 2. Cuatro modelos de taxis más utilizados de Cuenca

El modelo de taxi que se presenta en mayor número es el Accent del año 2005 con una cilindrada de 1600cc con 156 unidades que se muestra en la Figura 3, por lo que se utilizará para las pruebas de consumo y su comparación con el vehículo híbrido.



Figura 3. Hyundai Accent.

### CICLO DE CONDUCCIÓN MEDIANO.

Tiene una duración de 600 segundos, un recorrido de 4.05 km, una velocidad promedio de 54.2 km/h y una velocidad máxima de 60 km/h como se muestra en la Figura 4.

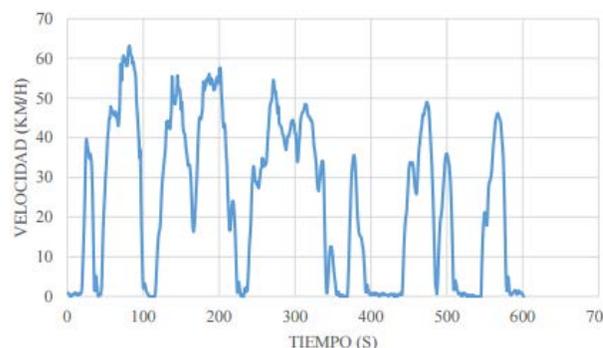


Figura 4. Ciclo de conducción mediano. Fuente: <sup>3</sup>

El ciclo de conducción que se ha escogido para la ejecución de las pruebas es el que comprende la práctica de carreras medianas, ya que es el que mayor representación tiene para la ciudad debido a que está comprendido por un rango intermedio de valores entre ciclos largos y cortos y además abarca un radio de 4.05 km que comprende la mayor parte del casco urbano de la ciudad de Cuenca.

### DINAMÓMETRO DE CHASÍS

Se utilizó un dinamómetro de chasis AutoDyn 30 del fabricante SuperFlow que se muestra en la Figura 5, este equipo mide la fuerza y potencia que el motor del vehículo entrega para posteriormente obtener un gráfico de la potencia y torque del motor en función de las rpm y la velocidad de giro. Cuenta con una función de simulación de ciclos de conducción que se pueden cargar al software del dinamómetro de chasis para poder simular una forma definida de conducir.<sup>4</sup>



Figura 5. Dinamómetro de Chasis AutoDyn 30.

Fuente: <http://www.superflow.com/aspx>

## HERRAMIENTA DE INTERFAZ ELM327 MINI BLUETOOTH V2.1

Herramienta para el diagnóstico del motor mediante conexión OBD2-Bluetooth con las siguientes características:

- Conexión inalámbrica (Bluetooth)
- Software incluido para Android, Windows e IOS
- Funcionamiento mediante normativa ISO 9141, KWP2000
- Compatible con SAE J1850 y CAN bus
- Brinda valores instantáneos con frecuencia de 1Hz para sensores tales como: RPM del motor, temperatura del refrigeración, estado del sistema de combustible, velocidad del vehículo, consumo de combustible, presión del múltiple entradas, avance de tiempo, temperatura del aire, flujo de aire, posición de acelerador, estado del sistema de carburador, presión de carburante.<sup>5</sup>

### SOFTWARE “TORQUE” PARA ANDROID

Aplicación para sistemas operativos Android, utiliza el enlace Bluetooth para conectarse al equipo ELM327 conectado al vehículo con la finalidad de exportar datos y códigos de diagnóstico en tiempo real proporcionados por la ECU del motor.

### DEFINICIÓN DEL NÚMERO DE TAXIS Y NÚMERO DE PRUEBAS.

#### Cálculo de tamaño de la muestra conociendo el tamaño de la población.

Para la obtención del número de vehículos en los que se debe realizar las pruebas es necesario tener en cuenta: el tamaño de la población que en este caso es 156 unidades, un nivel de confianza que indique la probabilidad de que los resultados de la investigación se ajusten a la realidad, para estudios de ingeniería se recomienda el valor de 1,96 equivalente a un nivel de confianza de 95%, el margen de error deseado de la muestra al que se le asigna el valor de 0,05 (5%) que es el permitido para que los resultados tengan la validez necesaria, la proporción de individuos que poseen en la población características de estudio, debido a que los vehículos son de características similares (marca, año y modelo) se tomará un valor de 0,999 y la proporción de individuos que no poseen características similares, este dato generalmente se lo calcula mediante la fórmula: 1-p por lo que se le asigna un valor de 0,001. Se utiliza la ecuación para estadística tamaño de la muestra:

$$n = \frac{Z^2 N(p.q)}{[E^2(N - 1)] + [Z^2(p.q)]}$$

Ecuación 1: Tamaño de la muestra

- N: Tamaño total de la población
- Z: Es el nivel de confianza
- E: Margen de error
- p: Proporción de unidades que poseen en la población características de estudio.
- q: Proporción de unidades que no poseen características similares.

$$\begin{aligned} n &= \frac{1.96^2(156)(0.999 \times 0.001)}{[0.05^2(156 - 1)] + [1.96^2(0.999 \times 0.001)]} \\ &= \frac{0.59}{0.39} \\ &= 1.52 \gg 2 \end{aligned}$$

La ejecución de pruebas se realizará en 2 vehículos Hyundai Accent del año 2005.

### CÁLCULO DEL NÚMERO DE PRUEBAS MEDIANTE EL MÉTODO ESTADÍSTICO DE “CÁLCULO DE NÚMERO DE OBSERVACIONES (TAMAÑO MUESTRAL)”

El método estadístico garantiza un nivel de confianza del 95,45% y un margen de error de  $\pm 5\%$  <sup>6</sup> por lo que requiere un número de pruebas preliminares para establecer la cantidad final de pruebas a realizar mediante la siguiente ecuación:

$$n = \left( \frac{40 \sqrt{n' \sum x^2 - \sum (x)^2}}{\sum x} \right)^2$$

Ecuación 2: Número de observaciones

- n = Tamaño de la muestra (cantidad final de pruebas a realizar).
- n' = Número de pruebas del estudio preliminar.
- x = Valor de las pruebas preliminares.
- 40 = Constante para un nivel de confianza de 95,45%

Se realizan 9 pruebas preliminares de consumo de combustible para establecer la cantidad final de pruebas a realizar (n) que se muestran en la Tabla 1. Mediante los datos de consumo de combustible obtenidos en las pruebas preliminares se establece 5 pruebas a realizar para el presente estudio.

Tabla 1. Pruebas preliminares.

n'	X	x <sup>2</sup>
	[lt]	
1	0,27	0,0729
2	0,24	0,0576
3	0,23	0,0529
4	0,24	0,0576
5	0,25	0,0625
6	0,25	0,0625
7	0,24	0,0576
8	0,23	0,0529
9	0,26	0,0676
Σ	2,39	0.5765
n = 4,19 ≈ 5		

Elaborado por: Autores

### NORMATIVA APLICADA

Para determinar el consumo de combustible de los vehículos para este estudio, la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), ha elaborado manuales de prácticas recomendadas como: SAE J1321 que describe un procedimiento de prueba de consumo de combustible y la SAE J2264 que trata la simulación de un ciclo en el dinamómetro del chasis y la carga de la carretera usando técnicas de coast down.

## RESULTADOS

### COMPARACIÓN DE CONSUMOS CALCULADOS ENTRE HYUNDAI SONATA HÍBRIDO Y HYUNDAI ACCENT.

Se realiza la comparación del gasto de combustible entre el taxi más usado en la ciudad de Cuenca y un vehículo con tecnología híbrida siguiendo un ciclo representativo para taxis en un dinamómetro de chasis tomando en cuenta las circunstancias de la localidad, consiguiendo valores similares a los proporcionados por el departamento de energía de Estados Unidos que prueba los autos haciéndolos pasar por una serie de rutinas, también llamadas ciclos o programas que especifican la velocidad del auto en cada punto durante el tiempo de la prueba de laboratorio, a partir de los modelos 2008, se usan tres pruebas adicionales que ajustan los estimados de ciudad y carretera tomando en cuenta velocidades más altas, uso de aire acondicionado, y temperaturas más bajas<sup>7</sup>. En la Figura 6 se muestra la comparación de los vehículos evaluados siendo Hyundai Sonata el que menor cantidad de consumo genera con un 22% menos que el promedio de los Hyundai Accent.

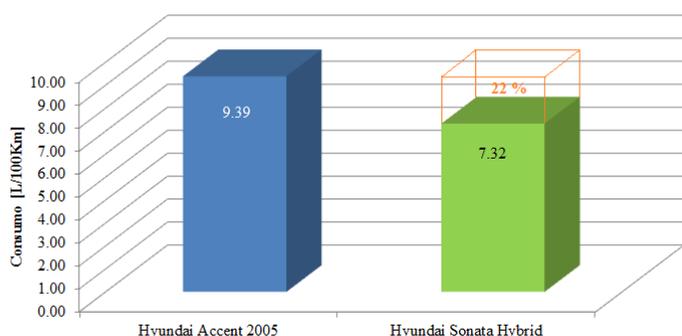


Figura 6. Consumo del Accent y del Sonata Híbrido.

En la Figura 7, se realiza la estimación monetaria diaria, mensual y anual que genera el vehículo Sonata y Accent, teniendo en cuenta el precio actual de la gasolina extra hasta la fecha de publicación de este estudio es de 0.34 USD/lit y el recorrido diario promedio que efectúa un taxi.

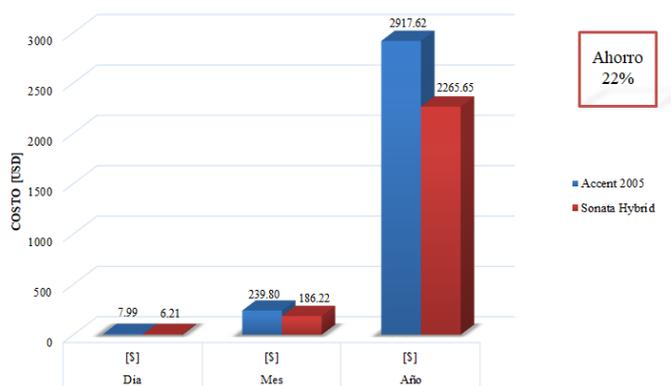


Figura 7. Costo que genera el consumo de los vehículos Accent y Sonata.

## DISCUSIÓN

Estudios tales como “La propuesta de implementación de taxis híbridos a gasolina y eléctricos en Cuenca”<sup>8</sup> y “La determinación de ventajas ambientales que presenta un vehículo híbrido respecto a un

vehículo normal de similares características” (Toledo & García, 2012). Que se han realizado con el fin de evaluar el consumo energético y evaluación ambiental de taxis en la ciudad de Cuenca. Indican que una vía factible para mitigar o reducir dicho consumo es la introducción de vehículos híbridos de servicio de transporte público, se corrobora esta afirmación debido a que el vehículo Hyundai Sonata genera un ahorro de combustible en un porcentaje de 22% en comparación con el taxi convencional que en mayor número se presenta en la ciudad.

## CONCLUSIONES

Se determinó la metodología para hallar el tipo de vehículo híbrido y convencional que sea el más idóneo o más utilizado para el servicio de taxis en la ciudad de Cuenca mediante la aplicación de una evaluación basada en el reglamento interno que se debe cumplir para que un vehículo pueda desempeñarse como taxi en la ciudad. Cabe recalcar que el crecimiento del parque automotor correspondiente a los taxis varía con el tiempo por lo que se deberían actualizar las bases de datos frecuentemente.

Se definió la metodología para medición de consumo de combustible haciendo uso del dispositivo ELM327 mini Bluetooth V2.1 que reduce el tiempo de preparación para realizar las pruebas comparado con otros de mayor costo, como es la conexión de un flujómetro, por lo que se hizo un proceso de validación física para poder utilizar este dispositivo, demostrando que proporciona valores con un margen de error aceptable con un coeficiente de determinación de 0.98.

Se determinó la demanda de combustible en taxis de la ciudad de Cuenca tomando en cuenta las recomendaciones de la normativa SAE J1321 que describe un procedimiento de prueba de consumo de combustible, dando como resultado que el vehículo híbrido tiene un consumo calculado de 7.32 lt/100km, y el consumo promedio calculado del Accent es 9.39lt/100km, siendo el Sonata Híbrido el que menor consumo de combustible genera ahorrando un 22% con respecto al vehículo con motor convencional que mayor cantidad de unidades presenta en la localidad.

Se determinó que el vehículo Hyundai Sonata Híbrido genera un ahorro de 22% comparado con el Hyundai Accent, lo cual representa un gasto por parte del Accent de 1,78 \$ diario y 652 \$ al año, si se renovarían todos los taxis Accent por Sonata Híbridos se ahorraría 807.800 \$ al año.

## RECOMENDACIONES

Es importante proponer esta iniciativa de implementación de vehículos híbridos como taxis debido a las ventajas que tiene el utilizar un vehículo híbrido en la ciudad.

Es conveniente que las casas comerciales de automóviles trabajen en conjunto con entidades dedicadas al transporte público para establecer una alternativa que genere menor consumo, con esto minimizando el gasto económico que realizan los taxis y para la contribución al bienestar del medio ambiente.

Se recomienda instruir técnicas o formas eficientes de conducción a los taxistas profesionales con el objetivo de generar mayor ahorro de combustible y lo que representaría una ayuda para la conservación del medio ambiente.

## REFERENCIAS

1. U.S. Departamento de Energía. *Consumo de combustible Sonata* [En línea]. [fecha de consulta: 9 de Noviembre, 2018]. Disponible en: <https://www.fueleconomy.gov/feg/Find.do?action=sbs&lang=es&id=35193>.
2. Cedillo, Andrés. *Análisis de las condiciones de operación de los taxis de la ciudad de Cuenca para la implementación del sistema Start-Stop*. (Trabajo de titulación). (Pregrado) Universidad del Azuay, Cuenca, 2015.
3. Dávalos, Daniel. *Obtención de un ciclo de conducción para los vehículos de la unión de taxistas del Azuay*. (Trabajo de titulación). (Maestría) Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador. 2017.
4. Power test industries. *SuperFlow Dynamometers & Flowbenches* | Des Moines, Iowa [En línea]. [fecha de consulta: 9 de Noviembre 2018]. Disponible en: <https://www.superflow.com/>.
5. *Elm327 bluetooth OBD II user manual for computer*. [En línea]. [fecha de consulta: 9 de Noviembre, 2018]. Disponible en: <https://static.seicane.com/media/installation/0/SC01/Seicane-SC01-OBDII-User-Instruction.pdf>.
6. Salazar, B. *Cálculo del Número de Observaciones - Ingeniería Industrial* [En línea]. [fecha de consulta: Octubre 23, 2017]. Disponible en: <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/estudio-de-tiempos/c%C3%A1culo-del-n%C3%BAmero-de-observaciones/>
7. Departamento de Energia de los Estados Unidos. *Información detallada para pruebas de consumo* [En línea]. [Fecha de consulta: 9 de Noviembre 2018]. [https://www.fueleconomy.gov/feg/esfe\\_test\\_schedules.shtml](https://www.fueleconomy.gov/feg/esfe_test_schedules.shtml). Publicado 2017. Acceso.
8. Coello, Mateo. *Propuesta de implementación de taxis híbridos a gasolina y eléctricos en Cuenca*. (Trabajo de titulación). (Maestría), Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador 2013.
9. Cajamarca, Diego, & Garcia, Vladimir. *Determinación de las ventajas ambientales que presenta un vehículo híbrido respecto a un vehículo normal de similares características*. (Trabajo de titulación). (Pregrado), Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. 2012.

## ANÁLISIS DE LA FUNCIONALIDAD DEL FILTRO DE AIRE DE UN VEHÍCULO LIVIANO DENTRO DEL PERÍODO DE MANTENIBILIDAD

Antamba Guasgua, Jaime <sup>1</sup>; Reyes Campaña, Gorky <sup>1</sup>; Pachacama, David <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador

Autor de correspondencia: jaantambagu@uide.edu.ec

### **RESUMEN**

El estudio surge de la necesidad de precautelar la vida útil del motor de los vehículos durante los periodos de mantenibilidad recomendados por el fabricante. El objetivo es comparar la funcionalidad de los filtros de aire de repuesto original y repuesto alterno en un vehículo liviano en condiciones operativas similares, dentro del periodo de mantenibilidad establecido por el fabricante, bajo una ruta de prueba establecida en los periodos de mantenimiento de 5000, 10000, y 15000 kilómetros determinados por el fabricante. El primer ensayo que se realizará consiste en recortar un pedazo del material filtrante y observar bajo un microscopio de manera de establecer el porcentaje de eficiencia de filtrado, en el segundo ensayo se medirá experimentalmente la cantidad de luxes que pasa a través del material filtrante similar a una prueba de mancha. Los resultados obtenidos marcan una diferencia entre el filtro de aire original y alterno. La respuesta del filtro original mantiene su funcionalidad dentro del periodo de mantenibilidad establecido.

*Palabras clave: RDE, análisis visual, comparación microscópica, eficiencia de filtrado.*

### **ABSTRACT**

The research arises from the need to safeguard the useful life of vehicles by performing maintenance. The particular case of the air filter, the type of filter paper used is not taken into account. Therefore, it will be determined if the alternate and original filters comply with the useful life established by the manufacturer. To do this, light passage tests and a microscopic comparison were made to the filters, with predetermined times of 0, 5, 10 and 15 thousand kilometers. The tests carried out showed that both an original and an alternate filter work with the same efficiency from new up to five thousand kilometers, obtaining a difference of 1% in the passage of light with a margin of error of +/- 5%. Finally, after 15 thousand kilometers the filtering differences are extremely high since the alternating filter has an efficiency of 6% while the original filter is still at 24% complying with the specifications of the manufacturer to change the filter every fifteen thousand kilometers.

*Keywords: RDE, visual test, microscopical comparison, filtering efficiency.*

## INTRODUCCIÓN

En términos termodinámicos, una ciudad es un sistema abierto que demanda un gran flujo de entrada de energía y materiales, que no necesariamente se encuentran cerca de los límites del sistema. Según la Secretaría de Ambiente, se estima que en el Distrito Metropolitano de Quito alrededor del 92% del parque automotor liviano consume gasolina y el restante 8% funciona con diésel. “Las condiciones propias de la ciudad de Quito han contribuido a la dinámica de la degradación de la calidad de aire” (Movilidad urbana, consumo de energía y calidad del aire., 2013), la concentración promedio de contaminantes no ha superado lo establecido por la norma de calidad de aire ambiental (NCAA), por ello, el gobierno local ha tratado de implementar políticas vinculadas a la calidad de aire y la movilidad sostenible (Ambiente, 2018).

El sistema de admisión de aire de un vehículo, consta del filtro de aire, carcasa protectora y los conductos de admisión. La calidad del aire que ingresa al motor de un vehículo, a través del múltiple de admisión depende directamente de la capacidad del filtro en retener las impurezas, los fabricantes de vehículos recomiendan cambiar el filtro de aire a los 15000 kilómetros de recorrido del vehículo (Caterpillar), considerándose con el periodo de mantenibilidad apropiado para este elemento del vehículo, en cambio, los filtros de aire de marcas alternativas carecen de esta indicación, el tipo y características del material filtrante (papel), inciden en la duración dentro de un periodo de mantenibilidad. Una reducción aceptable de potencia vinculado al filtro de aire es del 2 - 3% (Research on the Air Filters' Maintenance for Diesel Engines, 2016).

El material filtrante puede ser constituido por fibra, fieltro, papel, tamiz, intersticial, sintético o carbón activado como lo indica norma INEN-ISO 11841-1, además los parámetros para clasificar los filtros son el tamaño, temperatura, presión, flujo y filtración, de este último se considera tamaño de poro, tamaño medio de los poros, eficiencia de filtración (instantánea, fraccionada y acumulada) valor, duración del filtro, capacidad de los contaminantes y capacidad aparente (INEN, INEN-ISO 11841-2, 2014). Los filtros de aire para vehículos son de papel y tienen un tamaño de poro de 2 a 5 micrones (Bavaresco, 2018).

Este estudio tiene por objetivo comparar la funcionalidad de los filtros de aire de repuesto original y repuesto alterno en un vehículo liviano en condiciones operativas similares, dentro del periodo de mantenibilidad establecido por el fabricante. En condiciones operativas, el polvo y la suciedad se convierten en enemigos del motor de un vehículo.

## METODOLOGÍA

### LÍNEA BASE

Para la investigación experimental, es necesario establecer una línea base del vehículo de pruebas, para ello, se requiere un proceso de mantenimiento preventivo y correctivo de los componentes del motor, y una medición de emisiones de gases contaminantes en estado estático, según la norma RTE INEN 2203.

### PROCESO DE INVESTIGACIÓN

El estudio experimental, se divide en dos secciones: el recorrido del vehículo y el análisis del filtro de aire dentro del periodo de mantenibilidad definido por el fabricante en quince mil kilómetros, en intervalos de 5000, 10 000, 15 000. Se consideró un intervalo adicional para alcanzar los 20 000 km. El recorrido del vehículo se efectúa basado en el ciclo de conducción real (normativa europea

vigente), establecido para comprobación de homologación en condiciones de manejo real, este ciclo es de 100 kilómetros, dividido en: 25 kilómetros de recorrido urbano, 39 kilómetros de recorrido de carretera y 31 kilómetros de autopista. Se efectuaron 4 recorridos diarios.

Para el análisis de del filtro de aire, se empleó un filtro de repuesto original y repuesto alterno, con comprobación microscópica del filtro de aire automotriz y una prueba de paso de luz (prueba de mancha), en cada intervalo de 5000 kilómetros. Se compró un lote de 4 filtros de aire repuesto original y 4 de repuesto alterno. Para la comprobación microscópica se utilizó un el microscopio Olympus CX3, con sobresaliente reputación mundial de los microscopios en las áreas de educación e investigación, produciendo imágenes claras y nítidas hasta el mismo borde del campo visual de 4x, 10x, 40x, 100x. El aumento idóneo para este estudio es de 40X.

El vehículo considerado para las pruebas con filtros de aire tanto original como alterno fue un Chevrolet Grand Vitara, año 2007, cilindrada 1600 cc, 16 válvulas. Este vehículo fue elegido por dos razones: la primera fue por la versatilidad para circular por caminos de primer y segundo orden de la ciudad de Quito y la segunda ya que la marca Chevrolet es una de las más vendidas en el Ecuador, según la AEADE, con un 44.25% en el 2016 y está en el tercer puesto en su modelo. El vehículo cumple con los requerimientos de emisiones de la norma RTE INEN 2203.

La normativa ISO 16890 establece un procedimiento de ensayo y clasificación, de manera que la eficiencia del filtro se mide desde 0,3 hasta 10 m en el filtro limpio (ISO, 2016), un filtro de aire de motor de calidad debe eliminar partículas de 3 micras de tamaño con una eficiencia de 99.9% y partículas de 1 micrón de tamaño también deben eliminarse en muchos casos con una eficiencia de 98.5% (GmbH). En la tabla 1 se indica las características técnicas de los filtros original y alterno que se utilizó.

Tabla 1. Ficha técnica filtros de aire

Aplicación	Filtros de aire (alterno)	Filtros de aire (original)
Sistema de resina	Celulosa	Celulosa
Especificación No.	FL-7202	FL-7202
Propiedades	<b>Valores</b>	
Gramaje (g/m <sup>2</sup> )	115+/-5	123+/-5
Espesor (µm)	0,38+/-0,05	0,45+/-0,05
Medida máxima del poro (µm)	<89	<95
Promedio de la medida del poro (µm)	77	85
Corrugación (µm)	>0,22	>0,22

Elaborado por: Autor

Fuente:DELCO

El filtro de aire se dividió en cuatro partes iguales con medidas de 11 cm de largo por 7,5 cm de ancho, como se indica en la figura 1, seleccionando la muestra del lado inferior derecho del papel filtrante ya que en dicha área el aire aspirado desde el exterior ingresa en mayor proporción debido a que la toma de aire se encuentra en este punto.

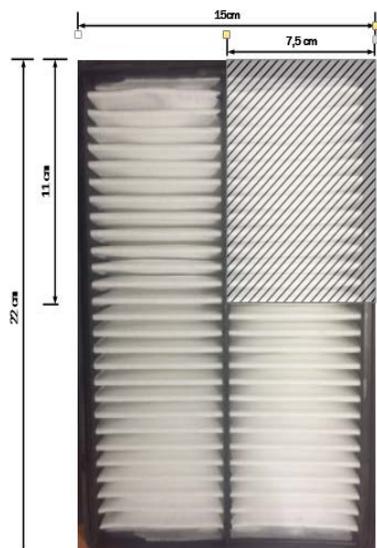


Figura 1. Sección de filtro analizado.

Esta investigación emplea filtros secos de paneles, con un material de celulosa y sintético, el cual tiene un rendimiento volumétrico de 52%, una velocidad de aire entre 0,1 – 1 m/s. Los filtros de aire son plisados esto significa que tiene pliegues horizontales para atrapar y retener un mayor número de bacterias. Así también, suelen tener una profundidad entre dos y cinco centímetros. Los tejidos de los filtros plisados ofrecen una mejor captura de partículas, así como una mayor cantidad de espacio en la superficie para empujar el aire contaminado (Caterpillar).

## RESULTADOS

### PRUEBA DE PASO DE LUZ

Las pruebas de paso de luz, se efectuó con una fuente de luz de incidencia de 30 000 luxes sobre el área del papel filtrante. Los datos medidos se indican en la tabla 2, donde se muestra la medición de lúmenes al pasar el papel filtrante y relación porcentual, tanto para el repuesto original como alternativo de acuerdo con el kilometraje recorrido.

Tabla 2. Medición de paso de luz

Kilometraje	Original		Alternativo	
	LUX	%	LUX	%
0	25141	83	24219	81
5000	21374	71	20997	70
10000	11502	38	8596	29
15000	7131	24	1724	6
20000	685	2	100	0,3

Elaborado por: Autor

Al iniciar la prueba en el filtro original a cero kilómetros recorridos existe un 83% de paso de luz mientras que a los quince mil kilómetros el porcentaje es de 24% dando una diferencia del 59% entre pruebas, mientras que en el filtro alternativo la diferencia es del 75%.

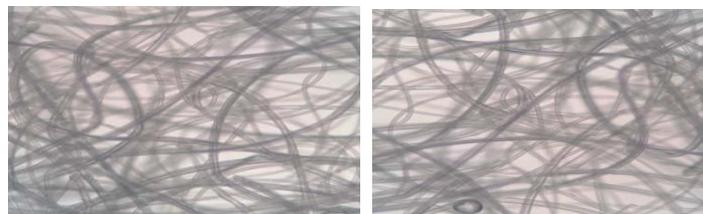
### ANÁLISIS MICROSCÓPICO

Antes de iniciar el análisis hay que tener en cuenta que la estructura interna de los filtros a utilizar no sigue ningún patrón, esto se debe a que las fibras internas están dispuestas al azar. Esas partículas son atrapadas (se adhieren a una fibra) mediante una combinación de

estos mecanismos: intercepción, donde las partículas que siguen a un flujo de aire rozan una fibra y se adhieren a ella. Impacto donde las partículas grandes no son capaces de evitar las fibras mientras siguen al flujo de aire y son obligadas a impactar directamente con una de ellas. Este efecto aumenta con la disminución de la separación entre fibras y el aumento de velocidad en el flujo de aire.

### Análisis a los cero kilómetros recorridos

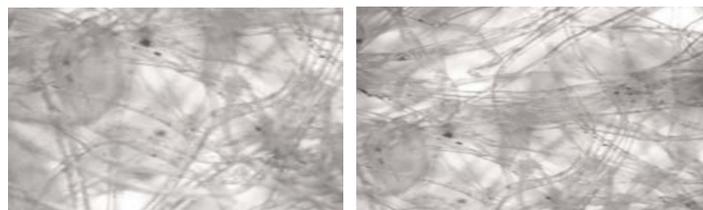
En la figura 2, se muestra el papel filtrante con un aumento de 40x de la estructura interna del papel filtrante nuevo la cual no presenta cambios porque aún no han tenido contacto con ningún tipo de contaminante o aire aspirado.

original 40X vs alternativo 40X  
Figura 2. Filtros de aire nuevos.

Con la ayuda del microscopio se puede apreciar el espacio entre cada una de las fibras que constituyen el filtro de aire original y alternativo, lo que indica una similitud en la estructura interna del papel filtrante, la diferencia en el paso de luz es de 2%.

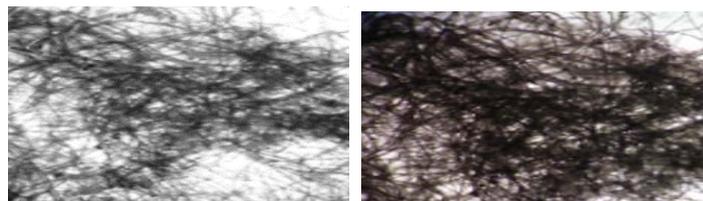
### Análisis a los 5000 kilómetros recorridos

En este análisis se empieza a evidenciar pequeñas acumulaciones de sedimentos grises en la estructura interna de cada uno de los filtros. En la figura 3, no existe una diferencia visual entre el filtro original y alternativo, la diferencia en el paso de luz es de 1%.

original 40X vs alternativo 40X  
Figura 3. Filtros a los 5000 kilómetros

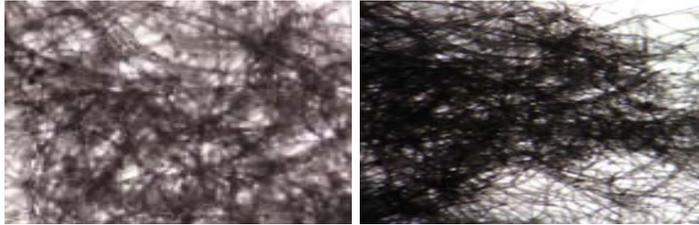
### Análisis a los 10000 kilómetros recorridos

Al cumplirse 10000 kilómetros se distingue una mayor cantidad de sedimento aglomerado entre las fibras del papel filtrante alternativo la cual se evidencia por el color negro que impide que la luz pase a través de la misma, como se observa en la figura 4. Haciendo una comparación del estado en el que se encuentra el papel filtrante de cada uno de ellos, se evidencia que el filtro alternativo es el que presenta más saturación, con una diferencia en el paso de luz del 9%.

original 40X vs alternativo 40X  
Figura 4. Filtro a los 10000 kilómetros

## Análisis a los 150000 kilómetros recorridos

Al alcanzar 15,000 km de recorrido, en la figura 5 se observa la contaminación de la estructura interna del papel filtrante alterno existe un exceso de sedimento sólido en donde el paso de luz se ha visto reducido al 6% siendo este un indicador de que éste filtro es prácticamente obsoleto. Existe un cúmulo notorio entre las fibras del filtro original, las cuales revela el paso de luz en un 24%, claramente se encuentra afectado, llegando al límite de funcionalidad en el periodo de mantenibilidad.



original 40X vs alterno 40X  
Figura 5. Filtros a los 15000 kilómetros

## Análisis a los 20000 kilómetros recorridos

Para observar la condición de funcionalidad del filtro aire original y alterno, se lo mantuvo en funcionamiento durante un recorrido de 20000 km, en estas condiciones, el filtro de aire original se encuentre en mejor estado, dejando pasar la luz en un 2%, el filtro alterno únicamente con paso de luz del 0,3%, por ello, la eficiencia de filtrado para las condiciones de funcionamiento es inapropiado y no alcanza a cumplir un periodo de mantenibilidad de 20000 km. los resultados microscópicos se muestran en la figura 6.



original 40X vs alterno 40X  
Figura 6. Filtros a los 20000 kilómetros

Las muestras microscópicas indican una mayor saturación de polvo y suciedad, según, Toma & Fileru (2016), estos inciden en la caída de presión en los ductos admisión, incidiéndose en el llenado de aire de los cilindros del motor, pudiéndose reducir la potencia máxima del motor. En consideraciones a los resultados obtenidos por Toma & Fileru (2016), los resultados de este estudio establecen un parametro para el recambio del filtro de aire, considerándose óptimo a los 10000 kilómetros, independientemente del origen del repuesto utilizado.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Basados en las observaciones microscópicas de saturación del papel filtrante, se aprecia el acumulamiento de sedimentos sólidos, los cuales hacen que la vida útil del filtro vaya disminuyendo hasta llegar al punto crítico, por debajo de la eficiencia de filtrado requerida por el motor de combustión interna, para un filtro original este punto se da a los 15 000 km, mientras que para un filtro alterno será a los 10 000 km.

Se realizaron cuatro pruebas de paso de luz para cada uno de los filtros con un margen de error de +/- 5% y como se puede apreciar en la tabulación de resultados, hasta los 5000 kilómetros, las diferencias de paso de luz no superan el margen antes mencionado por lo que se puede concluir que la eficiencia de filtrado es la misma para ambos filtros.

Para los 10 000 kilómetros, la diferencia se ha incrementado al 9% y los filtros siguen siendo funcionales en relación a la eficiencia de filtrado. En los 15 000 kilómetros los porcentajes sufren una gran variación tanto así que el filtro original apenas alcanza a cumplir con el porcentaje mínimo requerido para un óptimo estándar de filtración, mientras que el filtro alterno cumplió con ese estándar al superar el rango de 10 000 kilómetros.

A medida que aumenta el kilometraje recorrido con el filtro de aire, la cantidad de luz que deja pasar se va reduciendo hasta llegar al punto de saturación máximo que para el filtro original se da a los 15 mil kilómetros, mientras que para el filtro alterno es únicamente a los 10 mil kilómetros, demostrando que cambiar a los 15 000 km un filtro original será idóneo para las condiciones operativas en el país.

## REFERENCIAS

1. Ambiente, Secretaria de. *Informe de la Calidad del Aire el Distrito Metropolitano Quito 2017*. [En línea] 2018. [Citado el: 01 de 06 de 2018.] <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/informes#informe-calidad-del-aire-2017>.
2. Bavaresco, G. *Filtración*. Valencia : EXCEL FILTER, C.A, 2018.
3. Caterpillar. *Sistemas de admisión de aire*. [En línea] [Citado el: 23 de 02 de 2018.] [https://es.scribd.com/document/67545765/CALCULO-Sistema-de-Admision-de-Aire?gws\\_rd=ssl](https://es.scribd.com/document/67545765/CALCULO-Sistema-de-Admision-de-Aire?gws_rd=ssl).
4. DELCO, AC. *Ac Delco Autopartes*. [En línea] [Citado el: 28 de Marzo de 2018.] <http://www.acdelco.mx/#/productos/filtros>.
5. GENERAL FILTER GROUP. *General Filter Group air quality experts*. [En línea] [Citado el: 07 de Junio de 2018.] <http://www.generalfilter.com/es/normativas/iso-16890/>.
6. GmbH, Car-In Automotive. *Air Filters*. [En línea] [Citado el: 15 de 03 de 2018.] <https://www.car-in-automotive.de/filtration-technology/air-filters/>.
7. INEN-ISO 11841-1. *Vocabulario de filtros-parte1: Definiciones de filtros y componentes de filtros*. Quito : INEN, 2014.
8. INEN-ISO 11841-2. *Vocabulario de filtros-parte1: Definiciones de filtros y componentes de filtros*. Quito : INEN, 2014.
9. ISO. 16890 Parte 1: *Especificaciones técnicas, requisitos y sistema de clasificación basado en la eficacia de la materia particulada*. USA : ISO, 2016.
10. Alarcón, P. Movilidad urbana, consumo de energía y calidad del aire. 2013, *Revista Latinoamericana De Estudios Socioambientales*. Letras Verdes, págs. 15-17.
11. Toma, M y Fileru, T. Research on the Air Filters' Maintenance for Diesel Engines 2016, *Procedia Technology*, págs. Volumen 22, 969-975.
12. Los filtros y sus características. *Revista Cero Grados Celcius*. [En línea] 18 de Junio de 2014. [Citado el: 24 de Noviembre de 2017.] <https://www.0grados.com/los-filtros-y-sus-caracteristicas/>.
13. Sutherland, Ken. *Filters and Filtration Handbook*. Oxford : ELSEVIER, 2008.

# DESARROLLO DE UN SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DE LOS GASES DE ESCAPE MEDIANTE UN TURBO GENERADOR EN UN MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA DE 4 CILINDROS A GASOLINA

DEVELOPMENT OF AN ENERGY RECOVERY SYSTEM FROM EXHAUST GASES THROUGH A TURBO GENERATOR IN A 4- CYLINDER GASOLINE ENGINE

Buenaño M., Luis F. <sup>1</sup>; Cuaical A., Bolívar A. <sup>1</sup>; Moreno P., Ligia E. <sup>1</sup>  
Cazorla B., Francisco M. <sup>1</sup>, Chimborazo, Segundo F. <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

Autor para correspondencia: lfbuenanio@epoch.edu.ec

## **RESUMEN**

Se diseñó, construyó e implementó un sistema de recuperación de energía (ERS) en un motor Chevrolet Swift, utilizando un dispositivo turbo generador, consta de un turbocompresor de geometría fija, un generador eléctrico, una unidad de control de tensión y una unidad electrónica de control para monitorear el comportamiento del motor de combustión interna. Mediante experimentación se demostró que, al acelerar progresivamente el motor, aumenta la carga de aire sometida por el turbocompresor venciendo el “turbolag”, se convierte la energía mecánica de rotación en electricidad y alcanza niveles entre 12 y 34 V de CD y 0.5 a 1 A con los cuales se carga baterías de bajo requerimiento y alimenta consumidores. Este trabajo contribuye de manera directa a la investigación científica e innovación tecnológica en el país, a nivel mundial esta tecnología ha sido desarrollada por varios fabricantes de vehículos y aplicada en prestigiosas categorías de competición como la F1.

*Palabras clave: MegaSquirt, ERS, Energía, Turbo generador, turbocompresor.*

## **ABSTRACT**

An energy recovery system (ERS) was designed, built and implemented in a Chevrolet Swift engine, using a turbo generator device, consisting of a fixed geometry turbocharger, an electric generator, a voltage control unit and an electronic control unit. control to monitor the behavior of the internal combustion engine. Through experimentation it was demonstrated that, by progressively accelerating the engine, the air load submitted by the turbocharger increases, overcoming the “turbolag”, the mechanical energy of rotation is converted into electricity and reaches levels between 12 and 34 V of CD and 0.5 to 1 With which batteries of low requirement are charged and power consumers. This work contributes directly to scientific research and technological innovation in the country, worldwide this technology has been developed by several vehicle manufacturers and applied in prestigious categories of competition such as F1.

*Keywords: MegaSquirt, ERS, Energy, Turbo generator, turbocharger.*

## INTRODUCCIÓN

Durante varias décadas del siglo pasado el motor de combustión interna fue utilizado solamente con fines de obtener potencia de acuerdo a las condiciones de trabajo, donde no eran prescindibles factores como el consumo de combustible, emisiones, y aprovechamiento de energía.

En los últimos años, se han realizado investigaciones sobre nuevas tendencias que tienen como objetivo incrementar el rendimiento del motor, y a su vez reducir las emisiones contaminantes, así como también nuevos sistemas de recuperación de energía para incrementar la potencia y reducir el consumo de combustible como: Sistemas de freno regenerativo, turbocompresor híbrido (MGU-H), entre otros (Díaz Olmo, 2014).

## FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

**Sistema de Inyección Electrónica:** Su función es tomar aire del medio ambiente, medirlo e introducirlo al interior del cilindro, luego de acuerdo a esta medición, y conforme al régimen de funcionamiento del motor, inyectar la cantidad de combustible necesaria (Hernández Ambato, 2010). La dosificación se lleva a cabo por medio de una central electrónica, llamada ECU (Unidad de Control Electrónico), que recibe información en todo instante del estado del motor, por medio de sensores, estos convierten en señales electrónicas las magnitudes físicas medidas en el motor tales como: temperatura, carga, régimen, presión, entre otros. (Hernández Ambato, 2010)

**Sensores.** Son todos los elementos captadores de magnitudes físicas o químicas y que las convierten en variables o señales eléctricas, que a su vez son comunicadas a la ECU. En un motor convencional dotado de Inyección Electrónica, se puede encontrar diversos sensores, tales como (Santander, 2006):

- MAF (Sensor de Masa de Flujo de Aire)
- MAP (Sensor de Presión Absoluta en el Múltiple de Admisión)
- IAT (Sensor de Temperatura de Admisión)
- CHT (Sensor de Temperatura de la Cabeza de Cilindros)
- TPS (Sensor de Posición del Acelerador)
- ECT (Sensor de Temperatura de Refrigerante)
- KS (Sensor de Detonación)
- CKP (Sensor de Posición y Velocidad del Cigüeñal)
- CMP (Sensor de Posición y Velocidad del Árbol de Levas)

**Actuadores:** Son todos los elementos que acatan las órdenes enviadas por la ECU y efectúan una función o corrección específica. En un motor se puede encontrar normalmente los siguientes actuadores: (Santander, 2006)

- Inyectores
- Bobina de Encendido
- IAC (Válvula de Control de aire en Ralentí)
- EGR (Válvula de Recirculación de gases de escape)
- Electroventilador
- Bomba de Combustible
- EVAP (Sistema de emisiones)
- Regulador de Presión de Combustible

**Sistema de recuperación de Energía:** En un vehículo la recuperación de energía, puede estar presente en varios sistemas, debido a que todos estos experimentan desprendimiento de energía al estar en funcionamiento u operación. De acuerdo a varias investigaciones se pueden listar los siguientes:

- Sobrealimentación
- KERS (Recuperación de la Energía Cinética en Frenadas)
- MGU-H (Motor Generador Unit-Heat)

**Sobrealimentación:** Consiste en aprovechar la energía mecánica y térmica de los gases de escape, al accionar una turbina unida coaxialmente a un compresor a través de un eje. Cuando los gases de escape salen de los cilindros, antes de ser liberados al exterior, pasan por esta turbina y los gases ejercen una fuerza sobre sus álabes, esta energía mecánica de giro adquirida por la turbina es transmitida al compresor por medio del eje, este aspira aire del filtro y lo empuja aprovechando la fuerza centrífuga hacia el múltiple de admisión. De este modo se consigue elevar la presión para que entre al motor. (Hermógenes, 2004)

**KERS.** También llamado freno regenerativo, es un sistema de recuperación de la energía cinética que está presente en el calor residual creado por el proceso de frenado del automóvil y que reduce la velocidad del vehículo, convirtiendo la energía cinética desprendida, en varios tipos de energía los cuales pueden ser: (Domenech, 2011)

- Eléctrica
- Mecánica
- Hidráulica

**MGU-H.** Acrónimo de Motor Generator Unit-Heat (turbocompresor híbrido). Es un sistema moderno de recuperación de energía implementado en el 2014 en la Fórmula 1. El dispositivo es un motor/generador eléctrico acoplado entre la turbina y el compresor del turbocompresor, que cumple doble función: actúa como generador cuando el motor térmico trabaja a alto régimen, aprovechando la velocidad de los gases de escape, y como motor para aumentar la velocidad de giro del compresor en revoluciones bajas, aprovechando la energía eléctrica acumulada. El objetivo principal del MGU-H es actuar como motor para controlar la respuesta del turbo y eliminar el turbolag. A simple vista no parece ser un sistema muy complejo y sofisticado, sin embargo existen complicaciones al momento de hacerlo funcionar todo a la vez. (Díaz Olmo, 2014)



Fig. 1 Unidad MGU-H de Ferrari

## MATERIALES Y MÉTODOS

En el desarrollo del proyecto se utilizó el método experimental debido a que a nivel mundial sistemas como este solo han sido creados en ámbitos como la fórmula 1 y marcas de gama alta que hacen uso de este tipo de componentes para sus vehículos deportivos. El sistema se fundamenta en el uso de cuatro componentes principales, un motor de combustión interna encargado de convertir la energía química en energía mecánica mediante el uso de un controlador

de inyección electrónica (MegaSquirt), un turbocompresor que es accionado por la velocidad de los gases de escape, un generador acoplado al turbocompresor el cual es excitado por el giro del eje produciendo electricidad, y una unidad de control de tensión que rectifica y regula la corriente generada por el sistema turbo generador.

El sistema posee un panel de visualización ubicado en el tablero de control, donde se encuentra la pantalla LCD, en la cual se puede observar el valor del voltaje de la energía recuperada y un indicador de recuperación de energía. El diagrama de bloques del sistema se indica en la Fig. 2

Se han desarrollado 2 programaciones para la memoria EPROM de la ECU MegaSquirt II, estas programaciones guardan dos modalidades de funcionamiento del sistema por separado: una para el turbocompresor y la otra para el sistema turbo generador (ERS).

Para cargar el software se usa el programa Megatune 2.25 p3, software libre para programación de controladores de inyección de combustible y encendido.

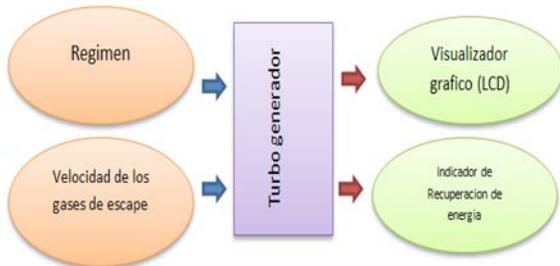


Fig. 2 Diagrama de bloques del sistema

Es necesario configurar el sistema con la programación específica para el turbo generador, y poner en marcha el motor, a medida que se incrementan las revoluciones de 1 500 a 3 000 RPM, el sistema entrará en funcionamiento produciendo la recuperación de energía en forma de CA, seguidamente la unidad de control se encargará de rectificar y regular esta corriente, para la carga de la batería o su uso en consumidores y presentará datos del voltaje CD producido, en la pantalla LCD como se aprecia en la Fig. 3



Fig. 3 Unidad de Control de Tensión

**IMPLEMENTACIÓN.** La implementación del sistema ERS, comenzó con el diseño y construcción de la unidad turbo generadora, la cual consta de un turbocompresor de geometría fija acoplado a un generador eléctrico constituido por un imán permanente, 6 bobinas de alambre de cobre de 0,3 mm de diámetro alojados en una carcasa de aluminio.

La unidad se basó en la implementación de un dínamo para la generación de energía para lo cual se debió realizar primero la

modelación de las partes más importantes como son el rotor, estator, eje y otras en un software CAD; con la finalidad de facilitar la construcción del resto de componentes faltantes entre ellas se tiene:

*Estator.* Consta de 6 bobinas ubicadas en un alojamiento hexagonal, separadas la misma distancia una de otra. El bobinado de cada polo, está diseñado de alambre de cobre de 0,3 mm de diámetro, y tiene alrededor de unas 110 vueltas.

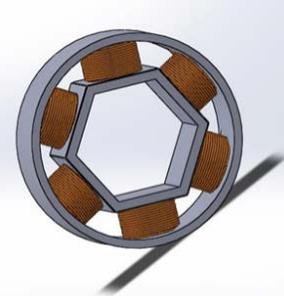


Fig. 4 Diseño del Estator

*Rotor.* Con dimensiones de 40 mm de longitud, con un diámetro de 30 mm, es un imán permanente sólido construido en fábrica básicamente de ferrita (hierro  $\alpha$ ).

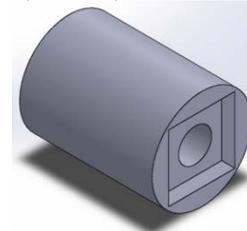


Fig. 5 Diseño del rotor

Otra de las piezas diseñadas para la constitución de la unidad de generación son: el eje, las carcasas primaria y secundaria y la selección de los rodamientos adecuados para equilibrar las cargas dinámicas y disminuir el rozamiento la, muestra los resultados de la selección y la Fig. 6, el ensamble de la unidad de generación que se conectará al turbocompresor del motor.

Tabla 1 Selección de rodamientos para la Unidad de generación

Marca	NTN Part	Diámetro Interno	Diámetro Externo	Ancho
NTN	600C3	10 mm	26 mm	8 mm
NTN	608C3/1E	8 mm	22 mm	7 mm

Elaborado por: Autor  
Fuente: origen de los datos

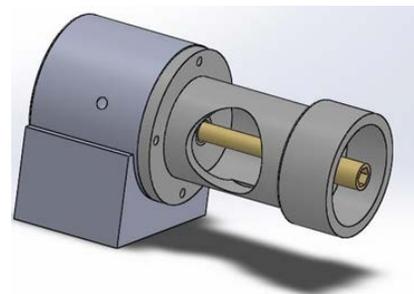


Fig. 6 Ensamble de la Unidad de generación

La construcción de la unidad requirió de la construcción de cada uno de los componentes diseñados y su ensamble con los elementos constitutivos del motor turbo cargado, así como también un adecuado sistema de refrigeración para la unidad y el motor, teniendo en cuenta la precisión de la construcción de la unidad de generación y su acople con el turbocompresor del motor.



Fig. 7 Implementación de la unidad de Turbocargador y unidad de generación de energía

Seguidamente y de acuerdo a las consideraciones expuestas anteriormente, se presenta el esquema del circuito general del sistema en la Fig. 8 en donde se detalla la conexión de los componentes de la fuente reguladora con el regulador LM 317 T y el puente de diodos, que se usaron para la construcción de la unidad electrónica de control de tensión.

La corriente fluctuante alterna obtenida del generador pasa al puente de diodos el cual se encarga de rectificar la corriente alterna en continua. El regulador LM 317 T establece una tensión de acuerdo a la necesidad del consumidor (2-34 V), siendo esta ajustable por medio de un potenciómetro. Varios capacitores se han implementado, en sectores como entrada y salida del regulador, con el objeto de filtrar las corrientes parasitas. El LCD permite visualizar la magnitud de recuperación de energía.

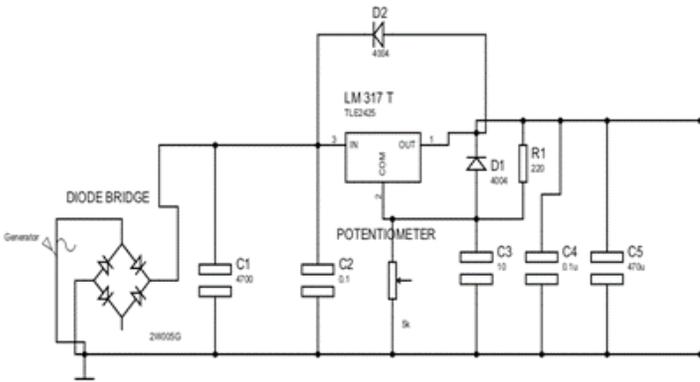


Fig. 8 Diagrama de la unidad electrónica de control de tensión

## RESULTADOS

Al poner en marcha el motor con el mapa de inyección diseñado para el funcionamiento de recuperación de energía y la unidad MGU-H, se realizó el acoplamiento del generador al turbocompresor, luego se aumentó el régimen del motor, haciendo girar el sistema turbogenerador y conseguir la generación energía eléctrica, la misma que se puede visualizar en la pantalla LCD de la unidad de control de tensión, obteniéndose los valores de la Tabla 2.

Tabla 2 Mediciones experimentales del Sistema de recuperación de Energía

R.P.M. M.C.I	R.P.M Turbo- generador	Recuperación de energía (VCD)
1 500	0	0
1 850	148	0,5
2 100	484	3,3
3 000	3 672	34

Elaborado por: Autor  
Fuente: origen de los datos

Estas medidas se consiguieron mediante el uso de un tacómetro analógico, el cual fue conectado al turbogenerador en la salida del eje y así lograr medir la magnitud de giro que se obtiene según el régimen establecido al MCI, los valores de voltaje se obtuvieron a través de las medidas presentadas por la unidad de control de tensión y las revoluciones del motor a través del software de control de la megasquirt.

Se realizó la prueba de acumulación de energía a una batería de bajos requerimientos (12V y 3Ah), consiguiendo experimentar que el voltaje generado debe ser mayor a 12V, lo cual es necesario para recargar al acumulador.

Posteriormente se procedió a colocar un consumidor eléctrico, para lo cual se instaló un electro ventilador de 12V y 350 mA, y también con un equipo de audio convencional determinándose que si pueden ser accionados mediante la energía generada o almacenada en la batería que se instaló para la acumulación de la energía.



Fig. 9 Prueba de alimentación en el equipo de audio convencional

## DISCUSIÓN

Uno de los puntos claves para el funcionamiento del prototipo de MGU-H creado para esta investigación experimental fue la creación de un mapa de motor adecuado para el funcionamiento con seguridad de la unidad de generación de energía y el turbo, este mapa limita el funcionamiento del motor a 3500 rpm ya que esta es la zona segura en la cual no se perjudica la integridad física tanto del turbocompresor como la unidad de generación ya que en pruebas realizadas experimentalmente se apreció que por encima del límite de corte de rpm que se menciona, se empieza a producir el desbalanceo del ensamble conocido como MGU-H.

Los resultados obtenidos indican que el prototipo construido en el motor de combustión interna, logra obtener un valor de tensión máxima de 36 V a 3 000 RPM del MCI, y un amperaje de 1A, resultados que por el momento indican que este prototipo puede abastecer de energía a consumidores eléctricos siempre y cuando el consumo esté dentro de los valores de voltaje y corriente

especificados en las pruebas siendo el caso de accesorios y baterías de bajos requerimientos véase la Tabla 2.

De acuerdo al análisis realizado en base a las pruebas experimentales, se demuestra que el sistema cumple con los objetivos planteados, los cuales son recuperar energía del flujo de gases de escape de un sistema turbo cargador y utilizarla para la carga de baterías y consumo de accesorios eléctricos, sin embargo, la limitación de materiales con los que se contó para la construcción del prototipo impide sacarle el máximo provecho al dispositivo.

El dispositivo MGU-H actualmente en fórmula 1 goza de una gran aceptación dentro de la categoría, sin embargo los problemas de fiabilidad son comunes aún a ese nivel de competitividad, el prototipo creado emula y demuestra la unidad de la configuración planteada por la ingeniería de vehículos híbridos utilizados en dicha competición y sus novedosos sistemas de recuperación de energía.

Al no ser concebido el diseño como un todo ya que en el país no se cuenta con la tecnología necesaria para hacer una construcción íntegra del prototipo, y en especial del turbocompresor, el desbalanceo de la unidad y el calor que tienen que soportar los elementos son los principales problemas que se tuvo que afrontar y que dieron pie a que se controle por software la protección de los componentes, esto a través de la limitación de las revoluciones del motor, delimitando lo que se conoce como la zona segura de funcionamiento.

Sin embargo, gracias a la experimentación y la iniciativa del equipo que participó en el proyecto, se logró demostrar que este tipo de dispositivos cumplen su cometido y que en el futuro será de gran ayuda al sector automotriz y su empeño en el ahorro de combustible y la recuperación de energía, toda vez que hoy en día son los motores estratificados y la inyección directa de gasolina con turbocompresor la tendencia en la industria. Por lo que el siguiente paso es continuar con el estudio tanto en el ámbito de los materiales como en la parte de la electrónica de potencia para lograr reutilizar la energía acumulada y utilizarla en la eliminación del conocido turbo lag a través del uso como motor eléctrico de la unidad de generación y de esta manera lograr un prototipo que pueda ser utilizado en la industria.

## CONCLUSIONES

- Con la implementación de la MegaSquirt se logró ajustar los parámetros necesarios para un buen funcionamiento del motor.
- Con la implementación del sistema turbogenerador se experimentó la recuperación y transformación de la energía.
- El sistema de recuperación de energía de los gases de escape mediante un dispositivo turbo generador, fue capaz de aprovechar la inercia y velocidad de los gases desprendidos por el escape, convirtiendo esta energía en eléctrica.
- Las pruebas realizadas constataron que la energía recuperada, es capaz de poner en funcionamiento algunos accesorios eléctricos, e incluso se puede recargar una batería de bajos requerimientos.
- El sistema como prototipo es de gran utilidad para un futuro perfeccionamiento del mismo en lo que respecta a los sistemas de reaprovechamiento de la energía producida en un MCI, incorporando estudios complejos de materiales, equipos y tecnología de punta, ya que tanto el sistema generador como el turbocompresor al estar instalados solidariamente se ven afectados por factores como: la elevada temperatura de funcionamiento, el campo magnético generado entre el rotor y el estator del generador, el peso y balanceo de componentes como el eje, el magneto, la tuerca de sujeción, entre otros y las vibraciones producidas por el funcionamiento del MCI.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Alonso Pérez, J. M. (2003). *Técnicas del Automóvil*. Madrid: Thompson-Paraninfo.
2. Arévalo Santamaría, T. X. (2012). *Diseño e Implementación del control electrónico de dosificación de combustible para un motor de combustión interna de la Empresa A&S Custom Bikes*. Tesis de Grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4969/4/CD-4518.pdf>
3. Bohner, M., Heinz, G., & Hellmut, G. (1985). *Tecnología del Automóvil*. Alemania: GTZ.
4. Costa, J. (2014). *interacción Electromagnética Teoría Clásica*. Barcelona: Reverte S.A.
5. Diaz Olmo, J. M. (4 de Julio de 2014). *Explicando el ERS segunda parte*. Obtenido de [www.caranddriverthef1.com](http://www.caranddriverthef1.com): <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2014/07/04/93751-explicando-elers-segunda-parte>.
6. Domenech, E. (19 de Julio de 2011). *Así funciona el KERS*. Obtenido de [Diarimotor.com](http://www.diarimotor.com): <http://www.diarimotor.com/tecnovia/2011/07/19/asi-funciona-el-kers/>
7. Hermógenes, G. (2004). *Manual Ceac del Automóvil*. Madrid: Ediciones Ceac, S.A.
8. Hernández Ambato, J. (2010). *Diseño e implementación de una unidad electrónica para controlar el desempeño de un motor de combustión interna*. Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. Obtenido de [http://www.academia.edu/6357347/Trabajo\\_de\\_Tesis\\_en\\_Electr%C3%B3nica\\_-\\_DISE%C3%91O\\_E\\_IMPLEMENTACI%C3%93N\\_DE\\_UNA\\_ECU\\_PARA\\_CONTROLAR\\_EL\\_DESEMPE%C3%91O\\_DE\\_UN\\_MOTOR\\_DE\\_COMBUSTI%C3%93N\\_INTERNA](http://www.academia.edu/6357347/Trabajo_de_Tesis_en_Electr%C3%B3nica_-_DISE%C3%91O_E_IMPLEMENTACI%C3%93N_DE_UNA_ECU_PARA_CONTROLAR_EL_DESEMPE%C3%91O_DE_UN_MOTOR_DE_COMBUSTI%C3%93N_INTERNA)
9. Honeywell Garrett. (2017). *Turbotech 103 Expert*. Obtenido de <https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/sites/default/files/PDF/Turbo%20Tech%20103.pdf>
10. Honeywell Garrett. (2017). *Turbo Tech 101 Basic*. Obtenido de <https://www.turbobygarrett.com/turbobygarrett/sites/default/files/PDF/Turbo%20Tech%20101.pdf>
11. Kindler, H., & Kynast, H. (1986). *Matemática aplicada para la técnica del automóvil*. (Reverté, Ed.) España.
12. Marín, J. A. (2011). *Sistemas Eléctricos de Seguridad y Confortabilidad*. Madrid: Paraninfo.
13. MegaManual. (7 de Junio de 2017). *Introduction to the MegaSquirt® EFI Controller*. Obtenido de [MegaManual.com](http://www.megamanual.com/v22manual/mintro.htm): <http://www.megamanual.com/v22manual/mintro.htm>
14. Santander, J. R. (2006). *Manual técnico de Fuel injection* (Tercera ed.). Guayaquil, Ecuador: Diseli.

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN FONDO PLANO Y DIFUSORES DEL VEHÍCULO DE COMPETENCIA FÓRMULA “SAE” EN FIBRA DE CARBONO

Laguas, Williams <sup>1</sup>; Jácome, Román <sup>1</sup>; Padilla, Celin <sup>1</sup>; Quinga, Milton <sup>1</sup>

Escuela de Ingeniería Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

Autor de correspondencia: williams.laguas@esPOCH.edu.ec; roman.jacome@esPOCH.edu.ec

### **RESUMEN**

El presente artículo busca incrementar la eficiencia aerodinámica del fondo plano y difusor del vehículo de competencia Fórmula SAE y mejorar el método de manufactura manual con materiales compuestos. En el software SolidWorks se diseñaron modelos que se ajusten a las dimensiones permitidas por el reglamento. Estos diseños se analizaron en ANSYS WORKBENCH para determinar las cargas aerodinámicas generadas y el comportamiento estático y dinámico del fondo plano y difusores. El análisis aerodinámico en Fluid Flow de ANSYS (Fluent) permite determinar si el modelo genera mayor efecto suelo y menor resistencia al avance de acuerdo con los resultados aerodinámicos del software. El material compuesto fibra de carbono y resina Epofix soporta las cargas generadas por la aerodinámica del fondo plano y difusores de acuerdo con los resultados de los ensayos destructivos que se realizaron en el “Centro de Fomento Carrocero”.

*Palabras clave: Fondo plano, Difusores, Análisis Aerodinámico, Fibra De Carbono*

### **ABSTRACT**

This article seeks to increase the aerodynamic efficiency generated by the flat bottom and diffuser of the vehicle of competition Formula SAE and improve the method of manual manufacturing with composite materials. In the software Solid works designed models that conform to the dimensions allowed by the regulation. These designs were analyzed in ANSYS WORKBENCH to determine the aerodynamic loads generated, static and dynamic behavior of the flat bottom and diffusers. The aerodynamic analysis in Fluid Flow of ANSYS (Fluent) allows to determine if the model generates greater ground effect and lower resistance to the advance according to the aerodynamic results of the software. The composite material carbon fiber and resin Epofix supports the loads generated by the aerodynamics of the flat bottom and diffusers according to the results of the destructive tests carried out in the “Centro de Fomento Carrocero”.

*Key words: Flat bottom, Diffusers, Aerodynamic Analysis, carbon fiber*

## INTRODUCCIÓN

La Fórmula SAE es una competencia universitaria internacional que tiene sus principios alrededor de los años 80 en los Estados Unidos, al pasar del tiempo esta competencia ha ido tomando popularidad, desde sus inicios, cada vez son más el número de universidades que asiste a esta competencia, cuyo objetivo de cada equipo es ser capaz de diseñar y construir un vehículo de carreras en base a reglas y normas establecidas por la competencia.

Con ayuda de los softwares CAD CAE, facilita la simulación y permiten obtener datos sobre los fenómenos aerodinámicos que se producen en un vehículo en las diferentes condiciones a las que va a estar expuesto. De esta manera se va a desarrollar el fondo plano y difusores posteriores el cual se ubicará en el vehículo Fórmula SAE.

El fondo plano se encarga de generar unos vórtices que extraen el flujo debajo del vehículo para aumentar el vacío, y a su vez impide la entrada de flujo por los laterales para que no quede aire debajo y no vuelva a entrar, mientras que la función principal del difusor es la de extraer el flujo de aire que circula por debajo del monoplaza y la de adaptarlo al aire exterior.

Al aumentar el difusor la sección de paso del flujo por debajo del monoplaza, ésta tiene que ser ocupada por el aire, y para ello este flujo se ha de acelerar a lo largo del fondo plano para poder ocupar más espacio del que ocupaba, provocando así una reducción de presión a la entrada del difusor y por tanto ganar carga aerodinámica. La carga aerodinámica producida por la aceleración del flujo de aire y el cambio de sección de los difusores incrementa el efecto suelo, esta presión de succión aumenta en función de la velocidad al cuadrado. Otra carga generada es la de resistencia al avance el cual se disminuirá de acuerdo a los parámetros de diseño.

Por tal motivo el objetivo de este trabajo es diseñar y construir un fondo plano y difusor posterior para el vehículo de competencia fórmula SAE que mejore la eficiencia aerodinámica además de la selección del material que soporte las cargas generadas, con la utilización de materiales compuestos resistentes y livianos.

Las fibras naturales o aramidas utilizadas para refuerzo en materiales compuestos presentan buenas propiedades de resistencia a la flexión, tracción y compresión por ejemplo el material compuesto en base de matriz de poliéster y refuerzos de cabuya resiste una carga de tracción de 305 Mpa, resistencia al corte de 112 Mpa. y un módulo de elasticidad de 7,5 Mpa, datos que nos permiten tener una idea sobre la capacidad de resistencia de este material compuesto. (TIXI, 2015.). Se puede conseguir en el mercado ecuatoriano a un precio conveniente las fibras de cabuya tejidas que servirán como refuerzo.

Los materiales compuestos con refuerzos de fibras de carbono presentan excelentes propiedades de resistencia a la flexión, tracción e impacto, La fibra de carbono fabricada principalmente de poliacrilonitrilo es una fibra sintética, la cual está constituida por la unión de finos filamentos de 5 a 10µm siendo su principal compuesto el carbono o brea estirada para alinear la estructura cada filamento de la fibra es calentada para eliminar el oxígeno, nitrógeno e hidrogeno. Se aplican principalmente la fabricación de materiales compuestos junto con la resina epoxi. (WILLIAMS F. SMITH, 2006)

El precio en el mercado ecuatoriano de refuerzos en fibra de carbono es un poco alto siendo una desventaja en la aplicación en autopartes, además el proceso de manufactura utilizado para este material requiere de equipos costosos.

Más adelante se describirá el método utilizado para trabajar el material compuesto fibra de carbono resina Epofix mediante un proceso de manufactura más sencilla que ayudará a disminuir costos de producción de piezas. Para justificar este proceso se realizarán ensayos destructivos en el Centro de Fomento carroceros que serán comparadas con datos del material compuesto en fibra de cabuya antes estudiado.

Los materiales compuestos que se utilicen para la construcción del fondo plano y los difusores deberán tener altas propiedades mecánicas y ser livianas para mejorar la eficiencia aerodinámica del vehículo de competencia Fórmula SAE.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En base a la metodología bibliográfica documental se estudiará las propiedades y características del material compuesto cabuya resina poliéster y se describirá el proceso de manufactura utilizado para la fabricación de autopartes en este tipo de material compuesto.

Ahora para el estudio del material compuesto fibra de carbono resina Epofix se utilizará la metodología bibliografía donde se estudiará las propiedades físicas y mecánicas de la fibra de carbono, además se revisará los procesos de conformado en piezas de este material compuesto.

Para el proceso de manufactura en fibra de carbono se utilizará una metodología experimental donde detallaremos un proceso de manufactura sin utilización de equipos de vacío y de autoclave para el curado, y se interpretarán los resultados obtenidos de los ensayos de tracción, flexión e impacto realizados en el Centro de Fomento Carrocero.

Mediante la metodología investigativo aplicada se seleccionará el material compuesto adecuado para la construcción del fondo plano y difusores que soporten las cargas generadas por la aerodinámica, además mejoren la eficiencia y reducción de peso del fondo plano y los difusores.

## MATERIAL COMPUESTO FIBRA DE CABUYA-RESINA DE POLIÉSTER

La furcraea conocido como cabuya es la planta del cual se extrae esta fibra natural utilizada para la fabricación de textiles, cuerdas, papel y como material de refuerzo con compuestos de matriz plástica para la fabricación de autopartes. Debido a las buenas propiedades de resistencia mecánica que presenta además de ser ligeras por su baja densidad. (Macía, 2006).



Figura1. Tejido con fibra de cabuya

Las fibras de cabuya se obtuvieron mediante el tratamiento de secado y corte del cabuyo seguido del proceso de retiro de la celulosa. Se procede a hilar la fibra mediante un cepillado para finalmente tejer de acuerdo al espesor deseado.

**PROCESO DE MANUFACTURA MANUAL DE LAS PROBETAS EN FIBRA DE CABUYA- RESINA DE POLIÉSTER**

La secuencia seguida para la fabricación de probetas para ensayos destructivos fue la siguiente:

- La preparación del molde con cera para desmoldar, necesario para que las probetas sean extraídas con facilidad.
- La preparación homogénea de la matriz a base de resina poliéster con un octavo de catalizador de cobalto y 50 gr de estireno.
- Agregar la fibra de refuerzo al molde con una capa de resina antes y después de cada proceso hasta alcanzar un espesor especificado por la norma.
- El proceso de curado y endurecimiento de material a temperatura ambiente.

**Ensayo de tracción según la Norma ASTM-D3039 Fibra de cabuya al larga 40% y 60% de resina de poliéster en el laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de mecánica de la ESPOCH.**

Este es un tipo de ensayo destructivo donde las probetas se deforman hasta el punto de ruptura. Las características dimensionales de las probetas son especificadas por la norma ASTM – D 3039 se analizan alrededor de siete probetas. Los resultados de este ensayo se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Datos y resultados ensayo de tracción

#	Carga Máxima (kg)	Deformación Máxima (mm)	Carga Máxima (N)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Elongación (mm)	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	300	0,42	2940	32,67	0,0083	3936
2	420	0,51	4116	45,73	0,0102	4475
3	280	0,31	2744	30,49	0,0062	4933
4	460	0,74	4508	50,09	0,0147	3407
5	420	0,66	4116	45,73	0,0132	3459
6	380	0,74	3724	41,38	0,0148	2792
7	500	0,82	4900	54,44	0,0164	3320
Pro-medio	394	0,60	3864	42,93	0,0120	3760
Desv. Estándar	80,59	0,19	789,81	8,78	0,0038	737,61

Elaborado por: Autores  
Fuente: (TIXI, 2015.)

**Ensayo de flexión según la Norma ASTM-D 7264 Fibra de cabuya al larga 40% y 60% de resina de poliéster en el laboratorio de resistencia de materiales de la Facultad de mecánica de la ESPOCH.**

Este método de ensayo determina la rigidez a la flexión y las propiedades de resistencia de un compuesto de refuerzo en fibra de cabuya y matriz polimérica. Los resultados del ensayo de acuerdo a la norma ASTM-D 7264 se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Datos y resultados ensayos de flexión

#	Carga Máxima (Kg)	Deflexión Máxima Ruptura (mm)	Carga Máxima (N)	Esfuerzo Máximo (MPa)	Módulo de Flexión (Mpa)
1	12	24,50	118	106	3025
2	16	21,00	157	141	4705
3	10	25,50	98	88	2422
4	14	25,95	137	124	3332
5	10	25,75	98	88	2398
6	15	19,15	147	132	4837
7	11	20,85	108	97	3258
Pro-medio	12,6	23,24	123	111	3425
Desv. Estándar	2,44	2,82	24	22	991

Elaborado por: Autores  
Fuente: (TIXI, 2015.)

**MATERIAL COMPUESTO FIBRA DE CARBONO-RESINA EPOFIX 300.**

La fibra de carbono también conocido como CFRP (Carbon Fiber Reinforced Plastic) es el material más utilizado en los vehículos de competencias y de producción, las características de este material compuesto reducen el peso de las piezas y le dan mayor rigidez debido a su composición de átomos de carbono en forma de fibras de un diámetro de 10 micrones, trenzados para formar una sola tela de fibras de carbono que junto con una resina termoestable todo esto acompañado de un proceso de curado en vacío o en ambiente procurando que se compacte el refuerzo y la matriz. (STEFANO, MOTOR AND RANCING, 2017).



Figura 2. Autopartes en Fibra de carbono

Las fibras se obtienen por la carbonización a temperaturas entre 1200°C y 1400°C de fibras orgánicas o sintéticas tienen un contenido mínimo de 92 % de carbono en peso.

El proceso de obtención de las fibras de carbono se basa en los siguientes pasos:

- Hilado de las fibras
- Estabilización de las fibras mediante peroxidación y estabilización térmica
- Carbonización a atmosfera inerte a una temperatura de 1400 °C

## PROCESO DE MANUFACTURA MANUAL EN FIBRA DE CARBONO - RESINA EPOFIX 300

El proceso para la fabricación de las probetas para los ensayos fue la siguiente:

- Preparar el molde con cera para desmoldar posteriormente aplicar una capa de cera de zapatos
- Preparar la matriz de resina Epofix mezclando los compuestos A y B con una relación dos a uno respectivamente
- Sobre una superficie plana saturar los refuerzos de fibra de carbono con la matriz hasta un punto de pre impregnación.
- Colocar las capas pre impregnadas una a continuación de otra y compactarla hasta obtener el espesor especificado por las normas para los ensayos.
- El proceso de curado puede ser realizado a temperatura ambiente y a cielo abierto.

### Ensayo de tracción según la Norma ASTM-D3039 de fibra de carbono y resina Epofix 300 realizado en el Centro de Fomento Carrocero.

Las probetas se construyeron según la norma ASTM-D3039 para ensayo de tracción, se realizó mediante cinco ensayos, los resultados obtenidos son especificados en Tabla 3.

Tabla 3 Datos y resultados ensayo de tracción

Probeta	Carga Máxima (N)	Esfuerzo Máximo de tracción (MPa)	% Elongación (Calculado)	Módulo de Elasticidad (MPa)
1	19197.18	303.54	4.98	6097.59
2	18043.80	311.98	4.82	6476.33
3	15355.22	254.62	5.01	5084.3
4	16988.25	289.99	4.81	6030.91
5	18283.63	325.33	4.78	6811.16
Prom.	17573.61	297.09	4.88	6100.06
Desv. Estándar	1468.425	26.99	0.11	648.81

Elaborado por: Autores  
Fuente: Datos Centro de Fomento Carrocero

### Ensayo de flexión según la Norma ASTM- ASTM D 7264 de fibra de carbono y resina Epofix 300 realizado en el Centro de Fomento Carrocero.

Este método de ensayo determina la rigidez a la flexión y las propiedades de resistencia de un compuesto de refuerzo en fibra de cabuya y matriz polimérica.

Tabla 4 Datos y resultados ensayo de flexión

Probeta	Carga Máxima (N)	Deflexión (mm)	Esfuerzo Máximo de Flexión (MPa)	Deformación máxima (%)	Módulo de Elasticidad secante de flexión (MPa)
1	328.18	9.25	300.86	1.63	18426.45
2	326.61	9.72	340.64	1.71	19901.97
3	299.78	8.65	316.76	1.51	21047.19
4	336.07	10.18	355.66	1.75	20270.25
5	323.45	9.07	345.63	1.56	22179.53
Pro-medio	322.82	9.38	331.91	1.63	20365.08
Desv. Estándar	1468.425	0.59	22.48	0,10	1390.98

Elaborado por: Autores  
Fuente: Datos Centro de Fomento Carrocero

## CONDICIONES DE DISEÑO

### Parámetros de Diseño

Los parámetros de entrada a ser considerados al momento de producir el análisis y la simulación del fondo plano deben ser de acuerdo a las condiciones a los que va a ser expuesto como la temperatura, presión atmosférica, velocidad del prototipo.

Temperatura Máxima: Los datos proporcionados por el portal CLIMATE-DATA.ORG nos da como un valor de temperatura máximo que se ha producido en la ciudad es de 29,5 C = 302,65 K (Climate data). Presión Máxima: los datos proporcionados nos dan un valor de 101030 Pa = 0.997088576 atm. Velocidad del Prototipo: Este dato será tomado en cuenta según el reglamento de la Fórmula SAE donde establece una velocidad máxima de 75 Km/h = 20,83 m/s.

### Variables de diseño del fondo plano y difusores

Los difusores utilizados en vehículos de competencia son: el doble difusor, difusor soplado, difusor convencional.

- El difusor convencional mayormente utilizado porque permite diseñar varias formas geométricas y configuraciones de acuerdo a requerimientos de los equipos más adelante se realizará un análisis de formas que permitan aprovechar este tipo de difusor.
- Los difusores dobles canalizan el flujo de aire mediante un orificio en la parte superior del mismo haciendo que expulsen más flujo de aire recibido de los costados. La FIA prohibió este tipo de difusor porque superaba las medidas permitidas de carga ya que aprovechaba el aire que fluía por el exterior del monoplaza.
- El detalle del difusor soplado consiste en reunir los gases de escape que salen de los conductos de escape para redirigir hacia los difusores, aumentando la capacidad de succión de aire del fondo plano. Para que esta propuesta funcione la aceleración del motor debe permanecer casi constante, este es ayudado gracias a programaciones de los mapas de funcionamiento de los motores.

Las variables de diseño consideradas de acuerdo a la geometría de los difusores están analizadas en Fluid Flow (Fluent) de ANSYS, los diseños son sometidos a las mismas condiciones de velocidad, presión y de frontera del encapsulado detallados en la tabla 5.

Tabla 5 Parámetros de estudio de los difusores

<b>Frontera del encapsulado</b>	+X 0.5m
	+Y 0.5m
	+Z 0.2m
	-X 0.5 m
	-Y 0.1m
	+Z 0.2m

Elaborado por: Autores  
Fuente: Autores

A continuación, se discuten propuestas de diseño de difusores las cuales se detallan en la Tabla 6.

**Difusor perfil recto**

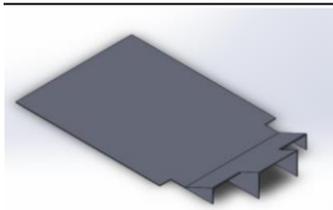
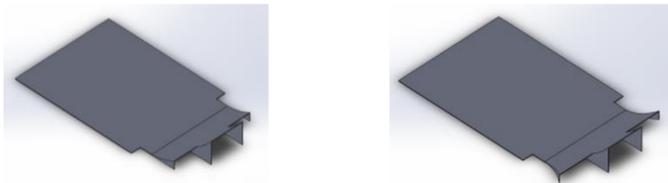


Tabla 6 Diseños de difusores

<b>Difusor perfil curvo</b>	<b>Difusor perfil curvo pronunciado</b>
-----------------------------	---



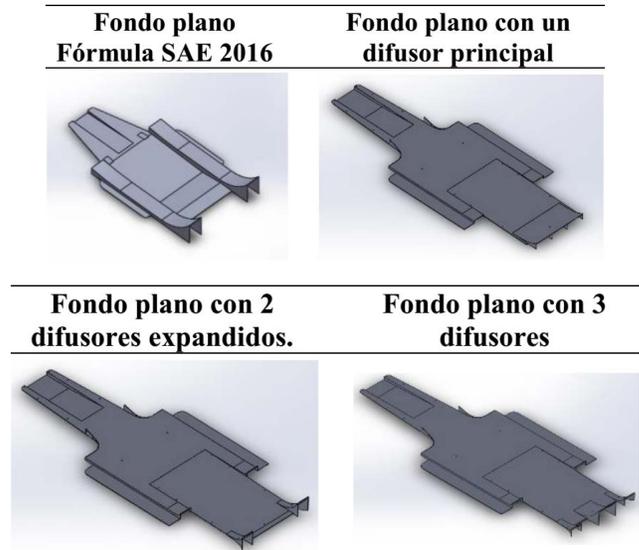
Elaborado por: Autores  
Fuente: Autores

**Alternativas de diseño del fondo plano y difusores.**

Se diseñó tres modelos de fondos planos que se ajusten a las características del chasis y la carrocería. Además, se consideró el piso construido en un anterior trabajo como base para mejorar la eficiencia aerodinámica variando la forma y número los difusores acortando la superficie del fondo plano bajo el reglamento actual de la Fórmula SAE 2017-2018.

Partiendo del reglamento vigente y de trabajos anteriormente realizados, con la ayuda del software CAD Solidwork y de los variables estudiadas en este capítulo se construyeron los diseños para el fondo plano que se ajustan a las dimensiones del bastidor y chasis para posteriormente ser analizadas en ANSYS Flow Fluid (FLUENT) donde seleccionara el mejor modelo para la construcción

Tabla 7. Diseños de difusores



Elaborado por: Autores  
Fuente: Autores

**RESULTADOS**

Los análisis aerodinámicos para los modelos de difusores se muestran en la Tabla 8 del cual se selecciona el difusor de perfil curvo y curvo expandido debido a que generan una mejor distribución de la carga aerodinámica.

Tabla 8 Resultados de los difusores ensayados en ANSYS Fluent

Variables de diseño difusores	Carga Fy [N]	Resistencia Fx [N]	Presión Max Pmax [Pa]	Presión Min Pmin [Pa]	Velocidad [m/s]
Difusor perfil recto	-75.9892	14.5918	101512	100683	34.5887
Difusor perfil curvo	-78.2349	15.1004	101427	100827	30.1456
Difusor perfil curvo pronunciado	-78.0661	16.1702	101434	100727	30.4117

Elaborado por: Autores  
Fuente: Autores

El análisis aerodinámico en software ANSYS en el módulo de Flow Fluid permite conocer las cargas generadas en el fondo plano y los difusores. En la siguiente tabla se mostrará los resultados obtenidos por los fondos planos y difusores modelo 2016 y 2018 con materiales de refuerzo de cabuya y fibra de carbono respectivamente además se comparará las propiedades del material densidad, peso y esfuerzos aerodinámicos.

Los fondos planos analizados están sometidos a las mismas condiciones de análisis sin embargo las dimensiones varían en el 2016 se creó una primera versión de Fórmula SAE para la Carrera de Ingeniería Automotriz de la ESPOCH, y en el 2018 se construyó otro diseño que se ajusta al reglamento actual de la Fórmula SAE para el cual se modificó el fondo plano y los difusores para un nuevo bastidor que se ajustaba a los nuevos requerimientos de la competencia.

Tabla 9: Resultados obtenidos del análisis aerodinámico

Fases del análisis	Carga Fy [N]	Resistencia Fx [N]	Fineza $f=F_y/F_x$	Coefficiente de sustentación CL	Coefficiente de arrastre Cx	Potencia absorbida [Hp]
Fondo plano Fórmula SAE 2016	-114.47	22.81	-5.02	-3.486	0.6945	0.633
Fondo plano con difusor principal.	-84.58605	10.60967	-7.97	-4.5185	0.5668	0.2946
Fondo plano con 2 difusores expandidos	-62.5431	17.3833	-3.598	-2.6183	0.7277	0.4825
Fondo plano con 3 difusores	-131.0394	27.1043	-4.835	-4.2929	0.88794	0.7524

Elaborado por: Autores

Fuente: Autores

Las propiedades de la fibra de carbono son superiores a la de la fibra de cabuya en resistencia y peso sin embargo el costo entre los refuerzos son bastantes significativos la fibra natural suele ser más barata que la de carbono.

Mediante la técnica de manufactura de materiales compuestos utilizada en la fibra de carbono fue el método de pre impregnación donde se obtuvo una mejor saturación de la matriz con la fibra de carbono incrementando la resistencia del fondo plano y difusores posteriores.

De acuerdo con los diseños comparados en la Tabla 10 podemos concluir que el fondo plano 2018 genera mayor eficiencia aerodinámica que la versión anterior y tiene 10 kilogramos menos sin embargo el diseño anterior presenta buenas características aerodinámicas ya que tiene menor coeficiente de arrastre debido a su diseño con difusor recto alargado desde el eje delantero hasta el posterior.

## CONCLUSIONES

Se investigó el reglamento vigente de la Fórmula SAE para la realización de un modelo de fondo plano y difusores que cumpla con la normativa propuesta con la competencia.

En base a los diseños realizados en software CAD Solidworks del fondo plano y difusores se seleccionó un modelo mediante la simulación en CFD de ANSYS que generaba mayor eficiencia aerodinámica, el fondo plano con tres difusores disminuyó el coeficiente de arrastre e incrementó el coeficiente de sustentación negativamente del vehículo Fórmula SAE con respecto a los otros diseños lo cual dio como resultado mayor efecto suelo y reducción de la fuerza de avance. Además, mediante un análisis estático estructural y un análisis modal dinámico en ANSYS se determinó las dimensiones de construcción y la capacidad del material compuesto necesaria para soportar los esfuerzos aerodinámicos.

Se construyó el fondo plano con tres difusores mediante la utilización del material compuesto fibra de carbono y resina Epofix 300 aplicando un proceso de pre impregnación manual de la fibra con la resina, las capas pre impregnadas formaban una matriz de resina que atravesaba un 95 % de los espacios entre fibras esto permitió una homogenización de capas que colocadas una sobre otra aumentando la resistencia y el espesor del material compuesto.

Se realizaron análisis comparativos para materiales compuestos de fibra de carbono en el Centro de Fomento Carrocero de la ciudad de Ambato donde se especificó las propiedades mecánicas y físicas, además se validó la técnica de manufactura utilizado mediante los resultados de

los ensayos de tracción, flexión e impacto, obteniendo valores próximos a los especificados en la ficha técnica del material fibra de carbono resina Epofix 300. Las propiedades determinadas en por los ensayos son superiores a la utilizada anteriormente en la construcción del fondo plano en fibra de cabuya sin embargo hay una diferencia grande entre precios de los refuerzos para estos materiales compuestos.

## AGRADECIMIENTOS

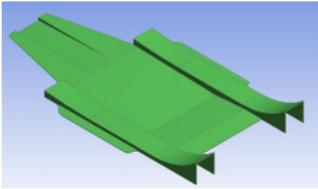
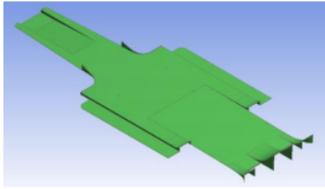
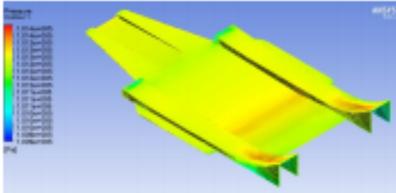
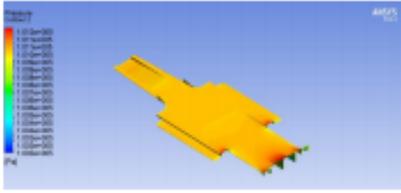
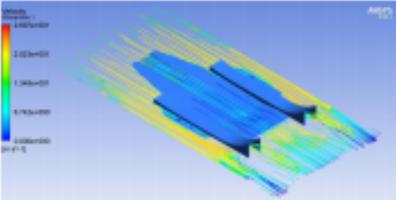
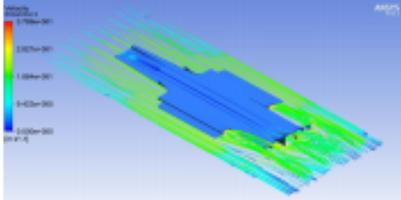
Se agradece al Centro de Fomento Carrocero de la Ciudad de Ambato Ecuador por la ayuda para realizar los ensayos para el material compuesto fibra de carbono resina Epofix 300 el cual justifico que el proceso de manufactura utilizado para la elaboración de las probetas y posteriormente la construcción del fondo plano y difusores.

Se agradece la asesoría técnica brindada por la Institución SETMIX además del financiamiento del 50% de la resina Epofix 300.

## REFERENCIAS

1. Askeland, D. R. (1988). *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. México: International Thomson Editores S.AA.
2. Corona, J. L. (2017). *Estudio y diseño aerodinámico de un fondo plano para un vehículo de competencia Formula SAE*. Sevilla - España.
3. Macía, M. J. (2006). Las plantas de fibra. *Botánica Economía de los Andes Centrales* (370-380).
4. Martínez, S. P. (s.f.). *Lecturas Complementarias Materiales Compuestos*. Recuperado el 20 de Junio de 2018, de [http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-graficametodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/lectura\\_complementaria/uniones/elementos](http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-graficametodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/lectura_complementaria/uniones/elementos)
5. Navarro, S. (2012). *Estudio de la degradación de materiales compuestos base poliéster reforzados con fibra de vidrio en medios neutros y alcalinos*. (Universidad Politécnica de Valencia) Recuperado el 20 de Junio de 2018, de <https://riunet.upv.es/handle/10251/15191>
6. SAE®, F. (Enero de 2017). *Formula SAE® Rules 2017-18*. Recuperado el 25 de Julio de 2018, de SAE INTERNATIONAL: <http://www.fsaeonline.com/content/2017-18%20SAE%20Rules%20PRELIMINARY.pdf>
7. Smith, W. F. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales*. Mexico: McGRAW-HILL.
8. Stefano, M. D. (19 de 10 de 2017). *Motor and Racing*. Recuperado el 26 de 10 de 2018, de La Fibra de Carbono y su uso en el mundo automotriz: <https://www.motoryracing.com/pruebas/noticias/la-fibra-de-carbono-y-su-uso-en-el-mundoautomotriz/>
9. Stefano, M. D. (19 de Octubre de 2017). *Motor and Racing*. (MOTOR Y RACING) Recuperado el 12 de Octubre de 2018, de La Fibra de Carbono y su uso en el mundo automotriz: <https://www.motoryracing.com/pruebas/noticias/la-fibra-de-carbono-y-su-uso-en-el-mundoautomotriz/>
10. Tixi, J. y. (2015.). *Aplicación de materiales compuestos para la formación de guardabarros y tapas laterales de una moto de 125 cc, 4 tiempos*. Riobamba
11. Villacrés Toalombo Henry Israel, S. G. (2017). *Diseño aerodinámico y prototipado del vehículo Interprovincial ALFA-700 para Metálicas Pillapa*. Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
12. Williams F. Smith, H. (2006). *Fundamentos de la Ciencia e ingeniería de materiales*. Mc GrawHill.

Tabla 10 Comparación de propiedades del material y resultados aerodinámicos entre las fondos planos y difusores 2016 y 2018

FONDO PLANO Y DIFUSORES VEHÍCULO FORMULA SAE 2016		FONDO PLANO Y DIFUSORES VEHÍCULO FORMULA SAE 2018																																	
																																			
Elaborado por: Autores Fuente: Autores		Elaborado por: Autores Fuente: Autores																																	
MATERIAL COMPUESTO CON FIBRA DE CABUYA Y RESINA POLIESTER		MATERIAL COMPUESTO CON FIBRA DE CARBONO Y RESINA EPOFIX 300																																	
Peso del fondo plano con difusores en fibra de cabuya	16.1 kg	Peso del fondo plano con difusores en fibra de carbono	6.913kg																																
<table border="1"> <tr><td colspan="2">Material</td></tr> <tr><td>Assignment</td><td>FIBRA DE CABUYA</td></tr> <tr><td>Nonlinear Effects</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Thermal Strain Effects</td><td>Yes</td></tr> <tr><td colspan="2">Bounding Box</td></tr> <tr><td colspan="2">Properties</td></tr> <tr><td>Volume</td><td>1.2777e+007 mm<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Mass</td><td>16.61 kg</td></tr> </table>		Material		Assignment	FIBRA DE CABUYA	Nonlinear Effects	Yes	Thermal Strain Effects	Yes	Bounding Box		Properties		Volume	1.2777e+007 mm <sup>3</sup>	Mass	16.61 kg	<table border="1"> <tr><td colspan="2">Material</td></tr> <tr><td>Assignment</td><td>MATERIAL COMPUESTO EPOXI FIBRA DE CARBONO</td></tr> <tr><td>Nonlinear Effects</td><td>Yes</td></tr> <tr><td>Thermal Strain Effects</td><td>Yes</td></tr> <tr><td colspan="2">Bounding Box</td></tr> <tr><td colspan="2">Properties</td></tr> <tr><td>Volume</td><td>6.3412e+005 mm<sup>3</sup></td></tr> <tr><td>Mass</td><td>6.913 kg</td></tr> </table>		Material		Assignment	MATERIAL COMPUESTO EPOXI FIBRA DE CARBONO	Nonlinear Effects	Yes	Thermal Strain Effects	Yes	Bounding Box		Properties		Volume	6.3412e+005 mm <sup>3</sup>	Mass	6.913 kg
Material																																			
Assignment	FIBRA DE CABUYA																																		
Nonlinear Effects	Yes																																		
Thermal Strain Effects	Yes																																		
Bounding Box																																			
Properties																																			
Volume	1.2777e+007 mm <sup>3</sup>																																		
Mass	16.61 kg																																		
Material																																			
Assignment	MATERIAL COMPUESTO EPOXI FIBRA DE CARBONO																																		
Nonlinear Effects	Yes																																		
Thermal Strain Effects	Yes																																		
Bounding Box																																			
Properties																																			
Volume	6.3412e+005 mm <sup>3</sup>																																		
Mass	6.913 kg																																		
Densidad	1.3 g/cm <sup>3</sup>	Densidad	1.48																																
Módulo de elasticidad	3760 Mpa	Módulo de elasticidad	6100.06 Mpa																																
Relación de pón	0.25	Relación de pón	0.25																																
Resistencia de fluencia	112 Mpa	Resistencia de fluencia	331.91 Mpa																																
ANÁLISIS AERODINÁMICO		ANÁLISIS AERODINÁMICO																																	
																																			
																																			
Elaborado por: Autores Fuente: Autores		Elaborado por: Autores Fuente: Autores																																	
Área frontal	0.12357 m <sup>2</sup>	Área frontal	0.12357 m <sup>2</sup>																																
Velocidad	20.83 m/s	Velocidad	20.83 m/s																																
Coefficiente drag	0.6945	Coefficiente drag	0.88794																																
Coefficiente lift	-3.486	Coefficiente lift	-4.2929																																
Fuerza de sustentación	-114.47 N	Fuerza de sustentación	-131.039 N																																
Fuerzas de arrastre	22.81 N	Fuerzas de arrastre	27.1043N																																
Presión máxima	101 500 Pa (101 170 Pa)	Presión máxima	101 228 Pa																																
Presión mínima	100900 Pa (100.940 Pa)	Presión mínima	100 199 Pa																																

Elaborado por: Autores  
Fuente: Autores

## EVALUACIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE CON CONDUCCIÓN EFICIENTE A 2750 METROS DE ALTURA

### EVALUATION OF FUEL CONSUMPTION EFFICIENT DRIVING A 2750 METERS

Leguísamo-Milla, Julio <sup>1</sup>; Rocha-Hoyos, Juan <sup>1</sup>; Llanes-Cedeño, Edilberto <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Automotriz, Universidad Internacional SEK, Quito, Ecuador

Autor de correspondencia: julio.leguisamo@uisek.edu.ec

#### **RESUMEN**

En este artículo se compara el consumo de combustible en un motor mep a 2750 metros de altura sobre el nivel del mar, primero con un modo de conducción cotidiano y segundo con un modo de conducción ecológica. En un vehículo de la marca Chevrolet modelo Aveo family de cilindraje 1498 cm<sup>3</sup> debido a que al modo de conducción ecológica determina parámetros de velocidad, cambio de marcha, utilización del freno de máquina, bajada de pendientes y evita frenazos bruscos; que disminuyen el consumo de combustible. Se realizó una prueba en ruta, en base a protocolos de pruebas establecidos por el Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares (CCICEV). Los resultados revelan que al aplicar un modo de conducción ecológica se reduce el consumo instantáneo de combustible, obteniendo beneficios de ahorro de combustible y mayor rendimiento de kilómetros por galón.

*Palabras clave: conducción eficiente, consumo de combustible, prueba de ruta*

#### ABSTRACT

This article compares fuel consumption on a motor mep 2750 meters above sea level, first with a second mode for everyday driving and eco-driving mode. In a vehicle model Chevrolet Aveo family of cylinder capacity 1498 cm<sup>3</sup> because eco-driving mode determines speed parameters, gear shift, using the machine brake, driving downhill and avoid sudden braking; decreasing fuel consumption. A test was performed on route, based on test protocols established by the Technology Transfer Center for Training and Research Vehicle Emissions Control (CCICEV). The results show that by applying eco-driving mode the instantaneous fuel consumption is reduced by obtaining benefits of fuel economy and performance per gallon.

*Keywords: efficient driving, fuel consumption, road test*

## INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire constituye en la actualidad uno de los principales problemas ambientales de las zonas urbanas en el mundo, tanto en los países desarrollados como en aquellos en vías de desarrollo; en los primeros, por un alto volumen y diversificación de la producción industrial y un flujo intenso de vehículos automotores, mientras que en los segundos por causa del desarrollo no planificado de las escasas industrias, el uso de tecnologías obsoletas en la producción, los servicios y el transporte, la mala calidad del saneamiento básico y el crecimiento urbanístico no planificado (Ministerio del Ambiente, 2010).

Uno de los focos de generación de contaminación del aire más importante en la actualidad son los vehículos de combustión (Rogula et al., 2008). De hecho, diversos estudios sitúan las partículas emitidas por estos vehículos como causantes de enfermedades respiratorias como el asma (Kinney et al., 2000). Estudios realizados por Andrade, Arteaga, y Segura (2016), revelan a los vehículos de combustión interna como uno de los principales causantes del calentamiento global debido a la emisión de un considerable volumen de CO<sub>2</sub>.

A nivel mundial para reducir el impacto ambiental de los vehículos se han desarrollado algunas opciones con el fin de disminuir la demanda de combustible y por ende las emisiones contaminantes. Las soluciones se clasifican en: soluciones basadas en la tecnología, uso de biocombustibles, mejoras en la aerodinámica, reducción del peso del vehículo, entre otros (Corcoba, 2014).

Los diferentes fabricantes de vehículos han determinado que hay también otra solución para reducir las emisiones y consumo de combustible en los vehículos, que consiste en la forma de conducción del auto. El comportamiento del conductor influye de forma importante en el consumo de combustible, la suavización de la conducción, la velocidad, el uso del aire acondicionado o la elección de la ruta; que son variables que afectan tanto al consumo como a la seguridad. De esta manera aparece el Eco-driving el cual se basa en la optimización de las variables que controla el conductor como el acelerador, el freno, la marcha o el sistema de aire acondicionado para ahorrar combustible y reducir las emisiones contaminantes de cualquier vehículo a diésel o gasolina, de cualquier cilindraje, y cualquier tecnología (McIlroy y Stanton, 2016; Cedeño et al., 2018).

En estudio realizado por Mierlo et al., (2004), los autores analizaron la influencia del estilo de conducción y del tráfico en la emisión de gases contaminantes y el consumo de combustible. Sus conclusiones fueron que, aplicando los consejos eco-driving, se puede ahorrar entre un 5% y un 25% de combustible. La Comisión para el Transporte Integrado en Reino Unido realizó un estudio sobre el impacto de las técnicas de conducción eficiente en el consumo de combustible. Los resultados mostraron un ahorro del 7% de combustible y además se determinó que esta técnica puede reducir el mantenimiento correctivo de un automotor (*Transport and Climate Change*, 2007).

Haworth y Symmons (2001), determinaron que esta técnica de conducción tiene además efectos positivos en la seguridad. Los resultados mostraron que los programas de aprendizaje sobre conducción eficiente pueden reducir los accidentes de tráfico alrededor de un 35%, el consumo de combustible un 11% y la emisión de gases contaminantes entre un 25% y 50% según Rocha et al., (2018). En otro estudio sobre la efectividad de los cursos de eco-driving para las furgonetas se obtuvo una disminución del 40% de los accidentes y un aumento en la eficiencia del consumo de combustible del 50% (Moss, y Hedges, 1996).

Investigaciones de la política de conducción ecológica han informado sobre reducciones potenciales en el consumo de combustible y las emisiones de CO<sub>2</sub> que van del 5% al 40% respectivamente. Los resultados de esta revisión y evaluación revelan que la política de conducción ecológica tiene el potencial de reducir la emisión de CO<sub>2</sub> y el consumo de combustible en ciertas circunstancias (*I Easy on the Gas*, 2012), pero en el tráfico congestionado del centro de la ciudad existen muchos puntos de vista conflictivos en la literatura, lo que genera dudas sobre la efectividad de la política en tales circunstancias. (Md Saniul, y McNabola, 2014).

El propósito de este estudio es determinar si al conducir un vehículo de combustión interna, con un modo de conducción eficiente a 2750 metros con respecto al nivel del mar, en una prueba de ruta dinámica, se reduce el consumo de combustible en relación con un modo de conducción normal o denominado agresivo. Con los resultados se busca fomentar en la población el modo de conducción ecodriving para reducir la contaminación ambiental y obtener mayor rendimiento del combustible por kilómetro.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El vehículo utilizado en las pruebas es un Chevrolet Aveo family Std con transmisión manual, que no han sido modificados, las especificaciones se pueden encontrar en la Tabla 1.

Para obtener los datos se emplea la herramienta de escaneo OBDLink<sup>®</sup> LX, la cual es un adaptador Bluetooth OBD-II que puede convertir su teléfono inteligente, tableta o portátil en una sofisticada herramienta de diagnóstico de escaneo, ordenador de a bordo, que permite monitorear el rendimiento de un auto en tiempo real. Esta herramienta se utiliza en la investigación debido a que este equipo tiene una opción que permite contabilizar la cantidad de combustible consumida en el trayecto en tiempo real, con la posibilidad de visualizar consumo total y consumo promedio en L/km, cantidad total de combustible en galones, distancia recorrida, revoluciones por minuto, velocidad, carga y temperatura.

Tabla 1: Especificaciones técnicas del vehículo de pruebas

Datos	Vehículo
Año	2013
Combustible	Gasolina extra
Cilindraje motor	1498 cc
Transmisión	Manual
Torque	127,4 N.m @3000 rpm
Potencia	83 hp @5600 rpm
Cilindros	4 en línea
Tipo	4 CIL SOHC
Posición	Delantera transversal
Relación de compresión	9,5:1
Diámetro x Carrera	76,5 x 81,5 mm
Sistema de Inyección	MPFI
Sistema de encendido	DIS – Chispa perdida

Elaborado por: Autor  
Fuente: Fabricante Vehículo

## PREPARACIÓN DEL VIAJE

La conducción ecológica es un conjunto de pasos, técnicas y comportamientos que los conductores pueden emplear antes, durante y después de realizar un recorrido en un vehículo. El antes corresponde a la preparación del automotor, durante la conducción se modifica el estilo de manejo y después en la revisión de los datos del viaje, para determinar si hay ahorros en términos de uso de combustible, rendimiento por kilometraje y reducción de las emisiones contaminantes provenientes del uso del vehículo. Además, las distancias recorridas con técnicas de conducción ecológica pueden estar vinculados a la mejora de la seguridad vial. Por otra parte, el uso de tales técnicas no aumenta los tiempos de viaje (*I Easy on the Gas*, 2012).

Hay una serie de medidas que los conductores pueden tomar para mejorar la eficiencia del vehículo. Éstos se pueden dividir en dos categorías: una previaje y otra durante el viaje (Barkenbus, 2010). Las medidas a considerar antes del viaje son: mantenimiento preventivo del vehículo realizado, presión de los neumáticos correcta, los conductores deben mantener las ventanas cerradas a velocidades más altas, conocer la ruta y calentar el vehículo (un motor frío utiliza más combustible que un motor caliente).

Las instrucciones que se debe seguir para aplicar ecodriving son:

- Aplicar el aire acondicionado sólo cuando sea necesario.
- Evitar al máximo que el motor trabaje en ralentí, en caso de una pendiente bajar en marcha y los motores deben estar apagados para las esperas de un minuto o más.
- Los cambios de marcha deben hacerse entre 2 000 y 2 500 rpm.
- Anticipación para mantener el impulso del vehículo y evitar los acelerones y frenazos bruscos.
- Utilizar el frenado del motor para desacelerar.
- Quitar presión sobre el acelerador para reducir el flujo de combustible al motor a prácticamente cero.

Se desarrolla una prueba de ruta para cuantificar el desempeño de los vehículos en términos de ahorro de combustible al aplicar el modo de conducción ecodriving. En esta investigación se utiliza una ruta de ciclo combinado en la ciudad de Ibarra como se indica en la Figura 1, tomando como referencia una ruta de prueba realizada en la ciudad de Quito, que utiliza el CCICEV cuando realiza pruebas de consumo de combustible; la cual se determinó aplicando un protocolo de pruebas, en base a la orografía del terreno, densidad del tráfico e infraestructura vial en un estudio de titulación de maestría desarrollado en la Escuela Politécnica Nacional (Quinchimbla, y Solís, 2017), mediante el cual se permite evaluar el consumo de combustible en motores ciclo Otto.

La ruta seleccionada en el estudio base cumplen con todos los requerimientos a tener en cuenta según la norma SAE J1082 que son: carretera en buen estado de asfalto o concreto, pista plana con la longitud indicada, una pendiente no mayor a 10 %, carretera seca y limpia, pista sin cruces peligrosos, temperatura ambiente entre  $-1^{\circ}\text{C}$  y  $32^{\circ}\text{C}$ , no debe existir presencia de lluvia o neblina y velocidad del viento no mayor a 24 km/h. Esta ruta inicia en el parque Vicente Moncayo y termina en la ciudad de Atuntaqui, está constituida por un tramo urbano 14,4 km y un tramo en carretera con recorrido de 11,1 km, la temperatura ambiente es de  $16^{\circ}\text{C}$ , se la realiza a las 9:00 am, la temperatura del motor es de  $80^{\circ}\text{C}$ .

Antes de proceder a la medición de consumo de combustible en la prueba de ruta de conducción, es indispensable establecer el correcto estado y funcionamiento del vehículo seleccionado para la investigación. Este procedimiento se efectúa con el fin de asegurar la confiabilidad y fiabilidad de los resultados obtenidos en las mediciones, y disminuir

el margen de variabilidad por el estado mecánico del automotor. Se realizó un mantenimiento preventivo y una revisión del correcto estado del sistema mecánico y de inyección electrónica de combustible, para certificar la idoneidad del vehículo.

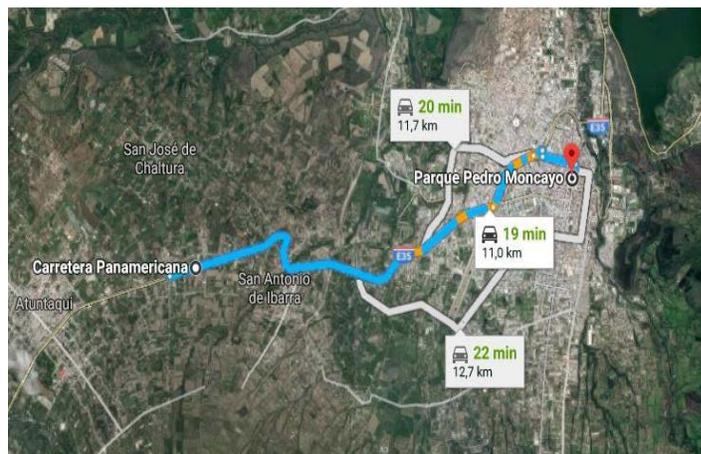


Figura 1: Ciclo de prueba en Ibarra

Se realizaron cinco pruebas de ruta con conducción normal en la cual se le indicó al conductor que maneje como lo hace de manera habitual; posteriormente se le dio una inducción al conductor sobre el modo de manejo de conducción ecológica y se realizaron cinco pruebas de ruta aplicando estas instrucciones, para determinar si este tipo de conducción reduce el consumo de combustible. Los datos fueron grabados con el software de prueba, para su posterior tabulación; mediante el software se obtuvieron los datos de: consumo total, consumo instantáneo, consumo por hora, consumo de recorrido actual, distancia recorrida, rpm y velocidad del vehículo. Para determinar si los datos obtenidos en la experimentación son fiables debido a que pueden presentar desviaciones con respecto al objetivo específico y se pueden manifestar en forma de datos inexactos, produciéndose una excesiva variabilidad respecto a los valores deseables se realizó el control de rangos (Portilla, y Caiza, 2010).

## RESULTADOS

En la Tabla 2 se puede observar los valores de consumo de combustible en las pruebas de ruta sin y al aplicar la técnica de manejo ecodriving o conducción ecológica.

Tabla 2: Consumo de combustible por distancia recorrida

Técnica de Conducción (sin ecodriving)	Distancia Recorrida (km)	Consumo de Combustible (l)	Técnica de Conducción (con ecodriving)	Distancia Recorrida (km)	Consumo de Combustible (l)
Prueba 1.1	25	1,70	Prueba 2.1	25	1.43
Prueba 1.2	25	1,65	Prueba 2.2	25	1.43
Prueba 1.3	25	1,63	Prueba 2.3	25	1.47
Prueba 1.4	25	1.65	Prueba 2.4	25	1.50
Prueba 1.5	25	1.72	Prueba 2.5	25	1.45
Promedio	25	1.67	Promedio	25	1.46

Elaborado por: Autor

Fuente: Autor

La Figura 2 representa el consumo de combustible total en litros, comparando los resultados promedio de las pruebas de ruta, sin aplicar y al manejar con un modo de conducción eficiente. El menor consumo de combustible se obtiene al manejar aplicando ecodriving que corresponde a 1,46 litros por 25 km de recorrido, mientras que al conducir sin aplicar una técnica de manejo ecológica el consumo es de 1,67 litros en la misma distancia; lo que representa una reducción del 12,57 % del consumo de combustible. El combustible consumido al ejecutar una conducción normal tiene un valor de \$ 0,55 y aplicando ecodriving el valor es de \$ 0,48, lo que da un ahorro \$ 0,07. Además, se debe mencionar que aplicando una conducción eficiente en un galón de combustible se tiene un rendimiento de 77,73 km que es 14,37 % mayor que el rendimiento al no aplicar ecodriving. De acuerdo a los resultados obtenidos por Mierlo et al., (2004), en los cuales la influencia del estilo de conducción aplicando los consejos eco-driving se ahorra entre un 5 % y un 25 % de combustible, se puede afirmar que el estudio presenta datos confiables por estar por dentro del rango referenciados por otros estudios.

Con respecto a los datos de Baric et al., (2013), donde se determina que con una capacitación al personal sobre manejo ecológico en una flota de 1500 vehículos se redujo el consumo en 32,27%. Por lo cual al aplicar estas consideraciones al estudio objeto de investigación se puede lograr similar porcentaje de ahorro de combustible.

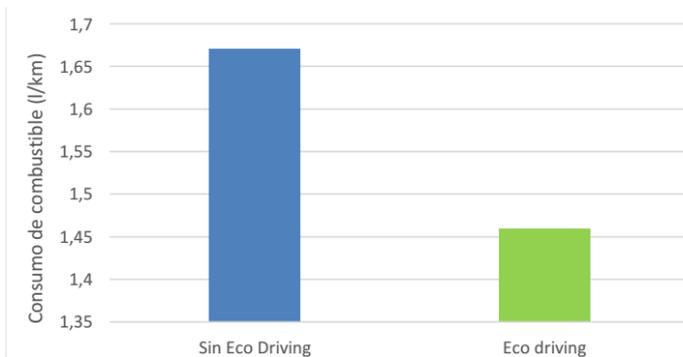


Figura 2. Consumo de combustible en pruebas de ruta

En la Figura 3 se indica el consumo instantáneo de combustible en relación con la distancia recorrida en la prueba dinámica de 25 km aplicando una conducción eficiente y sin aplicar. La curva de cada tipo de conducción es el promedio de las cinco pruebas efectuadas. Se observa una mayor presencia de valores máximos en la prueba sin ecodriving que ascienden hasta 9,12 L/h y mantiene valores de pico altos como son 8,94 L/h y 8,40 L/h, a diferencia de la prueba al aplicar ecodriving donde el valor es de 7,13 L/h y los otros valores de pico altos son de 6,64 L/h y 6,09 L/h. El valor mínimo de consumo que se obtiene sin aplicar ecodriving es de 0,84 L/h y al aplicarlo es de 0,49 L/h, de igual manera se mantiene la tendencia de mayor consumo al no aplicar la conducción eficiente indicando un aumento del 35% con respecto a la conducción ecológica. Dentro de los rangos de desplazamiento a velocidades medias se puede mencionar que el consumo instantáneo de combustible es mayor sin la conducción ecológica.

De acuerdo al estudio de Rionda et al., (2012) en el cual se determinó que aplicando ecodriving de una manera profesional por cada 100 km se ahorra 470 mL de gasolina. Se puede mencionar que esta tendencia es real debido a que como se puede observar en la Figura 3, el consumo instantáneo de combustible es menor al aplicar un estilo de conducción eficiente. Al hacer un promedio de los consumos instantáneos al aplicar la conducción ecológica hay un consumo de 1,93 L/h y sin aplicar el consumo promedio es de 2,8 L/h, lo que indica un incremento de consumo de combustible de 45,07 %

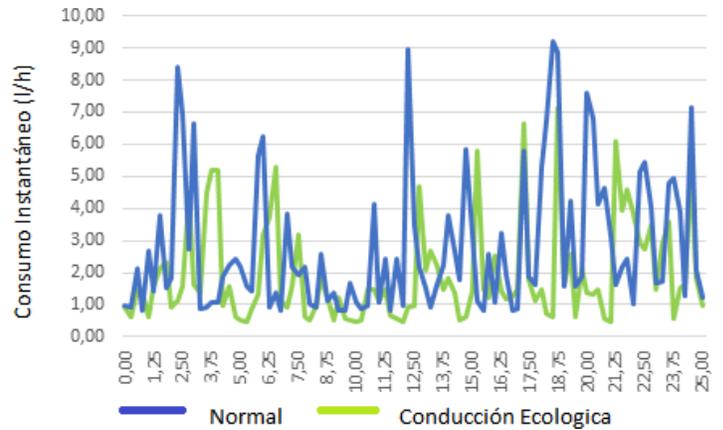


Figura 3: Consumo de combustible instantáneo

## CONCLUSIONES

En el presente estudio los resultados demuestran una reducción del consumo de combustible de un vehículo de combustión interna MEP al utilizar un modo de conducción eficiente con respecto al modo de conducción normal.

En las pruebas dinámicas se obtiene una reducción del 12,57% del consumo de combustible al conducir aplicando ecodriving, lo que evidencia una diferencia de rendimiento del combustible de 9,77 kilómetros por galón de combustible.

Mediante el análisis de consumo instantáneo de combustible se determinó que tratando de mantener una velocidad constante y efectuando los cambios de marcha entre 2000 y 2500 rpm, se optimiza el consumo instantáneo de combustible debido a una mejor eficiencia volumétrica que se traduce en ahorro de combustible, debido a que se trata de mantener estables las revoluciones que influye directamente en la masa de aire real admitida y la masa de combustible inyectada, planteándose la hipótesis si se reducen las emisiones contaminantes también.

## REFERENCIAS

- Andrade, Hernán J.; et al. Emisión de Gases de Efecto Invernadero Por Uso de Combustibles Fósiles En Ibagué, Tolima (Colombia). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* [en línea], 2016, (Colombia) 18 (1) pp.103-112. [Consulta: 01 agosto 2018]. ISSN 0122-8706. Disponible en: [http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num1\\_art:561](http://dx.doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:561)
- Baric, D.; et al. Efectos de la educación ECO-DRIVE en la reducción del consumo y de CO<sub>2</sub>. *Promet- Tráfico y Transporte*, n° 5(2013) (España) pp. 262-272
- Barkenbus, J. Eco Driving: An Overlooked Climate Change Initiative. *Energy Policy* [en línea], 2010, (United State of America) 38(2) pp. 762-769. [Consulta: 26 julio 2018]. ISSN 0301-4215. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/221992061\\_Eco\\_driving\\_An\\_overlooked\\_climate\\_change\\_initiative](https://www.researchgate.net/publication/221992061_Eco_driving_An_overlooked_climate_change_initiative)
- Cedeño, E. A. L.; et al. Evaluación de emisiones de gases en un vehículo liviano a gasolina en condiciones de altura. Caso de estudio Quito, Ecuador, *Enfoque UTE*, vol. 9, no 2, (2018), pp. 149-158.
- Corcoba Magaña, Víctor. *Eco-driving: ahorro de energía basado en el Comportamiento del Conductor* (Trabajo Titulación).

- (Doctorado) Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, España. 2014. pp. 1-90.
6. Haworth, Narelle; Symmons, Mark. *The Relationship between Fuel Economy and Safety Outcomes*. Monash University Victoria-Australia: Australian Transport Safety Bureau, 2001. ISSN 07326 1487 2. pp. 1-67.
  7. *I Easy on the Gas*. London: RAC Foundation, 2012. P 112
  8. Kinney, P.; et al. Airborne Concentrations of PM (2.5) and Diesel Exhaust Particles on Harlem Sidewalks: A Community-Based Pilot Study. *Environ Health Perspect.*, vol. 108, n° 3 (2000) (United State of America) pp. 213–218.
  9. McIlroy, Rich C.; Neville, Stanton. What Do People know about Eco-Driving?. *Ergonomics*, vol. 60, n° 6 (2016), (United Kingdom) pp. 754–69.
  10. Md Saniul, A.; McNabola, A. A Critical Review and Assessment of Eco-Driving Policy & Technology: Benefits & Limitations. *Transport Policy* [en línea], 2014 (England) 35 pp. 42- 49 [Consulta: 27 julio 2018]. ISSN 0967-070X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.05.016>
  11. Mierlo, J.; et al. Driving Style and Traffic Measures-Influence on Vehicle Emissions and Fuel Consumption. *Journal of Automobile Engineering* [en línea], 2004, (Belgium) 218 (1) pp. 43-50. [Consulta: 24 julio 2018]. ISSN 09544070. Disponible en: <https://doi.org/10.1243/095440704322829155>
  12. Moss, P.; Hedges, D. Costing the Effectiveness of Training: Case Study 1 – Improving Parcelforce Driver Performance. *Industrial and Commercial Training* [en línea], 1996, (United State of America) 28 (3) pp. 14–18. [Consulta: 26 julio 2018]. ISSN 0019-7858. Disponible en: <https://doi.org/10.1108/00197859610115430>
  13. Moss, P.; Hedges, D. Costing the Effectiveness of Training: Case Study 1 – Improvin Parcel force Driver Performance. *Industrial and Commercial Training* [en línea], 1996, (United State of America) 28 (3) pp. 14–18. . [Consulta: 26 julio 2018]. ISSN 0019-7858. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.021>
  14. *Plan Nacional Calidad Del Aire*. Quito: Ministerio de Ambiente, 2010. P. 90
  15. Portill Aguilar, Angel Adalberto, & Caiza Jácome, Pablo Geovanny. *Determinación de la influencia de la altura en las emisiones contaminantes de un vehículo con motor de ciclo Otto, de inyección electrónica de gasolina*. (Trabajo de titulación). (Maestría) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2010. pp. 62-69.
  16. Quichimbla Pisuña, Fredy Eduardo & Solís Santamaría, Javier Milton. *Desarrollo de ciclos de conducción en ciudad, carretera y combinado para evaluar el rendimiento real del combustible de un vehículo con motor ciclo Otto en el Distrito Metropolitano de Quito*. (Trabajo de titulación). (Maestría) Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador. 2017. pp. 1-163.
  17. Rionda, A.; et al. Sistema tutor para la conducción eficiente de vehículos de combustión. *IEEE-RITA*, vol. 7, n° 3 (2012) (España) pp. 133–140
  18. Rocha-Hoyos, J.; et al. Estudio de un Motor a Gasolina en Condiciones de Altura con Mezclas de Aditivo Orgánico en el Combustible. *Información tecnológica*, vol. 29, no 5, (2018), pp. 325-334.
  19. Rogula, Kozłowska W.; et al Influence of Vehicular Traffic on Concentration and Particle Surface Composition of PM10 and PM 2.5 in Zabrze. *Polish Journal of Enviroement*, vol. 17, n°4 (2008), (Poland) pp. 539–538.
  20. SAE J1082. *Fuel Economy Measurement Road Test Procedure*.
  21. *Transport and Climate Change*. London: Commission for Integrated Transport, 2007. P 108

## LEAN MANUFACTURING EN APLICACIÓN DE MEJORAS DE PRODUCTIVIDAD DE CAJAS ELÉCTRICAS

Velasco, Jenny <sup>1</sup>; Orozco, Jhonny <sup>1</sup>; Fuertes, Marcelino <sup>1</sup>;  
García, Eduardo <sup>1</sup>; Cayán, Juan <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

<sup>2</sup> Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador

*Correspondencia:*

jennyli\_92@hotmail.com, ingjmorozco@gmail.com, v\_fuertes@esPOCH.edu.  
ec.edugarciac\_87@hotmail.com, jcayanmartinez@yahoo.es.

### **RESUMEN**

La aplicación de las herramientas lean manufacturing en la corrección de la productividad en las cajas metálicas monofásicas 300\*200\*125 Marco Plástico, EEQ viene a ser uno de los problemas a corregir del 35,1 % de los porcentajes de fallas en este tipo de elemento, analizando la causa raíz del problema se obtiene uno de los más urgentes a tratar que la pintura en micrajes con el 21,1% de fallas como el máximo valor obtenido para un día determinado de producción, por la falta de uniformidad al realizar la aplicación de la capa de pintura teniendo por consecuencia la calidad del producto bajo y el costo de producción alto, al detectar la causa raíz, al problema de exceso de micraje en la pintura para las cajas metálicas monofásicas 300\*200\*125 Marco Plástico, EEQ, por medio de las VMS, los 5 ¿porque?, ISHIKAWA, actuando inmediatamente en el problema llegando a variar a un 15% de porcentaje de falla y a un 8% en excedente de pintura es decir el doble de la producción y venta en stock de productos terminados con estándares de calidad adecuados, por medio de la socialización y aplicación de la cultura lean mejorando con el adiestramiento del personal por medio de un protocolo de terminados lo que muestra que una reducción en el porcentaje de pintura llegando a un porcentaje de 1.8% fallas en el excedente de micraje, disminuyendo un 19.3% del exceso de fallas aplicando la estandarización en el procedimiento de los elementos permite obtener el incremento de producto útiles y aplicativos en las empresas ecuatorianas donde se obtiene más ganancia con menos desperdicios.

*Palabras clave: Lean, Manufactura, estandarización, producción, desperdicios.*

### **ABSTRACT**

The application of lean manufacturing tools in the correction of productivity in single-phase metal boxes 300 \* 200 \* 125 Plastic Frame, EEQ is one of the problems to correct of 35.1% of the percentage of failures in this type of element, analyzing the root cause of the problem is one of the most urgent to treat that the painting in microns with 19.41% of faults, for the lack of uniformity when making the application of the paint layer resulting in quality of the low product and the high production cost, when detecting the root cause, to the problem of microns excess in the paint for the single-phase metal boxes 300 \* 200 \* 125 Plastic Frame, EEQ, by means of the VMS, the 5 ¿why ?, ISHIKAWA, acting immediately on the problem, varying to a 15% failure rate and an 8% surplus of paint that is double the production and sale in stock of finished products with adequate quality standards. Through the socialization and application of the lean culture, improving with the training of the staff through a protocol of finished what shows that a reduction in the percentage of painting reaching a percentage of 1.8% failures in excess microns, decreasing 19.3% of the excess of faults applying the standardization in the procedure of the elements allows obtaining the increase of useful and application products in the Ecuadorian companies where more profit is obtained with less waste.

*Keywords: Lean, Manufacturing, standardization, production, scrap.*

## INTRODUCCIÓN

Hoy en día existen diversas maneras para realizar un determinado sistema productivo basado en una producción eficiente, sin embargo, son tantas las industrias las cuales ofertan el mismo producto con precios muy asequibles con alta calidad, porque la competencia en la globalización es un factor muy importante, dentro de un sector competitivo; tal es el caso de la empresa Ecuatoriana de Matricera ECUAMATRIZ CIA. LTDA de la ciudad de Ambato, la misma que se dedica a la fabricación y producción de elementos metalmecánicos y plásticos de ingeniería tales como: cajas para medidores de luz, carretillas, palas, piezas para sistema de escape, contenedores para basura., entre otros por tal motivo con la evolución de la sociedad se presentan herramientas que permiten mejorar los diversos sistemas productivos por medio de una transición de una cultura de eficiencia a una cultura de efectividad, es decir se desea generar un entorno de manufactura de índole mundial cuyos componentes básicos son: la producción ligera y manufactura ágil, a través de una filosofía o forma de pensar que mejore un sistema productivo por medio de la mejora continua, tal filosofía hace referencia al Sistema Lean.

La filosofía Lean permite crear el máximo valor posible dentro de un sistema a través de diversos enfoques, es decir el sistema Lean trata de eliminar el desperdicio y lo que no añade valor (1). para una planeación agregada para ello se hace uso de hojas de cálculo, y métodos de optimización de recursos, persiguiendo la reducción de inventarios mediante el uso del método de producción JIT 'just in time', basado en el análisis puntual del principio de Pareto y el diagrama de causa y efecto, los cuales permitieron mitigar el problema de exceso de micraje en la Sección de Pintura durante el proceso de elaboración de las cajas metálicas Monofásica 300\*200\*125 Marco Plástico E.E.Q, el uso de las herramientas Lean permite mejorar la toma de decisiones técnicamente viables y económicamente mejoradas puesto que la empresa maneja un método de producción afectando a largo y corto plazo dentro del sistema productivo, aumentando la productividad y calidad del producto ofrecido, por tratarse de un proceso de mejora continua, razón por la cual la empresa debido al desperdicio creciente en las 4 áreas, comprendiendo:

- 1.- corte – conformado
- 2.- soldadura-maquinado-ensamblaje
- 3.- pintura
- 4.- inyección-armado.

Debido a los crecientes desperdicios en las diferentes áreas se busca implementar dicha filosofía porque los pilares de dicha filosofía son:

- 1.- La mejora continua
- 2.- El control total de calidad
- 3.- La eliminación del despilfarro
- 4.- Aprovechamiento de la cadena de valor
- 5.- Participación de los operarios durante el proceso.

## MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología de la investigación está basada en un estudio de confiabilidad porque está fundamentado en un análisis de fallas de un producto, determinando así la causa y la magnitud de la falla haciendo uso de un análisis causa-raíz, a través de la matriz de los 5 ¿porque? e Ishikawa, el mismo que ha sido realizado con un plan de muestreo para 20 cajas eléctricas dentro de la sección de pintura, las mismas que han sido seleccionadas al azar, durante un periodo de tiempo de 30 minutos, para cada orden de fabricación receptada, el modelo estadístico predominante porque las unidades experimentales son homogéneas con respecto a los factores que afectan a la variable

respuesta fue el diseño completamente al azar, las herramientas de la calidad utilizadas para dar solución al problema persistente con el exceso de pintura de los componentes de la caja fueron:

- Diagramas de Causa y Efecto
- Gráficos de control
- Histogramas
- Gráficos de Pareto

Se procede a realizar un análisis efectivo de estos elementos, encontrando la causa del problema presentado y por ende se obtiene una solución adecuada para dicho defecto, el mismo que ha sido realizado en la empresa Ecuatoriana de Matriceria «ECUAMATRIZ» Cía. Ltda. De la ciudad de Ambato en el año 2018, en el de mes septiembre.

## MARCO REFERENCIAL

Las Herramientas Lean son de gran ayuda al momento de poner en marcha una nueva manera de optimizar los recursos dentro de la compañía, todas las técnicas hacen referencia al mejoramiento de cada proceso es decir el objetivo de implementar una nueva idiosincrasia con el sistema Lean es lograr que dentro de las 4 áreas en la empresa Ecuamatrix tengan su propio autocontrol de calidad, haciendo referencia al proceso JIT "just in time" es decir la mejor forma de eliminar desperdicios en la producción de los artículos que esta empresa oferta es producir con la máxima calidad, al menor costo, utilizando los tiempos más óptimos para el ciclo productivo, de la misma forma limitando los recursos ociosos, es importante tener una clara visión del mercado competitivo dentro de la industria metalmecánica hoy en día pues son muchas las empresas que ofertan los mismos productos a bajo costo y alta calidad, por lo tanto la ejecución de estas herramientas permiten desarrollar una idea precisa de competitividad, ya que no se busca ser los mejores entre los mediocres sino, sino ser los mejores entre los mejores, el sistema JIT consiste por lo tanto en "producir y servir productos acabados justo a tiempo de ser vendidos, producir partes justo a tiempo de ser ensambladas y formar los productos acabados, producir semielaborados justo a tiempo de ser convertidos en partes o en otros semielaborados y comprar materias primas justo a tiempo de ser incorporadas en el proceso de fabricación." (2) por tanto los objetivos fundamentales de esta filosofía hacen referencia a la necesidad de atacar los principales problemas que se presentan en el momento de la producción.

El producto Scrap o desechos y residuos derivados dentro del desarrollo del proceso industrial presentes en las 4 áreas de la planta traen consigo pérdidas económicas para cada área de acuerdo al tipo de proceso que se genera; para mejorar el funcionamiento global de la empresa es necesario atacar los siete desperdicios principales que se generan durante el mismo los cuales son : Sobreproducción, Exceso de inventarios, Movimientos innecesarios, Transporte interno, Fallas de calidad y labores de reprocesamiento y ajustes, Tiempos de espera, Fallas de diseño en el proceso. (2).

Los fundamentos en cual basa su operación la temática JIT hace referencia al autocontrol de defectos por parte de los propios operarios es decir el autocontrol de calidad, de tal manera que ante un eventual situación anormal el proceso se detenga de manera automática o manual, logrando reducir el número de unidades defectuosas que avanza en el proceso. (3), es decir el objetivo al aplicar esta metodología es que cada operario se constituya en un inspector de calidad dentro de su área de competencia evitando así el transcurrir del scrap hasta la sección última de la etapa final la misma que es Armado en la cual es tarde determinar la eficiencia y eficacia de las operaciones ejecutadas dentro de las áreas correspondientes.

## METODOLOGÍA

Durante la aplicación de uno de los fundamentos de la metodología JIT la presente investigación se basó su estudio en el uso de la metodología JIDOKA concerniente al área de Control de Calidad en la empresa. ECUAMATRIZ CIA. LTDA, al dar una solución efectiva para mejorar el problema de las fallas de calidad y labores de reprocesamiento y ajuste para el área de Pintura de dicha empresa, no obstante es importante indicar, el proceso productivo para la construcción de una caja metálica monofásica 300\*200\*125 Marco Plástico el mismo que inicia en el área de corte y conformado el cual es el lugar donde se dimensionan y se dan forma las planchas de acero según el modelo de caja a fabricar acorde a los requerimientos de la demanda.



Figura 1: Área corte y Conformado

A continuación, pasan al área de soldadura- maquinado y ensamblaje que es el lugar donde se ensamblan mediante soldadura las distintas partes y piezas.



Figura 2: Área Soldadura-maquinado y ensamblaje

Luego se procede al área de pintura previo a ello las cajas metálicas reciben un proceso químico de fosfatizado el cual se realiza en las tinas de titulación para acondicionar la superficie para recibir y retener pinturas y protegerlas de la corrosión debajo de la capa de pintura. (4) . Antes de recibir la capa de pintura, pasan al proceso de secado por medio de un horno estacionario el cual mantiene su temperatura a 100 grados Celsius , para las 4 partes que conforman una caja metálica: tapa, base compuerta y rejilla por medio de una cadena cuya velocidad es de 1.3 m/min , seguidamente pasa a la cámara de pintura con un tiempo aproximado de pintura de 10-12 segundos para las tapas y bases respectivamente, posteriormente las partes pasan al horno Continuo de curado para pintura electrostática el mismo que mantiene su temperatura de 210 grados Celsius (5).



Figura 3: Área de pintura

Una vez completado el proceso de pintura pasa a la última fase, el proceso de Inyección y armado el lugar donde se ensamblan las distintas partes de una caja metálica, comprendida por las partes: base, tapa, rejilla, compuerta, tapones, riel monofásico, kit de tornillos, vidrio, marcos plásticos, acorde al plano de trabajo existente dentro del área, realizando un control de calidad riguroso para cada componente con el fin de evitar fallas de calidad y el reprocesamiento de los diversos componentes de la caja



Figura 4: Área Armado

Con la implementación de uno de los pilares de la filosofía Lean, se hace posible la reducción del *scrap* generado dentro de cada sección de producción, con la eliminación de desperdicios, los mismos que son generados en el área de pintura la cual representa un cuello de botella en referencia a los costes de producción y calidad defectuosa por el exceso de micraje presente en la capa de pintura, por lo cual para implementar la mejora de calidad dentro del proceso productivo se hace referencia al pilar de los elementos del TPS "Toyota Production System" del cual el principal artífice ha sido *Taiichi Ohno* , sirviendo como punto de partida a un sistema de producción de Toyota junto a la calidad total han suministrado a dicha empresa un claro inicio de ventaja competitiva (6), en base a estos ejemplos de producción eficiente y efectiva por medio del sistema *JIDOKA* el cual se enfoca en el control y mejora de la calidad en procesos, haciendo uso de las herramientas 7 herramientas de la calidad para realizar un mejor análisis de los datos plasmados fue necesario apoyarse en las técnicas básicas de calidad utilizadas para el Análisis y Solución (AYSP) de problemas con respecto a la misma., por tanto el procedimiento a seguir fue el siguiente:

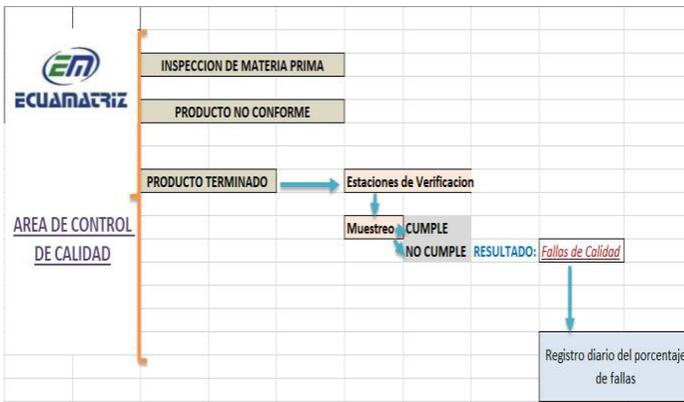


Figura 5: Esquema procedimiento de calidad interno Ecuamatriz

Las soluciones al problema generado por el porcentaje de defectos en las fallas de calidad están relacionadas por el porcentaje de fallas existentes dentro de la sección de pintura motivo por el cual es importante establecer un registro diario del FTQ ‘First Time Quality’ estableciendo el parámetro de la calidad a la primera vez., este indicador muestra la tendencia de calidad en términos de porcentajes de producto conforme con respecto al producto no conforme (7) para el proceso productivo dentro de las secciones de armado como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1: Estatus de Calidad Septiembre 2018

SECCION ARMADO - SEPTIEMBRE 2018						
OF	PRD DUC TO	Cantidad	cant. NC (EST. 2)	% NC	FTQ MENSUAL(%)	META ESTABLECIDA 96%
5025	Carretilla reforzada Naranja 56 litros EME: fallas de pi	100	4	4,00%		
5039	Caja Met Mon 300'200'125 Marc Plast EEQ	10000	70	0,70%		
5055	Carretilla reforzada Naranja 56 litros EME, rueda azul	100	3	3,00%		
5047	Carretilla reforzada Maciza con eje EME	50	0	0,00%		
5080	Carretilla reforzada naranja 56 litros EME	100	21	21,00%		
5096	Caja Met Mon 300'200'125 Marc Plast EEQ	5000	11	0,22%		
5091	Carretilla Reforzada 56 lts. R azul Maciza	100	10	10,00%		
5099	Caja Met Mon 300'200'125 Marc Plast EEQ (9653)	9653	4	0,04%		
5105	Carretilla reforzada Naranja 56 litros	38	1	2,63%		
<b>TOTAL UNID MES</b>		<b>25141</b>	<b>124</b>	<b>0,49%</b>	<b>99,51</b>	<b>% no calidad 0,49</b>

Elaborado por: Autor  
Fuente: Ecuamatriz

A continuación, se realiza la clasificación de los defectos producidos en la respectiva área ordenándolos de mayor a menor llegando a obtener el número de unidades defectuosas, el porcentaje de unidades defectuosas y el porcentaje de fallas acumuladas diariamente, información relevante para la construcción del diagrama de Pareto demostrado en la Tabla 2. Con la información del porcentaje de fallas del 31,5% mostrado en la figura 9 y tabla 2 se obtiene como resultado que el defecto con mayor número de reprocesos corresponde a las fallas de pintura por lo tanto se construye el diagrama de Pareto el mismo que basa su principio de funcionamiento en la regla 80/20 es decir el 20% de la línea de producto puede generar el 80% de los desechos, (8) en este caso al solucionar las 11 principales inconformidades de todas las líneas de producción, se solucionaría el 82,3% de unidades defectuosas. Se evidencia la necesidad de levantar reportes de acción correctivos para garantizar que los materiales directos e indirectos, así como el producto terminado cumplan con las especificaciones y requerimientos determinados, desde la revisión, validación de materiales directos e indirectos hasta la liberación de materia prima y producto terminado, (9), como lo muestra los datos plasmados en el histograma al realizar un histórico del porcentaje de fallas para las 4 áreas principales de la planta.

El problema a mitigar por lo tanto fue el porcentaje de fallas de pintura: en los diversos componentes de la caja metálica (tapas y bases), estas fallas están reflejadas en el exceso de micraje en la pintura, porque al suscitarse dicho fenómeno sucede un desprendimiento dentro de la capa de pintura, de la misma manera al existir baja presencia de micraje en la pintura se presenta la aparición de puntos negros, de tal forma que no garantiza una calidad acorde a los parámetros establecidos (70- 90 micras).



Figura 6: Fallas de pintura en la base de una caja metálica

Siguiendo la filosofía del JIDOKA se hace uso de las herramientas de calidad para atacar esta problemática, mediante el análisis y solución de problemas razón por lo cual es importante realizar un análisis del problema para encontrar la secuencia de eventos e identificar la causa raíz del mismo y encontrar una solución para cada uno de los problemas suscitados individualmente. utilizado principalmente para el análisis de datos y la toma de decisiones (10), por tanto, la metodología que se sigue en estos casos es importante pues marca las pautas para analizar el problema raíz que ocasiona el defecto y buscar una solución factible para el mismo dicho procedimiento es el siguiente:

- 1.- El defecto a mitigar fue el excesivo micraje de pintura en las cajas las mismas que se traducen en un aumento del porcentaje de fallas y como consecuencia final un aumento en los costos de producción, insatisfacción del cliente, baja calidad, a través de un reporte de análisis e investigación, identificando el defecto, colocando las evidencias del caso, levantando indicadores estadísticos, y ubicando el layout del proceso como se muestra en la tabla 5.
- 2.- Para definir el Equipo haciendo una investigación muy detallada, como guía con las 4 fuentes de variación, Maquinaria, Método, Mano de obra y Materiales, determina acciones de contención para evitar que ocurran más problemas, en esta primera investigación es necesario determinar la causa raíz del defecto como se especifica en la tabla 6.
- 3.- Determinar las causas subsiguientes para determinar la causa raíz del defecto, concluir con la información de los 5 porqué a actuar detallado en la matriz pertinente.
- 4.- Al tener la causa raíz, se debe implementar las acciones permanentes para evitar que vuelva a presentarse el defecto, por tanto, se formuló un plan, se detalló con el análisis del problema, por medio de las pruebas de impacto, prueba de adherencia para observar con detalle los resultados del recubrimiento (11), El equipo para la medición de dureza en recubrimientos, pruebas de Impacto (EPI-elcometer) realizadas para las placas y el vidrio templado utilizado para el ensamblaje del proceso.
- 5.- Al tener la causa raíz, es necesario implementar las acciones permanentes para evitar que vuelva a presentarse, por ende, se enlista las contramedidas derivadas del análisis, las mismas que aseguran que no se vuelva a presentar el defecto con la validación mostrada en la figura 8
- 6.- Estandarización, esta fase está plasmada en el diagrama de ISHIKAWA al encontrar la causa raíz del problema y mitigar levantar reportes de acción: correctivos y contenciones para dar soluciones en un lapso de tiempo de 30 días y un día respectivamente, por parte de cada líder de sección.

Tabla 2: Estatus de Calidad septiembre 2018

Defecto	UNID	% defect	% defec acu
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Fallas de pintura	39	31,5%	31,5%
Carretilla reforzada Naranja 56 litros EME: fallas de pintura	14	11,3%	42,7%
Carretilla reforzada naranja 56 litros EME: Filos Cortantes en platon	9	7,3%	50,0%
Carretilla reforzada 56 lts. R Azul Maciza: Fallo de Pontura	8	6,5%	56,5%
Caja Met Mon 300*200*125 EEG:Fallo Pintura	8	6,5%	62,9%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Falta tapa material en rebordeado	6	4,8%	67,7%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Sin ajuste correcto de tornillo marco plastico	4	3,2%	71,0%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Perno Tapa equivocada	4	3,2%	74,2%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Contaminacion de pintura ampollamiento	4	3,2%	77,4%
Carretilla reforzada Naranja 56 litros EME, rueda azul maciza: Fallas de pintura	3	2,4%	79,8%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Baja capa de pintura compuerta	3	2,4%	82,3%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG (9653):Defecto Pintura	4	3,2%	85,5%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Tapa rota	2	1,6%	87,1%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Sin kit detornillos	2	1,6%	88,7%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Tornilo M4 Flojo en Barra	2	1,6%	90,3%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Perforacion angulo compuerta tapada	2	1,6%	91,9%
Carretilla reforzada 56 lts. R Azul Maciza: Tapón deformado	2	1,6%	93,5%
Caja Met Mon 300*200*125 EEG:Golpe en Base (Abo)	1	0,8%	94,4%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Cjales aplastados	1	0,8%	95,2%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Base rota	1	0,8%	96,0%
Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEG: Base sin remache	1	0,8%	96,8%
Carretilla reforzada naranja 56 litros EME: Rebordeado tipo dientes	1	0,8%	97,6%
Caja Met Mon 300*200*125 EEG:Falta Material Rebordeado Tapa	1	0,8%	98,4%
Caja Met Mon 300*200*125 EEG: Desprendido de Sticker	1	0,8%	99,2%
Carretilla reforzada Naranja 56 litros (5105)	1	0,8%	100,0%
<b>TOTAL</b>	<b>124</b>		

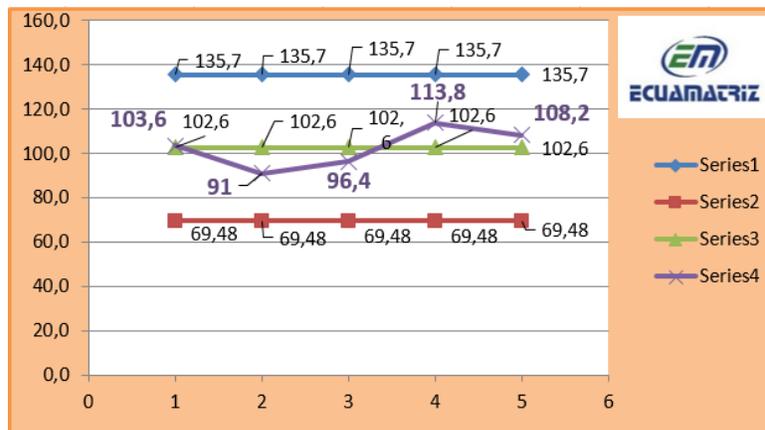
Elaborado por: Autor. Fuente: Ecuamatrix

Tabla 3: % de Fallas acumulado Estaciones de Verificación- septiembre 2018



Elaborado por: Autor Fuente: Control de Calidad - Ecuamatrix

Tabla 4: Cartas de Control para el excedente de pintura



Elaborado por: Autor Fuente: Control de Calidad - Ecuamatrix

Tabla 5: Reporte del análisis 5 ¿Por qué?

REPORT DE ANÁLISIS E INVESTIGACIÓN (5 ¿PORQUÉ?)							
Defecto:	Caja Met Mon 300*200*125 Marc Plast EEQ: Fallas de pintura	Fecha de detección:	03/09/2018	Responsable:	JENNY VELASCO	No. de Control:	1
Descripción del defecto	Foto de defecto	Condición del Defecto (4M's y FTA)	Grafica de tendencia de defecto		Ubicar donde en el proceso		
		<b>EXCESO DE PINTURA EN TODOS LOS COMPONENTES</b> 					

Elaborado por: Autor  
Fuente: Control de Calidad- Ecuamatrix

Tabla 6. Análisis de los cinco ¿por qué?

Análisis de	¿Porqué? 1	¿Porqué? 2	
Factores por los cuales ocurre	Mala calibración del Equipo de Pintura	No existe un instructivo de operación levantado.	
Indagar causa	<b>Investigación (1)</b> <b>EXCESO DE MICRAS EN LA CAPA DE PINTURA</b>  <b>PRUEBA DE CONTROL REALIZADA: Prueba de Pintura (x= 100 micras; fuera del rango estipulado)</b>		
	Temporal	Fecha	Responsable
Contiamedida	Ajustar el equipo de aplicación en polvo con los parámetros establecidos en el instructivo de operación para el proceso	04/09/2018	D. P.

Elaborado por: Autor  
Fuente: Control de Calidad - Ecuamatrix



Figura 7. Pruebas de micraje de pintura - bases

## RESULTADOS

En base al análisis y solución de problemas se determina la se sabe que el parámetro que afecta al excedente de micraje de pintura en las cajas metálicas monofásicas 300\*200\*125 Marco Plástico, EEQ, es la falta de un instructivo actualizado para el procedimiento de pintura, debido a esta causa se derivaron otros factores secundarios como fueron, la falta de uniformidad al realizar la aplicación de la capa de pintura, operarios no capacitados, entre otros por consecuencia afectaron significativamente la calidad del producto y el costo de producción incremento , pero al detectar la causa raíz se está dando seguimiento a una estandarización del procedimiento del trabajo para la aplicación

de la pintura, del mismo modo se socializa el trabajo realizado para tener en cuenta las causa para las fallas de pintura existentes, por tal motivo se socializo sobre los problemas que ocasionan el mayor defecto en el área de pintura afectando a la producción.

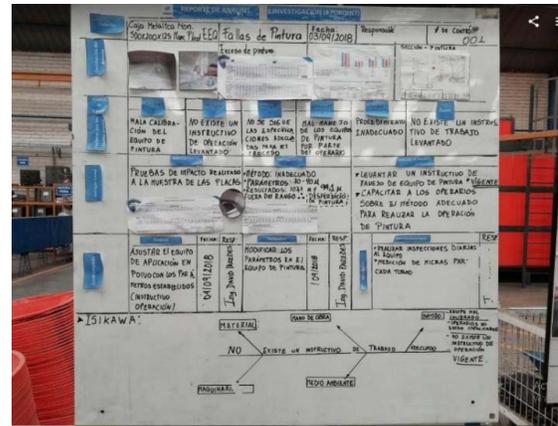
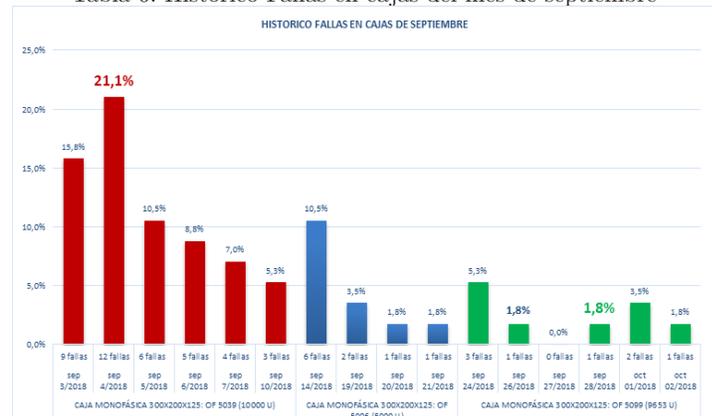


Figura 10: Ishikawa

Al aplicar la estandarización en el proceso de pintura se obtuvo como resultado una notable disminución del porcentaje de defectos causados por el exceso de micraje en las cajas metálicas para cada orden de fabricación registrada en el mes de septiembre pasando de un porcentaje de 21.1% de defectos registrada como máxima a una estandarización del 1.8% de defectos por ende registro una reducción del 19.3% de defectos.

Tabla 6: Histórico Fallas en cajas del mes de septiembre



Elaborado por: Autor  
Fuente: Control de Calidad- Ecuamatrix

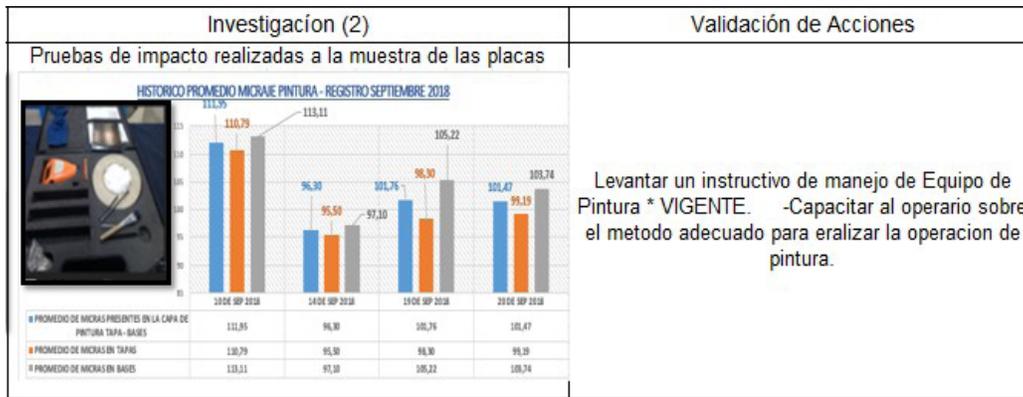


Figura 8. Validación de acciones



Figura 9. Ishikawa

## CONCLUSIONES

En conclusión, se consiguió disminuir el excedente de micraje de pintura en dicha sección, al realizar una estandarización del procedimiento al hacer uso de la metodología JIDOKA, unos de los pilares fundamentales del sistema Lean, pues genero un cambio significativo en la productividad de la empresa, a través de la constante mejora, al realizar controles de la calidad del producto total y al estandarizar el proceso de pintura, las demás áreas también mejoraron su desempeño porque se eliminó el problema del área de pintura el mismo que generaba un cuello de botella en la producción, además una continua mejora garantiza encontrar la estandarización es decir para construir la calidad de un producto es necesario hacer uso de la inteligencia humana como base del sistema productivo por lo tanto no debemos minimizar el impacto de lo simple porque la suma de pequeños cambios instituyen una gran mejora.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación no pudo realizarse sin el apoyo y ayuda de los docentes de la escuela de Ingeniería Industrial y a la empresa ecuatoriana de Matriceria de la ciudad de Ambato por brindarme las facilidades para la investigación, del mismo modo mi agradecimiento va a mi mentor por todos los comentarios constructivos para la realización de este documento.

## REFERENCIAS

1. Manuel Rajadell, Sanchez Jose Luis. *Lean Manufacturing: La evidencia de una necesidad*. Madrid : Ediciones Dias de Santos, 2018.
2. Lefcovich, Mauricio Leon. *Just in time: en la busqueda de la ventaja competitiva*. s.l. : El Cid Editor, 2009.

3. Lopez, Brayan Salazr. *Ingeniería industrial OnLine*. [En línea] 2016. [Citado el: 22 de Octubre de 2018.] <https://www.ingenieriaindustrialonline.com/herramientas-para-el-ingeniero-industrial/lean-manufacturing/jidoka-autonomizacion-de-defectos/>.
4. Zajac, Mauricio. *Química True*. Sacif. [En línea] [http://www.qtrue.com.ar/download/Seminario\\_de\\_Fosfato\\_Teoria.pdf](http://www.qtrue.com.ar/download/Seminario_de_Fosfato_Teoria.pdf).
5. Ecuamatrix. *Procedimiento de Pintura: IP-PI-01*. 2017.
6. Galgano, Alberto. *Las Tres Revoluciones*. Madrid : Diaz de Santos, 2004.
7. Cruz, J. *Cuánto Cuesta la Calidad?* Mexico : UANL, 2004.
8. Minitab. *Elementos básicos de un diagrama de pareto*. [En línea] [Citado el: 22 de Octubre de 2018.] <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/quality-and-process-improvement/quality-tools/supporting-topics/pareto-chart-basics/>.
9. Ecuamatrix. *Caracterización del proceso: CAL-DOC-001*. Ambato : s.n., 2018.
10. AYSP. servicios, *Lean Consultoria Lean- Productos y*. Ambato : s.n., 2018. Sistema de producción y servicios Lean.
11. Daniel Colorado, Posada Manuel. repository.eafit.edu.co. [En línea] 2014. [Citado el: 22 de Octubre de 2018.] <https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/5311/evaluaci%20de%20un%20proceso%20de%20aplicaci%20de%20pintura%20en%20polvo%20sobre%20mdf%20-%20daniel%20colorado%20y%20manuel%20p.pdf;sequence=2>

## HOMOGENEOUS LOAD ON BY COMPRESSION AND VARIABLE COMPRESSION RELATIONSHIP

Pancha, Johnny Marcelo <sup>1</sup>; Rojas, Vicente <sup>1</sup>; Romero, Vicente <sup>1</sup>; Néjer, Jorge <sup>1</sup>

1. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Autor de correspondencia: vicente.rojas@esPOCH.edu.ec

### **RESUMEN**

En la presente investigación se denota el funcionamiento de un motor que utiliza carga homogénea de encendido por compresión (HCCI), resaltando sus componentes esenciales, los beneficios e inconvenientes que presenta esta tecnología. Así mismo, se distingue los diversos progresos que ha tenido el sistema para lograr resolver sus debilidades originales. Entre los progresos considerados para la evolución del sistema HCCI se manifiesta precisamente la incidencia, funcionamiento y tipos de la relación de compresión variable (VCR), cuya tecnología ha permitido mejorar de manera sustancial la eficiencia de un motor. Posteriormente se presentan las conclusiones aportadas por la investigación desarrollada.

*Palabras Claves: inyección compresión, variable.*

### **ABSTRACT**

In this research, it is denoted the operation system of an engine that uses homogeneous charge compression ignition (HCCI), emphasizing the essential components and the benefits and possible problems that might present this technology. It is distinguished the different progresses that the system has had in order to resolve its original weaknesses. Within these considered progresses for the evolution of the HCCI system, it is precisely manifested and expressed the incidence, the operation system and the types of variable compression ratio (VCR), where its technology has improved the efficiency of an engine in a substantial and considerable way. Afterwards, the conclusions obtained from the research that was carried out are presented.

*Keywords: injection, compression, variable.*

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad, es esencial que un motor de automóvil sea diseñado de tal manera que el consumo de combustible sea el mínimo y que se adecue a las exigencias de contaminación, es decir, que produzca menos emisiones contaminantes hacia el ambiente, y que estos factores no ocasionen una disminución notoria de la potencia del motor.

Para cumplir los requerimientos especificados es posible aplicar al motor la tecnología HCCI (Carga Homogénea Encendido por Compresión) que permite reducir el consumo de combustible hasta en un 15% e incluso al aplicarle mejoras al sistema como la introducción de la inyección directa, la VCR (Relación de Compresión Variable) podría llegar a 50%, convirtiéndose en un gran potencial de reducción de consumo de combustible. El HCCI podría ser considerado como un modo de funcionamiento del motor en lugar de un tipo de motor. El principal objetivo de combustión HCCI es reducir el hollín y NO<sub>x</sub> a la vez que mantener una alta eficiencia de combustible con carga en condiciones parciales.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Al ser el presente trabajo netamente teórico, se describirán de manera secuencial diversos aspectos considerados importantes para brindar el aporte investigativo requerido.

El método utilizado a continuación evalúa las características de la tecnología HCCI desarrollada.

### CARGA HOMOGÉNEA ENCENDIDO POR COMPRESIÓN (HCCI).

Un motor con tecnología HCCI es una combinación de los actuales motores de gasolina y Diesel. En él, la mezcla de aire y combustible se realiza fuera de la cámara de combustión, como en los motores de gasolina de inyección indirecta; pero no se enciende por una chispa, sino que se auto inflama por compresión, como en los motores de ciclo Diesel. La figura mostrada a continuación representa esencialmente el modo de funcionamiento HCCI.

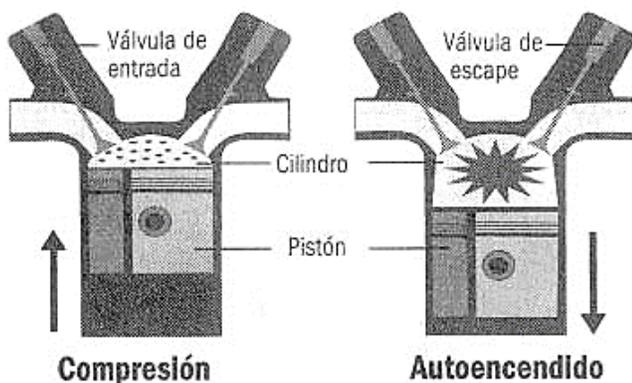


Figura 1. Esquema del modo de funcionamiento HCCI.

Según la distribución del carburante en el aire, la mezcla puede ser homogénea o estratificada. El HCCI, utiliza una distribución homogénea o uniforme del carburante, a consecuencia de esto la inflamación de la mezcla se produce en varios lugares a la vez dentro de la cámara de combustión, y esto hace que la mezcla de combustible/aire se queme casi simultáneamente. Al no haber bujía, no hay iniciador directo de la combustión (no existe frente de llama).

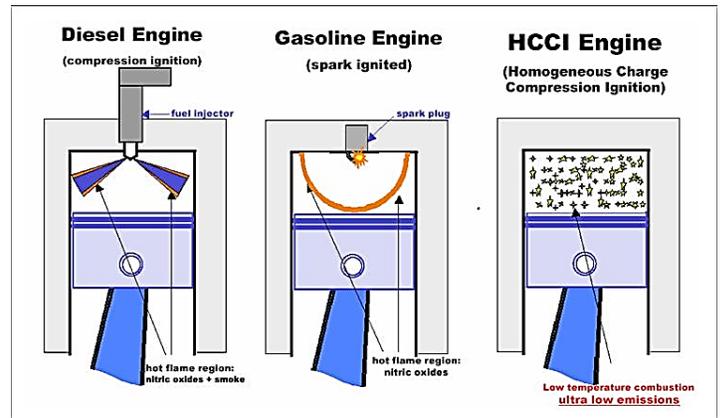


Figura 2. Ilustración de la combustión de la mezcla aire/combustible con diferentes tipos de ignición.

Los motores con tecnología HCCI se han mostrado para lograr niveles extremadamente bajos de las emisiones de óxido de nitrógeno sin un convertidor catalítico de tratamiento posterior. Sin embargo, las emisiones de hidrocarburos sin quemar (HC) y monóxido de carbono (CO) podrían ocurrir debido a la combustión pobre a baja temperatura, por lo que todavía deben ser tratados para cumplir con las regulaciones de emisiones de automóviles.

### Beneficios de la tecnología HCCI.

- Al trabajar con mezcla pobre, proporciona un ahorro de combustible considerable.
- Reduce el NO<sub>x</sub> debido al empleo de mezcla pobre y homogénea, que evita superar la temperatura crítica de aparición de estos gases (aproximadamente 1550°C). Esta temperatura se suele alcanzar en los frentes de llama de la combustión estratificada del motor Diésel y de la inyección directa de gasolina.
- Menores emisiones de hidrocarburos sin quemar y partículas de hollín que el Diésel, debido al empleo de mezcla homogénea pobre y con activación descentralizada, en donde quedan zonas muy pocas sin quemar.
- Al trabajar con mezcla pobre, se convierten en motores relativamente fríos en comparación con los diesel, lo que evita su sobrecalentamiento.
- Su rendimiento en carga parcial es mucho mayor que el de un motor de gasolina.
- La mezcla homogénea pobre premezclada que utiliza este motor no produce hollín.
- No existe pérdidas por estrangulamiento del aire en la admisión (sin válvula de mariposa) lo que mejora la eficiencia del motor.
- Pueden funcionar con diferentes combustibles como gasolina, diesel, etanol, e incluso mezclarlos.

### Inconvenientes de la tecnología HCCI.

- El desafío más notorio a superar de ésta tecnología es la dificultad de controlar el momento exacto del autoencendido de la mezcla, ya que se produce de forma espontánea y no se puede controlar por los medios tradicionales: salto de chispa en el motor a gasolina e inyección de combustible en el motor diesel.
- Al no poder controlar el momento del encendido de la mezcla, es difícil su operación a plena carga ya que se producen detonaciones que seguramente derivarían en daños a los elementos del motor.
- El no poder controlar el momento de autoencendido de la mezcla, a variadas cargas y revoluciones del motor no habrá una temperatura homogénea en los cilindros.

- Un cilindro que esté levemente más caliente que los otros puede comenzar la inflamación de su mezcla mucho antes; o el cilindro más frío puede incluso no quemar el combustible.
- Problemas en arranque en frío al utilizar mezclas pobres.

Se observa una tabla de comparación entre un motor con tecnología HCCI respecto a otros:

Tabla 1. HCCI respecto a Otros motores.

	Motor gasolina inyección indirecta	Motor gasolina inyección directa y mezcla pobre	Motor Diésel	Motor HCCI
Lugar de formación de la mezcla:	En el conducto de admisión	En la cámara de combustión	En la cámara de combustión o en la pre cámara	En el conducto de admisión
Distribución de la mezcla en el cilindro:	Homogénea	Estratificada: rica en torno a la bujía, pobre en el resto de la cámara	Estratificada: rica en torno al punto de inyección, pobre en el resto de la cámara	Homogénea
Proporción de la mezcla:	Estequiométrica ( $\lambda = 1$ )	Pobre o muy pobre	Muy pobre	Muy pobre ( $\lambda > 1,2$ )
Regulación de la carga:	Cantidad de mezcla, de válvula mariposa	Cantidad de combustible	Cantidad de combustible	Cantidad de combustible
Tipo de Encendido:	Chispa	Chispa	Auto inflamación	Auto inflamación
Presión de inyección:	Baja	Alta	Muy alta	Baja
Relación de compresión aproximada:	Entre 8 y 12 a 1	Entre 10 y 13 a 1	Entre 17 y 23 a 1	Entre 20 y 30 a 1

**Mejoras del Sistema.**

Al no existir bujía o inyección directa en el motor HCCI, el encendido de la mezcla depende sobre todo de la relación de compresión y de la temperatura del aire de admisión. El control sobre estos dos parámetros puede permitir el inicio del encendido de la mezcla en un instante deseado, y de esta forma la ampliación del rango de operación del motor HCCI a distintas cargas del motor. Para ello se realizaron estudios, pruebas y las primeras implementaciones al sistema original tales como:

*Temperatura de inducción variable.*

Una característica básica de estos motores es que necesitan calentar los gases de la admisión para que el autoencendido por compresión sea posible y mejore además el arranque en frío. Para lograr esto se pueden utilizar dos técnicas: el calentamiento directo de los gases de admisión con un sistema auxiliar como un calentador de resistencia, pero este método es lento. Otra opción es la gestión térmica rápida (FTM), esto se logra mezclando rápidamente corrientes de aire caliente y frío pero es muy costoso de implementar.

*Porcentaje variable de gases de escape.*

Los gases de escape pueden ser readmitidos o recirculados hacia el colector de admisión a través de un sistema EGR convencional. Los gases de escape tienen un doble efecto sobre la combustión HCCI.

- Calentar la mezcla fresca de admisión, lo cual producirá un autoencendido más rápido de ésta en el interior de la cámara de combustión.

- Reducir las emisiones contaminantes al volverse a quemar los hidrocarburos no combustionados. Esto es porque se reaspira un gran volumen de gases de escape, lo que produce una atmósfera muy poco oxidante en la cámara. En los motores HCCI, se recircula entre un 40% y un 70% de los gases de escape.

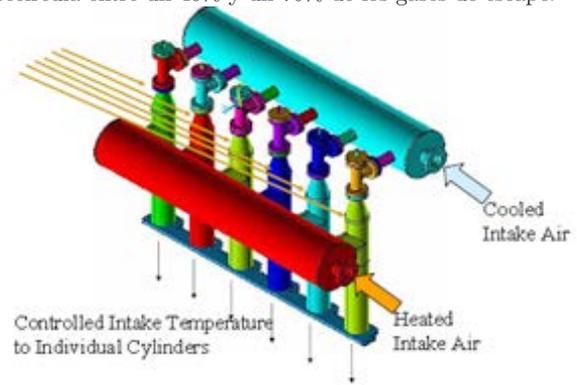


Figura 3. Gestión térmica rápida.

*Accionamiento variable de las válvulas.*

El accionamiento variable de válvulas permitirá modificar según las necesidades del motor el grado de carga de la mezcla en la cámara de combustión. Al adelantar el cierre de las válvulas de escape y retrasar la apertura de las de admisión, con el objetivo de retener una cierta cantidad de gases ya quemados en la cámara de combustión, favorecerá a la combustión descentralizada de la mezcla, por la presencia de gases calientes y homogéneamente esparcidos en la cámara de combustión.

*Variable calidad de ignición del combustible.*

Un motor con tecnología HCCI también puede utilizar combustibles mezclados. Los ejemplos podrían ser la mezcla de gasolina y diesel, o gas natural y etanol, etc., esto se puede lograr en algunas combinaciones posibles. Dos combustibles se mezclan, el primero con una baja resistencia al autoencendido y un segundo con una mayor resistencia, el momento de encendido de la mezcla puede controlarse mediante la variación de la proporción en la composición de estos combustibles.

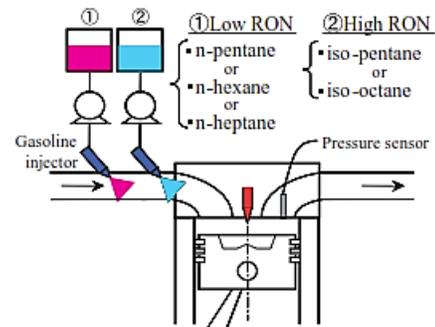


Figura 4. Mezcla de combustibles en un motor con tecnología HCCI.

*Relación de compresión variable (VCR).*

Relación de compresión variable es la tecnología para ajustar la relación de compresión (Figura 5) de un motor de combustión interna mientras el motor está en funcionamiento. Esto se hace para aumentar la eficiencia del combustible. Cargas superiores requieren relaciones más bajas para ser más eficientes y viceversa.

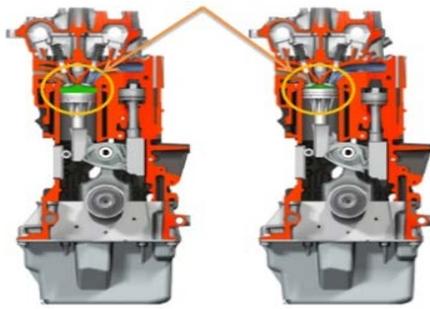


Figura 5. Cambio de Compresión.

*Beneficios*

- Variación de potencias y par en las diferentes instancias de funcionamiento.
- Ahorro de combustible.
- Menores emisiones contaminantes (Figura 6).
- Capaz de cambiar de un combustible a otro sin ninguna pérdida en la eficiencia o rendimiento
- Absorbe vibraciones.
- Adapta el volumen de la cámara de combustión a la masa del gas que se introduce en ella.
- Reducción de la cilindrada
- Reducción de la velocidad del motor

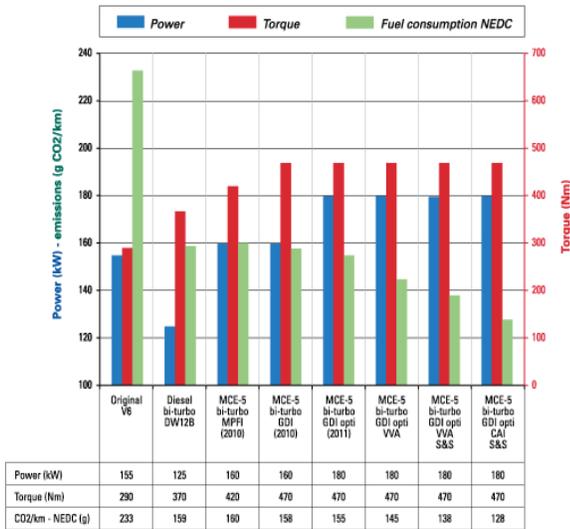


Figura 6. Tabla de Par, Potencia y CO<sub>2</sub>

*Prototipos de Motores de Relación de Compresión Variable.*

La relación de compresión variable es uno de los factores que se puede conseguir alterando las dimensiones de la cámara de combustión, a través de la modificación de la carrera del pistón o de su longitud, del volumen propio de la cámara, y en estos se han centrado los diseñadores; por tal se resulta las siguientes propuestas:

*Motor SAAB de Compresión Variable.*

SAAB, en su diseño ha producido la variación de la relación de compresión modificando la distancia que existe entre la culata y los pistones. Gillbrand ingeniero de SABB, ha modificado profundamente la estructura básica bloque-culata de un motor de combustión interna tradicional. En lo que se denomina culata integral; donde se han unido la culata tal como la conocemos ahora, y los cilindros por cuyo interior se

deslizan los pistones. En la parte inferior, únicamente quedan la bancada, el cigüeñal, las bielas, los pistones y el resto del bloque. Culata integral y bancada quedan selladas por un fuelle de goma (Figura 7) que permite el movimiento relativo entre ambas.



Figura 7. Detalle del fuelle de goma

El volumen de la cámara de combustión varía haciendo pivotar la culata integral sobre la bancada por medio de un actuador hidráulico. La culata descansa sobre este mecanismo (Figura 8) y sobre un apoyo que actúa como una simple bisagra.



Figura 8. Mecanismo de Variación de la Relación de Compresión

Al mover el actuador la culata bascula sobre ese apoyo un máximo de 4 grados, suficiente para que la relación de compresión pueda pasar de 8:1 a 14:1 de forma continua (Figura 9).

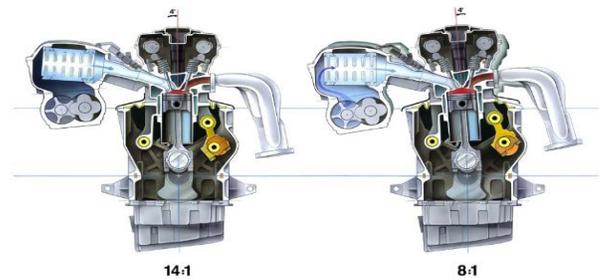


Figura 9. Variación de Relación de Compresión

Gracias a la posibilidad de reducir la compresión hasta 8:1 la presión máxima absoluta de admisión llega a 2,8 bares, encima de lo habitual. Con esta sobrealimentación, consigue una potencia máxima de 225 CV y un par de hasta 305 Nm. Ello significa una potencia y par específicos de 140 CV y 190 Nm por litro. (Figura 10).

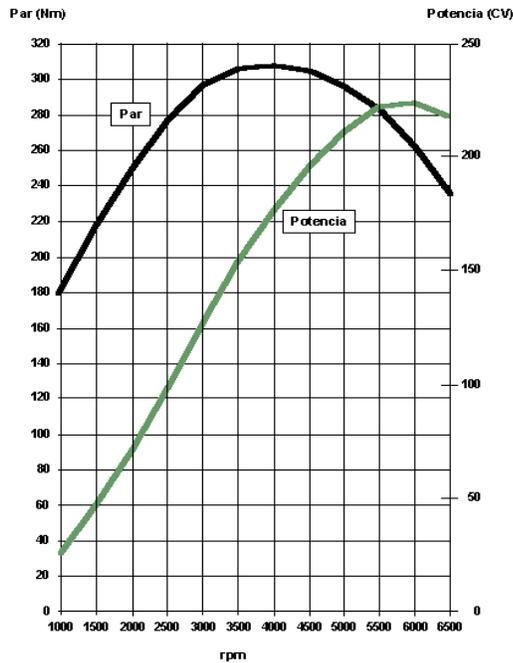


Figura 10. Curva de potencia del Motor SAAB

*Motor del FEV (Franz's Enginnes Vehicules)*

El motor de diseño del FEV, propone una interesante propuesta de variación de la relación de compresión, donde se considera a los brazos de biela los responsables de este fenómeno, obteniendo: brazos de bielas que varían su longitud (Figura 11) para conseguir mejoras de hasta el 7% en consumo, modificando la relación de compresión en rangos de 8 a 13.

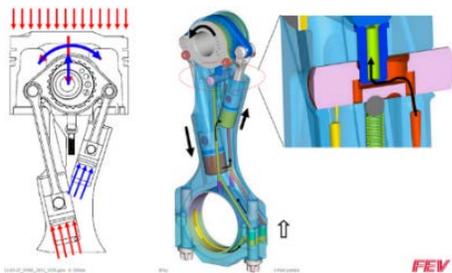


Figura 11. Brazos de Biela de Diseños del FEV

Variación de la relación de compresión en cada uno de los cilindros que permiten contar con un ciclo de trabajo adaptado a cada circunstancia, para otorgar altas dosis de potencia a reducidos consumos de carburante. El diseño mostrado por FEV hace gala de un mecanismo que, mediante el empleo de un circuito de aceite a presión, permite modificar la altura de la cabeza del pistón respecto de la cámara de combustión. Modificando esta distancia, se consigue variar la relación de compresión entre dos valores fijos establecidos.

*Motor con Sistema de Variación de Geometría de Giro (Gomecsys VCR Tecnologic).*

El sistema de Gomecsys (Figura 12), produce una variación de la relación de compresión, mediante el giro de un muñón excéntrico ubicado entre la cabeza de la biela y el cigüeñal; este en sus extremos posee un dentado que reciben movimiento de un sin fin de control que se encuentra comandado por un motor paso a paso, variando de esta forma la altura del brazo de biela y la cámara de compresión.



Figura 12. Sistema de Gomecsys

En cuando a la forma de control de la compresión variable se ha conseguido también involucrar en la excéntrica intermedia del cigüeñal y el brazo de biela, un brazo secundario que toma giro de un eje de control lateral a este y produce el mismo efecto del sistema Gomecsys (Figura 13).

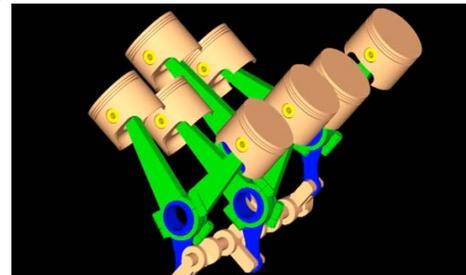


Figura 13. Control por Brazo

*Motor de Peugeot MCE-5 VCR-I*

La marca Peugeot es la que más importancia ha dado en diseño de motores con relación de compresión variable (MCE-5 VCR-I), puesto que ya está incorporando este diseño en el Peugeot 407.

El sistema de variación de relación de compresión del motor MCE-5 funciona mediante la variación de la longitud efectiva de las bielas de conexión del pistón a la manivela. Cuando la longitud efectiva de la biela es más corta, la relación de compresión es menor y viceversa.

En el lado de la mano izquierda del diagrama es el pistón convencional de un motor de combustión interna. A la derecha hay un cilindro hidráulico con pistón de doble efecto. Esta actúa a través de un sistema de biela-manivela con una rueda dentada, cuyo movimiento se ajusta la longitud del vástago eficaz y por lo tanto la relación de compresión en el cilindro que genera trabajo del motor (Figura 14).

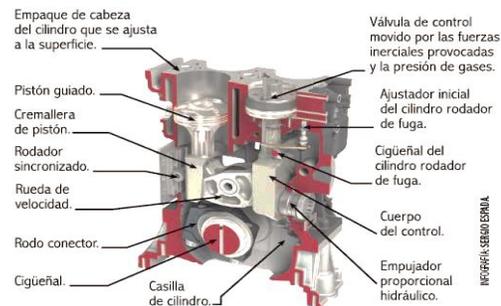


Figura 14. Componentes

*Inconvenientes de los Sistemas VCR*

- Costos de producción elevados.
- Complejidad en el diseño de los componentes.
- Vida útil definida por la fragilidad de los materiales.

## Prototipos con tecnología HCCI.

No existen motores con tecnología HCCI en escala comercial. Sin embargo grandes empresas como GM, Mercedes-Benz y Volkswagen han invertido en investigación HCCI, de tal modo que han desarrollado los siguientes prototipos:

Tabla 2. Prototipos con tecnología HCCI.

Compañía	Modelo	Tecnología	Denominación
General Motors	Saturn-Aura	pHCCI	Vehículo de concepto
General Motors	Opel-Vectra	pHCCI	Vehículo de concepto
Mercedes	Dies-otto	PHCCI	Vehículo de concepto (2007)
Volkswagen	Touran	CCS(Combined Combustion Spark)	Vehículo de concepto
		GCI(Gasoline Compression Ignition)	Vehículo de concepto

En el modo HCCI parcial el motor se enciende como un motor de gasolina (SI) o como un motor diesel (CI), a continuación, cambia al modo HCCI tanto en ralentí como en carga parcial para obtener los beneficios de menor consumo de combustible y reducción de emisiones. Cuando se requiera condiciones del motor a plena carga, el motor otra vez retorna al modo SI o CI.

### Mercedes DiesOtto F700.

Es el mejor prototipo diseñado que utiliza tecnología HCCI. Posee una buena relación entre potencia y par además de un consumo muy reducido de combustible. A continuación, se presentan algunas especificaciones técnicas del modelo (ver Tabla 3). Estas características se consiguen gracias a una auto-ignición controlada, inyección directa, doble turbocompresor de geometría variable. Dispone de un módulo eléctrico de 20 CV para accionar el sistema de arranque y parada automática y realizar las funciones de motor de arranque y alternador. Tiene un sistema de accionamiento variable de válvulas, recirculación de gases de escape e incluso relación de compresión variable lo que es adecuado para que el encendido funcione en ocasiones por chispa y en otras lo haga por compresión. Cuando la carga y el régimen de giro son bajos, el motor funciona como un Diesel. Al superar unos valores de carga y de régimen de giro, funciona como uno de gasolina convencional.

Tabla 3. Especificaciones técnicas Mercedes DiesOtto.

Especificaciones técnicas	
Potencia	238 cv
Torque	400 Nm
Cilindrada	1800 cc.
Presión media efectiva	27.9 bar (por encima de la mayoría de motores diesel)
Numero de cilindros	Cuatro
Consumo de combustible	5.3 l/100 km
Emisión de partículas de CO2	127 gr/km (muy por debajo de cualquier motor diesel de similar potencia)



Figura 25. Mercedes DiesOtto F700

## CONCLUSIONES

- El principio básico del modo de funcionamiento HCCI en un motor, es producir la autoignición de una mezcla homogénea en múltiples puntos de la cámara de combustión. Esto hace que el proceso de combustión sea rápido y que se asemeje a una combustión ideal.
- En un amplio rango de utilización del motor se consigue disminuir el consumo de carburante hasta en un 50%.
- Los motores con tecnología HCCI generan picos de temperatura moderados reduciendo las emisiones de NOx, con lo que se cumplirían perfectamente las normativas de emisiones.
- Controlar un motor con tecnología HCCI es un obstáculo importante para la comercialización extendida de este tipo de motor. Es aún más difícil de controlar que otros motores de combustión modernos más populares, como la chispa de encendido y Diesel.
- Los motores con tecnología HCCI en los que es necesaria la implementación de diversos sistemas para su funcionamiento, resulta muy costosa su fabricación, es por ello que se reducen sus posibilidades de comercialización.
- La comercialización de estos motores con tecnología HCCI se ve truncada en gran parte por la producción de los carros eléctricos e híbridos que emiten menos emisiones contaminantes y presentan un mayor ahorro de combustible.
- Es indispensable que un motor con tecnología HCCI funcione con relación de compresión variable, de este modo en ocasiones, este funcionará por compresión y en otros por encendido de chispa, dependiendo de los regímenes y cargas.
- Los Motores de Relación de Compresión Variable son aquellos que ajustan la relación de compresión, para de esta forma poder lograr las menores emisiones y la mejor potencia.
- Los Motores de Relación de Compresión Variable, se los puede definir también como multcombustible, debido a la amplia variación de su cámara de compresión, misma que puede dar como resulta obtener dos motores.
- La relación de compresión variable permite que la potencia y par de un motor se maximicen.

## BIBLIOGRAFÍA

1. <http://www.taringa.net/posts/info/956924/1er-Post-Motor-de-compresion-variable.html>
2. <http://es.wikipedia.org/wiki/DiesOtto>
3. <http://www.diariomotor.com/2010/10/11/el-motor-1-8-diesotto-formara-parte-del-siguiente-mercedes-clase-s/>
4. [http://www.elgarage.com/nuevo\\_sitio/index.php?s=noticias&id=28](http://www.elgarage.com/nuevo_sitio/index.php?s=noticias&id=28)
5. <http://www.slideshare.net/lazypal/hcci-ppt-by-pallav>
6. <http://www.diariomotor.com/2009/02/24/peugeot-presenta-un-revolucionario-motor-15-mce-5-vcrl/>
7. <http://www.tecmovio.com/2013/04/22/bielas-que-varian-su-longitud-para-conseguir-mejoras-de-hasta-el-7-en-consumo/>
8. <http://motorgiga.com/articulos-coches/motores-de-compresion-variable-mce-5/gmx-niv54-con221934.htm>
9. <http://mce-5.com/english/index.html>
10. [http://en.wikipedia.org/wiki/Variable\\_compression\\_ratio](http://en.wikipedia.org/wiki/Variable_compression_ratio)
11. <http://sportscarforums.com/f13/variable-compression-ratio-v8-32087.html>

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO PARA LA OBTENCIÓN DE POLVO METÁLICO A PARTIR DE LA VIRUTA DE LOS PROCESOS DE MECANIZADO DEL CIRT UNIDAD DE NEGOCIOS HIDROAGOYÁN

Gusqui Martínez, Estefanía P.; Rivera Enríquez, Marco I.;  
Orna Chávez, Javier E.; Villavicencio Cevallos, Julio.

Facultad de Mecánica, ESPOCH; Riobamba, Ecuador  
Autor de correspondencia: 18340volks@gmail.com

### **RESUMEN**

En la propuesta tecnológica que se presenta, se realizó el diseño y construcción del prototipo para la obtención de polvo metálico a partir de la viruta generada de los procesos de mecanizado, para lo cual fue necesario el análisis bibliográfico y estudio de las técnicas de obtención de polvo, se selecciona la alternativa más conveniente para lograr dicho objetivo mediante el uso de la matriz QFD y método de los criterios ponderados, el molino planetario de bolas, luego se procedió al diseño mecánico y selección de cada elemento que conforma el prototipo, usando herramientas de simulación: SOLIDWORKS, ANSYS, ADAMS Y SAP2000. Posteriormente se desarrolló los planos de los elementos, mediante la elaboración de flujogramas de procesos se realizó dicha construcción y montaje del prototipo. Las pruebas de funcionamiento se realizaron con bronce, acero de transmisión y Acero ASTM A743, a una capacidad máxima de alimentación de 220 gr y una velocidad de 400 RPM durante dos, cuatro y cinco horas, con 25 bolas de acero templado de 20 mm durante la primera y segunda hora de molienda, usando en el tiempo restante 100 de  $\phi 10$  mm, posteriormente se tamizo el polvo teniendo 153 gr de bronce entre 0,6 a 0,06 mm y 69 gr  $\leq$  a 0,06 mm de donde el 57,14% está en un rango de 2,49 a 9,74  $\mu\text{m}$ , en el de transmisión se tiene 143 gr entre 0,4 a 0,06 mm y 76 gr debajo de estos límites con un 58,57% entre 1,02 a 4,72  $\mu\text{m}$ , en el inoxidable 129 gr tienen de 1 a 0,06 mm de donde 86 gr son menores con un 78,57% entre 2,13 a 8,45  $\mu\text{m}$ , se concluye entonces que si es posible obtener polvo metálico de acero inoxidable especialmente.

*Palabras clave: Tecnología y ciencias de la ingeniería, acero astm a743, molienda, velocidad de impacto, polvo metálico*

### **ABSTRACT**

In the technological proposal presented, the design and construction of the prototype was carried out to obtain metallic dust from the chip generated from the machining process, for which it was necessary to analyze the literature and study the techniques for obtaining dust. , the most convenient alternative is selected to achieve this objective by using the QFD matrix and the weighted criteria method, the planetary ball mill, then proceeded to the mechanical design and selection of each element that makes up the prototype, using tools of simulation: SOLIDWORKS, ANSYS, ADAMS and SAP2000. Later, the plans of the elements were developed, through the elaboration of flowcharts of processes, the construction and assembly of the prototype was carried out. The performance tests were performed with bronze, transmission steel and Steel ASTM A743, with a maximum power capacity of 220 gr and a speed of 400 RPM for two, four and five hours, with 25 balls of hardened steel of 20 mm during the first and second hour of grinding, using in the remaining time 100 of  $\phi 10$  mm, later the dust was sieved having 153 gr of bronze between 0,6 to 0,06 mm and 69 gr  $\leq$  to 0,06 mm of where the 57 , 14% is in a range of 2.49 to 9.74  $\mu\text{m}$ , in the transmission there is 143 gr between 0.4 to 0.06 mm and 76 gr below these limits with 58.57% between 1, 02 to 4.72  $\mu\text{m}$ , in the stainless 129 gr have from 1 to 0.06 mm where 86 g are smaller with 78.57% between 2.13 to 8.45  $\mu\text{m}$ , it is concluded that if it is possible to obtain stainless steel metallic powder especially.

*Keywords: : Technologies and engineering sciences, astm a743 steel, milling, impact speed, metal powder.*

## INTRODUCCIÓN

Sin duda en la actualidad las industrias han crecido a pasos agigantados debido al avance tecnológico al cual nos enfrentamos, sin embargo, la generación de desperdicios que producen dichas empresas es tan alto que a nivel mundial se buscan soluciones para reciclar y reusarlos, creando campañas que permitan preservar muchos de los recursos naturales que estamos cada vez más cerca de perder. Muchos materiales son dados por la naturaleza, el hombre procesa dichos elementos para ser utilizados y/o consumidos en el entorno en el cual se desempeña, es el caso de la madera, agua, metales, entre otros. Dentro de estos recursos, los metales no son renovables, por lo que se convierten en elementos de mayor cuidado, de ahí la necesidad de buscar alternativas que nos permitan reutilizar estos materiales.

Son varias las empresas a nivel nacional que trabajan con metales como principal materia prima, contando con equipos para la fundición y maquinado de la misma, generando a su vez residuos posteriores a los procesos mencionados. Una de las entidades más importantes es el Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas Hidráulicas CIRT, creado como parte del cambio de la matriz energética del país, el cual cuenta en su estructura funcional con una línea de proceso de mecanizado para la reparación de turbinas hidráulicas, la que genera gran cantidad de viruta de alta calidad y costo elevado, generalmente acero inoxidable martensítico ASTM A743, el cual hasta ahora es considerado no útil y es almacenado sin ningún uso posterior.

No existe información necesaria para la obtención de polvo metálico de acero inoxidable ASTM A 743, debido a que por sus características exige un alto valor económico para su adquisición por lo que al investigar y comprobar que es factible obtener polvo de este material se abrirá un campo completamente nuevo para el país, el cual no solo permitirá reducir la cantidad de desechos obtenidos si no también crear alternativas de aplicación de este producto en labores como relleno de fisuras con polvo del mismo material del elemento evitando la soldadura, uso en la creación de nuevas piezas mediante la tecnología de impresión 3D y la sinterización que es parte de la pulvimetalurgia.

La propuesta de una máquina que transformaría estos elementos de mecanizado en polvo metálico se hace viable debido a la realidad planteada, convirtiéndose en una excelente opción para el uso adecuado de estos residuos y una puerta para la creación de tecnología de punta para el país que apuesta por no más contaminación ambiental y minimización de recursos económicos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

En la planificación del trabajo se tomó como referencia el proceso de diseño mostrado en la Figura 1. Este esquema del proceso de diseño consistió en una guía para el proyecto de tesis realizado.

### RECONOCIMIENTO DE LA NECESIDAD

Esta investigación se realiza con el propósito de aportar una solución a los problemas de contaminación ambiental, costo y espacio de almacenamiento de viruta, para lo cual se provee una metodología de diseño, construcción y montaje para la reutilización de la viruta, de tal manera que ayude a su posterior sinterización, para ello los resultados que se obtengan, estarán garantizados por el uso de normas técnicas y aplicación de los conocimientos científicos del Ingeniero Mecánico.

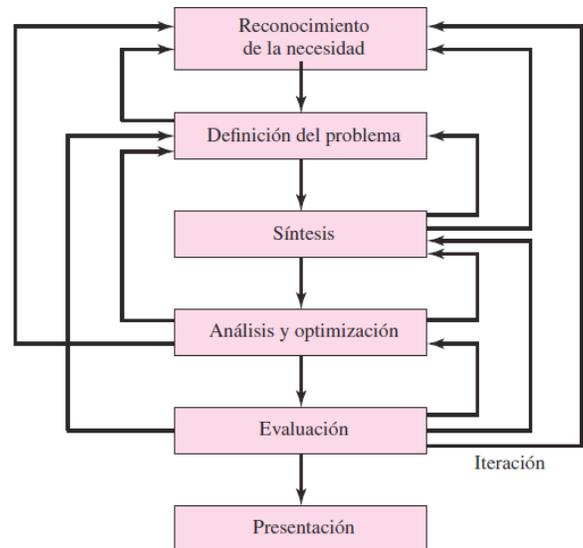


Fig. 1: Fases en el proceso de diseño

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La creación del CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y RECUPERACIÓN DE TURBINAS Y PARTES INDUSTRIALES, "CIRT", tiene como objetivo el análisis y desarrollo tecnológico de los procesos de recuperación y reparación de turbinas hidráulicas, mediante técnicas como soldadura, mecanizado, metrología, control de calidad e ingeniería, en los procesos de mecanizado principalmente se genera gran cantidad de viruta del mismo material, que se almacena sin utilización posterior, lo cual produce un desperdicio de material puro de alta calidad además de un uso de espacio innecesario, la generación de polvo puede constituir una solución a todos estos inconvenientes que afectan cada vez más al medio ambiente y a nosotros mismos.

## SÍNTESIS DE LA SOLUCIÓN

### Necesidades del cliente

Para obtener polvo metálico a partir de la viruta de los procesos de mecanizado se requieren las especificaciones siguientes:

- *Capacidad.*- Al tratarse de un prototipo, se requiere una capacidad de 500 ml del tanque de molienda, este volumen se pretende realizarlo a mayor escala en lo posterior, al evaluar los resultados obtenidos en este prototipo.
- *Disponibilidad de materiales de construcción.*- La máquina a fabricarse debe utilizar los materiales que se encuentren en stock dentro de la bodega de la empresa.
- *Costo.*- Se busca que el prototipo sea lo más económico posible y competitivo en función de aquellas máquinas que se tendrían que importar internacionalmente.
- *Fabricación con la tecnología de la empresa.*- Todos los elementos del molino de bolas deberán ser realizados con la tecnología que cuenta la empresa (centro de mecanizado, torno, fresadora, etc.)
- *Útil para materiales metálicos.*- Debido a que el cliente genera especialmente gran cantidad de residuos metálicos de acero inoxidable ASTM A473, además aceros estructurales y de transmisión surge la necesidad de que a través del molino desarrollado se evite el desecho de esta viruta.
- *Automatización.*- Haciendo uso de los equipos con los que cuenta la empresa, se requiere un prototipo automático y manual, de fácil operación y manejo claro.

- *Tamaño de grano.*- El producto final a obtener debe ser tan pequeño que pueda ser considerado polvo metálico.

## ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

Se analizan 3 alternativas un molino de alta energía (A), molino attritor (B) y un molino planetario de bolas (C), en la tabla 1 se muestran las ponderaciones realizadas que dan como prioridad la alternativa C correspondiente al molino planetario de bolas, seguida de la alternativa A, molino de bolas de alta energía son las mejores opciones para la obtención de polvo metálico, parámetros como capacidad, costo, fabricación con la tecnología de la empresa, molienda rápida y materiales de construcción son los que hacen de este molino la alternativa perfecta para su fabricación.

Tabla 1: Evaluación de las soluciones respecto al criterio de granulometría.

	Capacidad	Costo	Tecnología de la empresa	Molienda rápida	Granulometría fina	Materiales de construcción	Para materiales metálicos	$\Sigma+1$	Ponderación
Solución A	0,020	0,023	0,052	0,065	0,057	0,017	0,065	1,299	0,325
Solución B	0,050	0,057	0,052	0,026	0,029	0,043	0,026	1,283	0,321
Solución C	0,050	0,057	0,052	0,065	0,086	0,043	0,065	1,418	0,355
SUMA								4,000	1

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

## DISEÑO DEL PROTOTIPO

### Dimensionamiento del tanque de molienda

Dada la capacidad del molino planetario de bolas de 500 , se procede a dimensionar el tanque de alimentación. Según el manual de molienda de Union Process la relación diámetro/longitud (D/L) es  $\geq 1$ , con el objetivo de que el diámetro del tanque de molienda sea mayor brindando más área de impacto. Para un diámetro interno de 85 mm y un Volumen de 500, a partir de la ecuación (8) se determina la longitud del tanque de molienda.

$$V_{tm} = \frac{\pi}{4} * D_{tm}^2 * L_{tm} \quad (1)$$

Donde:

$V_{tm}$ : Volumen del tanque

$D_{tm}$ : Diámetro interior del tanque

$L_{tm}$ : Longitud interior del tanque

De donde despejando, se tiene:

$$L_{tm} = 88.11 \text{ mm} \approx 90 \text{ mm}$$

A partir del volumen y diámetro interno del tanque de molienda, se puede determinar la altura de la tapa teniendo:

$$L_t = 2.88 \text{ mm} \approx 3 \text{ mm}$$

El tanque posee una curvatura en la parte inferior con el fin de evitar la acumulación del producto de la molienda, facilitando el proceso al momento de descargar el material y a su vez para su limpieza. La tapa se fija al tanque de molienda mediante bridas una superior e inferior

con el fin de obtener hermeticidad en el interior, las mismas serán ajustadas mediante 3 pernos M6x1 para facilidad del operario.

Para el diseño de los elementos restantes se toma en consideración el torque ejercido por el motor y la fuerza centrípeta producida por el giro de los mismos para lo cual, basados en la geometría del tanque de molienda, anteriormente evaluado, se realiza el modelado en SOLIDWORKS con dimensiones referenciales de los distintos elementos con el fin de obtener una masa que será sujeta a recalcuulo posteriormente en base al diseño de los elementos con las cargas aplicadas. En la siguiente figura se puede observar la configuración en un pre diseño de los componentes del sistema de molienda.

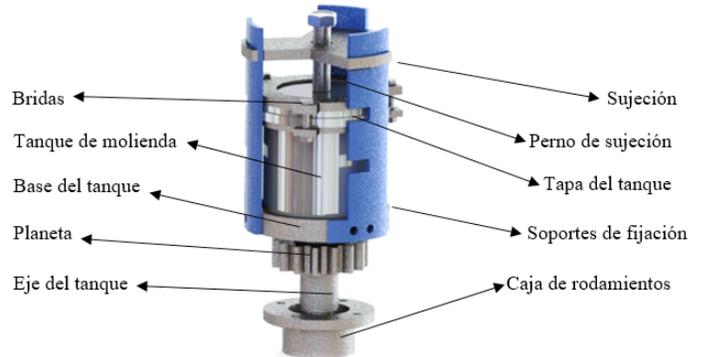


Fig. 2: Pre diseño del sistema de molienda

Las masas de los elementos que conforman el sistema de molienda se obtienen a partir de SOLIDWORKS 2017 utilizando la opción de propiedades físicas, obteniendo una masa de 11.63 kg.

### Fuerza requerida para la molienda

Con el fin de determinar la fuerza que requieren los elementos moledores para lograr la molienda utilizamos dos softwares de simulación:

#### - Simulación en ADAMS View

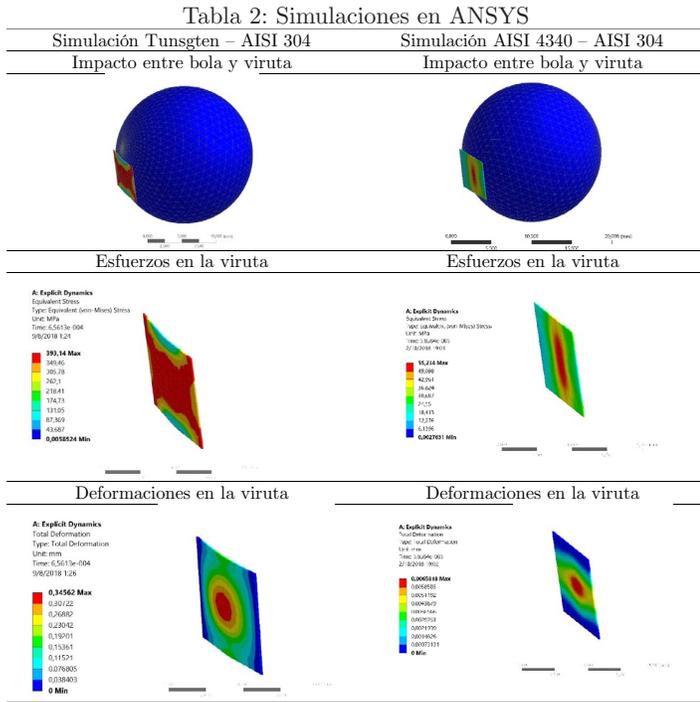
Se realizó una simulación en ADAMS View para constatar el movimiento de las bolas dentro del tanque de molienda y determinar la velocidad a la cual se consigue que este sea adecuado, es decir que las bolas describan una trayectoria característica en un molino planetario. Al realizar varios ensayos a distintas velocidades se determinó que, para las dimensiones establecidas en el prototipo, la velocidad máxima de trabajo para el tanque de molienda se encuentra en 68 rad/s aproximadamente en 650 rpm por ende una velocidad de 325 rpm en el brazo para conseguir una relación de transmisión de 1:2 en los engranajes planetarios. Incluyendo 25 bolas dentro del tanque de molienda en la simulación en promedio la velocidad lineal de los elementos moledores es de 600 mm/s velocidad con la que se realiza el estudio en ANSYS.

#### -Simulación en ANSYS

Se utilizó el módulo Explicit Dynamics de ANSYS para verificar la fragmentación de la viruta al entrar en contacto con una bola de molienda a la velocidad estudiada en ADAMS. Las bolas de molienda comerciales son fabricadas principalmente de óxido de zirconio, corindón, acero inoxidable, acero templado y carburo de tungsteno, siendo estas dos últimas las seleccionadas para nuestro estudio debido a las características del material a ser procesado. Para un análisis explícito se requieren ciertos parámetros dependiendo del modelo que se use en la simulación; para bolas de acero templado encontramos la designación AISI 52100 que para este tipo de estudio no se encuentra con la información necesaria para la determinación de los coeficientes especiales necesarios, por lo cual se realiza el análisis para un acero

AISI 4340 de menores características, pero perteneciente a la librería de explicit materials dentro de ANSYS. Se realiza una simulación para cada material de las bolas de molienda correspondiente a carburo de tungsteno y acero AISI 4340.

Una vez finalizada la simulación procedemos con el análisis de resultados, encontrando un análisis de esfuerzos tanto en la bola de molienda como en la viruta y a su vez se muestran valores de deformación obtenidos.



Realizado por: Autores 2018  
Fuente: Realización propia

Al finalizar el análisis se puede observar en la figura el impacto de la bola de molienda con la viruta, distinguiéndose una deformación en la viruta, pero sin llegar a su fragmentación, sin embargo, se puede concluir que, en un estudio de mayores recursos de procesamiento de datos, los impactos sobre la misma serían sucesivos llegando a una deformación mayor hasta terminar en su ruptura. Se concluye entonces que a la velocidad ensayada en ADAMS View se dan resultados favorables en la molienda.

**Selección de la potencia necesaria**

Para la selección del motor se toma en cuenta la inercia a vencer de la masa del sistema de molienda y contrapeso para lograr el movimiento del mecanismo con valores correspondientes a la inercia del sistema de molienda con respecto al eje de transmisión de  $I_{sm}=19613.3224 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$  y para la inercia con respecto al centro del eje del tanque de molienda de  $I_{rc}=190433.2491 \text{ kg}\cdot\text{mm}^2$ .

- *Aceleración angular del tanque*

$$\alpha = \frac{n_p}{t_a} \quad \alpha_t = 9.72 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \quad (2)$$

Donde:

- $\alpha$  = Velocidad angular planeta
- $t_a$  = Tiempo de estabilización del motor

- *Aceleración angular del tanque con respecto al centro*

$$\alpha_{rc} = 4.86 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

- *Torque en el planeta*

$$T_p = \alpha_t * I_{sm} \quad T_p = 0.19 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (3)$$

- *Torque del tanque con respecto al centro*

Tomaremos en cuenta el doble de torque necesario para su movimiento debido a la masa del contrapeso.

$$T_{rc} = 2 * \alpha_{rc} * I_{rc} = 1.85 \text{ N}\cdot\text{m} \quad (4)$$

- *Potencia necesaria para el tanque*

$$P_t = T_p * n_p = 12.93 \text{ W} \quad (5)$$

- *Potencia necesaria para el tanque con respecto al centro*

$$P_{rc} = T_{rc} * n_b \quad P_{rc} = 62.99 \text{ W} \quad (6)$$

- *Potencia total necesaria para el movimiento del mecanismo*

$$P_{nec} = P_{rc} + P_t = 62.99 \text{ W} + 12.93 = 75.92 \text{ W} = 0.13 \text{ HP} \quad (7)$$

Tomando en cuenta este valor escogemos un motor de 0.5 HP para un factor de seguridad de 3.84.

**Diseño de engranajes planetarios**

El tren de engranajes planetarios consta de una corona, sol, planeta y brazo para la transmisión del movimiento, en su diseño se analiza la velocidad necesaria de 325 rpm en el brazo y mediante relaciones de transmisión conseguir el doble de velocidad en el planeta y por lo tanto en el tanque de molienda. La relación de transmisión en engranajes planetarios viene definida por la ecuación 8.

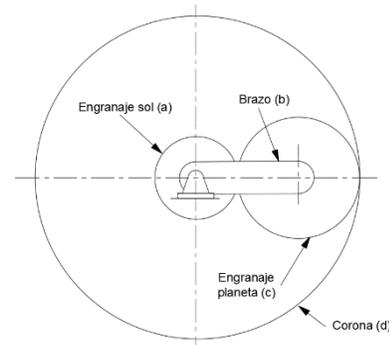


Fig. 3: Configuración de engranajes planetarios

$$e = \frac{z_r - z_b}{z_s - z_b} \quad (8)$$

Donde:

- Número de dientes de la corona (d)
- Número de dientes del brazo (b)
- Número de dientes del sol (a)
- Número de dientes del planeta (c)

$$z_c = (2 * z_p) + z_s$$

La distancia de centros entre la corona y el planeta se fija en 78.5 mm con el fin de obtener la fuerza centrípeta necesaria en el tanque de molienda, además se opta por 15 dientes en el planeta y en el sol, obteniendo entonces el número de dientes en la corona  $z_c = 45$  dientes. Por lo tanto, la relación de transmisión se calcula obteniendo un valor de  $e = 3$ . En cuanto a la velocidad en los engranajes la relación de transmisión se mantiene y guarda analogía con las velocidades angulares de cada engranaje de la siguiente manera:

$$e = \frac{n_r - n_b}{n_s - n_b} \quad n_s = 216.66 \text{ rpm} \quad n_p = 650 \text{ rpm} \quad (9)$$

El cálculo geométrico en cada uno de los engranajes se resume en la siguiente tabla.

Tabla 3: Resumen cálculo geométrico de los engranajes

Valor geométrico	Ecuación	Planeta (mm)	Corona (mm)
Diámetro exterior	$d_e = m * (z + 2)$	85	235
Espesor del diente	$e = \frac{P_c}{2}$	7.854	7.854
Altura del diente	$h = 2.25 * m$	8	8

Realizado por: Autores 2018  
Fuente: Realización propia

En la siguiente figura se muestra la configuración final del engranaje planeta y corona.

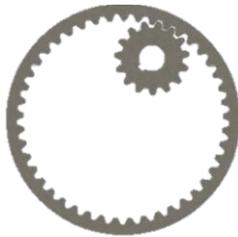


Fig. 4: Engranaje planeta y engranaje corona / Fuente: Autores

### Calculo fuerzas resultantes en el diente

- Fuerza tangencial

$$W_t = \frac{2T}{D_p} \quad (10)$$

Donde:

$W_t$  = Fuerza tangencial

$T$  = torque

$$P = T * n_b \quad T = 10.80 \text{ N.m} \quad Wt = 288.13 \text{ N}$$

- Fuerza radial

$$W_r = W_t * \tan \phi$$

$$W_r = 134.361 \text{ N} \quad (11)$$

- Fuerza resultante

$$W = \sqrt{W_t^2 + W_r^2} \quad W = 317.917 \text{ N} \quad (12)$$

- Análisis a flexión en el diente

$$\sigma_f = \frac{W_t * K_a * K_m * K_s * K_b}{F * m * J * K_v} \quad (13)$$

Donde:

$\sigma_f$  = Esfuerzo de trabajo por flexión

$J$  = Factor geométrico de cada engranaje

$K_m$  = Factor de forma y de carga

$K_a$  = Factor de aplicación

$K_v$  = Factor dinámico

$K_s$  = Factor de tamaño

$K_b$  = Factor de espesor

Esfuerzo a flexión planeta	Esfuerzo a flexión corona
31.25 MPa	47.5 MPa

- Análisis a desgaste superficial

$$\sigma_c = C_p \left( \frac{W_t}{F * D_p * I} * \frac{C_a * C_m}{C_v} * C_s * C_f \right)^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

Donde:

$\sigma_c$  = Esfuerzo por contacto superficial

$C_p$  = Coeficiente elástico

$I$  = Factor geométrico

$C_a, C_m, C_v, C_s$  = Igual a  $K_a, K_m, K_v, K_s$

$C_f = (1/K_b)$  Factor de condición de superficie.

Esfuerzo desgaste superficial planeta	Esfuerzo desgaste superficial corona
186.49 MPa	261.92 MPa

- Esfuerzos admisibles

Esfuerzo de flexión admisible

$$\sigma_{f-adm} = \frac{K_L}{K_T * K_R} * S_t \quad (15)$$

Donde:

$\sigma_{f-adm}$  = Esfuerzo de flexión admisible

$K_L$  = Factor de duracion o vida

$K_T$  = Factor de temperatura

$K_R$  = Factor de confiabilidad

$S_t$  = Esfuerzos admisibles AGMA

$$\sigma_{f-adm} = 507.012 \text{ MPa}$$

Esfuerzo de contacto admisible

$$\sigma_{c-adm} = \frac{C_L * C_H}{C_T * C_R} * S_c \quad (18)$$

Donde:

$\sigma_{c-adm}$  = Esfuerzo de contacto admisible

$C_L$  = Factor de duración

$C_H$  = Factor de relación de durezas, al ser el planeta y la corona del mismo material

$C_T$  = Factor de temperatura

$C_R$  = Factor de confiabilidad

$S_c$  = Esfuerzos permisibles a desgaste superficial

$C_R = 0.85$  Para una confiabilidad de 90%

$C_T = 1$  Para una temperatura menor a 120°C

Para el cálculo de  $S_c$  se utiliza la siguiente ecuación

$$S_c = 186 + 2.5 * HB$$

$$= 2086 \text{ MPa} \quad (19)$$

Por lo tanto:  $\sigma_{c-adm} = 2086 \text{ Mpa}$

Los factores de seguridad para el planeta y corona tanto a flexión como a contacto se resumen en la siguiente tabla:

	Planeta	Corona
Flexión	10.67	16.27
Contacto	11.18	7.93

**Cálculo de la fuerza centrípeta**

En base a esta fuerza se calculan la mayor parte de elementos presentes en el sistema de molienda por lo cual resulta de suma importancia su cálculo, el valor de esta fuerza será objeto de recálculo al utilizar un valor de referencia de masa. La fuerza mencionada se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$F_{c-sm} = m_{sm} * n_b^2 * r \quad (20)$$

Donde:

$F_{c-sm}$  = Fuerza centrípeta del sistema de molienda

$M_{sm}$  = Masa del sistema de molienda

$n_b$  = Velocidad angular sistema de molienda relativo al centro

$r_e$  = Distancia al centro del eje de transmisión

El punto de aplicación de esta fuerza se encuentra en el centro de masa del conjunto de los elementos causantes de la misma, obteniendo este valor de SOLIDWORKS 2017 con la herramienta de propiedades físicas. Coordenadas que se presentan desde el origen tomado por el software en el ensamblaje. A su vez se realiza el cálculo de la fuerza centrípeta de masa dentro del tanque tomando este valor de sobre medida de 1.25 indicado en el cálculo de la masa total.

$$F_{c-m} = m_m * n_p^2 * r_t \quad (21)$$

Donde:

$F_{c-m}$  = Fuerza centrípeta de masa dentro del tanque

$M_m$  = Masa dentro del tanque

$n_p$  = Velocidad angular del planeta

$r_t$  = Distancia al centro del tanque

$$F_{c-m} = 417.35 \text{ N}$$

Esta fuerza tendrá como punto de aplicación el centro de masa del tanque obtenido de la misma manera antes expuesta.

**DISEÑO DEL EJE DEL TANQUE DE MOLIENDA**

Para el diseño de este eje se toma en consideración la fuerza centrípeta generada por la masa de la viruta junto con los elementos moledores y el sistema de molienda. A continuación, se muestran las cargas a las que está sometido el eje del tanque, dada por la fuerza centrípeta existente en el sistema de molienda, torque y fuerzas en el planeta, acompañado de sus respectivos diagramas de momento flector y fuerzas cortantes obtenidos en ANSYS.

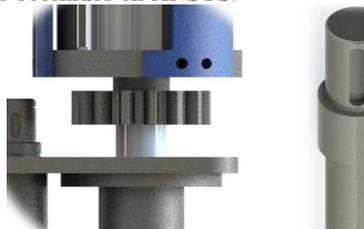


Fig. 5: Pre diseño geométrico y ubicación del eje del tanque de molienda

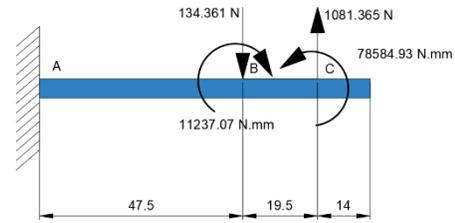


Fig 6: Diagrama de cuerpo libre XY

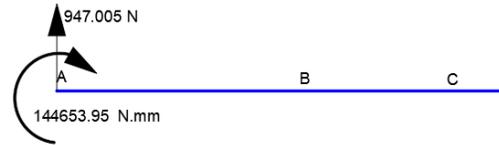


Fig. 7: Reacciones del eje XYs

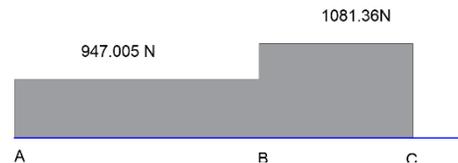


Fig. 8: Diagrama de cortantes en el eje XY

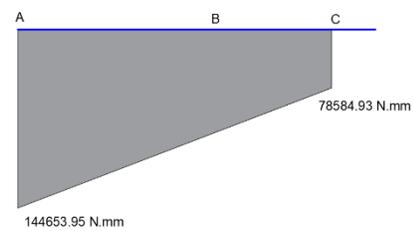


Fig. 9: Diagrama de momentos flectores en XY

Mediante la ecuación de Soderberg se obtiene un diámetro  $d=25,89 \text{ mm}$ . Por lo tanto, su construcción se realiza en un diámetro de  $25.4 \text{ mm}$  obteniendo un factor de seguridad de 1.45.

**DISEÑO DEL EJE PRINCIPAL DE TRANSMISIÓN.**

El diseño de este eje resulta de suma importancia ya que sirve de comunicación entre el motor y el sistema de engranajes planetarios, por lo tanto, es el encargado de transmitir la velocidad y torque necesarios para la molienda del material dentro del tazón.



Fig. 10: Pre diseño del eje principal de transmisión

A continuación, se muestran las cargas a las que está sometido el eje de transmisión dados por la torsión del motor, tensiones en la banda y el peso del sistema de molienda y contrapeso, acompañado de sus diagramas de momento flector y fuerzas cortantes para este eje.

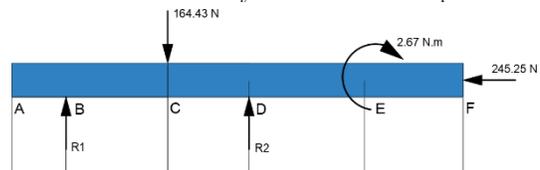


Fig 11: Diagrama de cuerpo libre XY

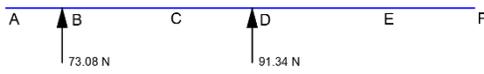


Fig. 12: Reacciones del eje XY

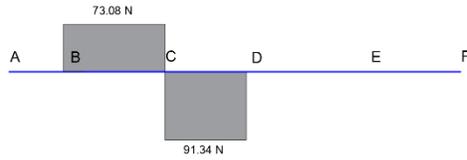


Fig. 13: Diagrama de cortantes en el eje XY

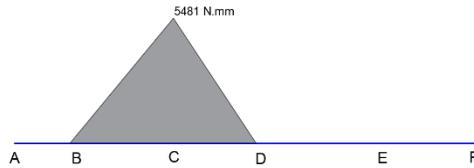


Fig. 14: Diagrama de momentos flectores en XY

Mediante la ecuación de Soderberg se obtiene un diámetro de 14.49 mm. Fijando las dimensiones del eje como se muestra a continuación.



Fig. 15: Dimensiones finales del eje de transmisión

### DISEÑO DEL BRAZO

El brazo constituye el soporte para el sistema de molienda y contrapeso además es el encargado de transmitir la velocidad y torque en el eje hacia el planeta y de esta manera alcanzar la relación de velocidad deseada. A continuación, se muestran las cargas a las que está sometido el brazo, correspondientes al peso del sistema de molienda y contrapeso.



Fig. 16: Pre diseño del brazo

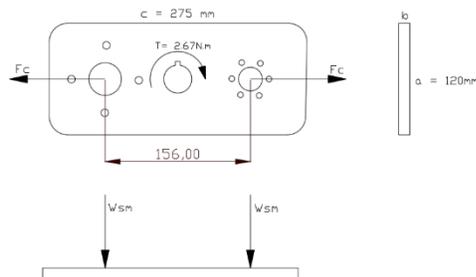


Fig. 17: Dimensionamiento parcial del brazo

Para la dimensión b de la sección transversal del brazo se asume un valor de 120 mm tomando en cuenta el espacio utilizado por los pernos de sujeción para la caja de rodamientos y contrapeso, bajo la misma justificación el lado c adquiere un valor de 275 mm.

### Tensión

$$\sigma_t = \frac{F_{c-t}}{A} \quad \sigma_t = \frac{13.44 \text{ N}}{b \text{ mm}} \quad \sigma_{fa} = \frac{M_f * c}{I} \quad I = \frac{base * h^3}{12}$$

Flexión por peso del sistema de molienda ( $W_{sm}$ )

Inercia

$$I = \frac{120 \text{ mm} * b^3}{12}$$

$$I = 10 \text{ mm} * b^3$$

Esfuerzo de flexión

$$\sigma_{fa} = \frac{100.44 \text{ N} * 78 \text{ mm} * b}{10 \text{ mm} * b^3}$$

$$\sigma_{fa} = \frac{783.43 \text{ N}}{b^2}$$

### Torsión

La torsión la genera el torque del motor en el centro del brazo transmitida a través del eje de transmisión.

$$\tau = \frac{M_t}{\alpha * a * b^2} \quad (23)$$

Donde:

$M_t$  = Momento torsor

$\alpha$  = Coeficiente de torsión barra rectangular

a = Lado más largo de la sección transversal

b = Lado más corto de la sección transversal

$$\tau = 2.94 * 10^{-4} \frac{N}{\text{mm}^2}$$

El material seleccionado para este elemento es el acero AISI 1045. Empleando la ecuación de Soderberg se obtiene un valor de escogiendo un espesor de placa de 8 mm debido a la longitud de rosca para los pernos que se utilizarán para el montaje de los diferentes componentes sobre este elemento.

### DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PARA EL PROTOTIPO

Para el análisis de la estructura del prototipo se utiliza el software SAP 2000, bajo recomendación empírica escogemos un perfil angular de 30 x 3 de material ASTM A36 para el sistema estructural principal y de 25 x 2 para el secundario unidos mediante soldadura MIG con un electrodo ER70S-3, a continuación, se muestra una figura de la estructura completa. Luego de establecer las cargas se procede con la ejecución del estudio en el programa SAP 2000. Se puede observar entonces que la estructura planteada cumple con la resistencia necesaria para los elementos montados sobre ella.

### RESULTADOS

Las pruebas de funcionamiento para el prototipo se realizaron con los principales materiales mecanizados en el CIRT, entre ellos el bronce, acero AISI 1018 y el más relevante acero inoxidable A743. A continuación, se describen los resultados para cada uno de los casos mencionados.



Fig. 18: Diseño de la Estructura del prototipo

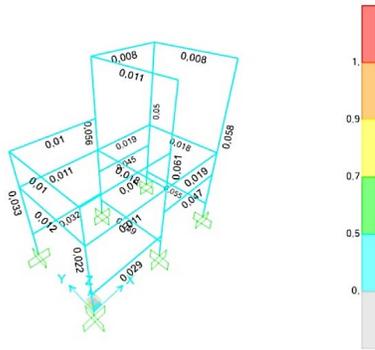


Fig. 19: Factores demanda capacidad en la estructura

- Acero ASTM A743

En la imagen se muestra el polvo obtenido de acero inoxidable ASTM A-743 con una ampliación de 250x en el microscopio electrónico de barrido.

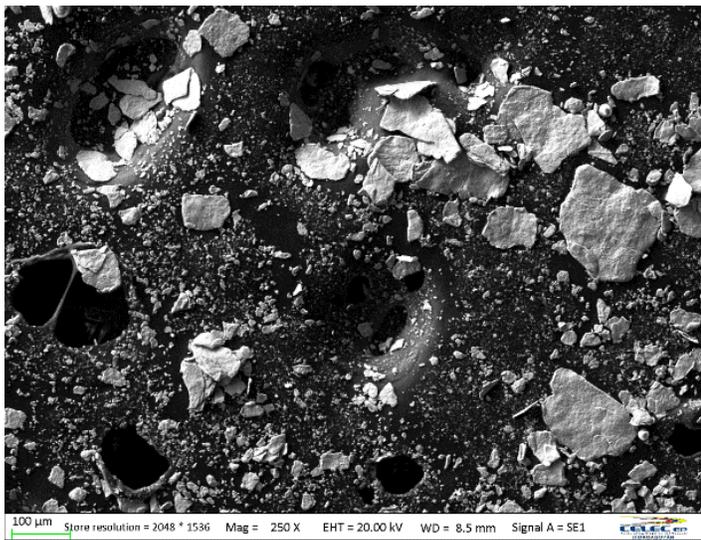


Fig. 20: Polvo de acero inoxidable ASTM A 743, 250x

Tabla 5: Resultados de molienda Acero ASTM A743.

Dato:	Valor:
Masa de entrada:	230 g
Granulometría inicial:	10 mm
Granulometría final promedio:	100% ≤ 0,6 mm 40% en un rango de 1,47 a 9,49 µm con un promedio de 5,48 µm
Velocidad de molienda:	400 RPM
Bolas de molienda:	Acero templado
Masa final:	205 g
Tiempo de molienda:	5 hr
Pérdida:	10,86 %

Realizado por: Autores 2018  
Fuente: Realización propia

- Bronce

Tabla 6: Resultados de molienda de bronce.

Dato:	Valor:
Masa de entrada:	230 g
Granulometría inicial:	7 a 10 mm
Granulometría final:	100% ≤ 0,6 mm 31,08% en un rango de 14,36 a 4,05 µm con un promedio de 9,21 µm
Velocidad de molienda:	400 RPM
Bolas de molienda:	Acero templado
Masa final:	215 g
Tiempo de molienda:	2 hr
Pérdida:	6,52 %

Realizado por: Autores 2018  
Fuente: Realización propia

Tabla 4: Proceso de molienda del acero ASTM A743 CA 6 NM.



Realizado por: Autores 2018  
Fuente: Realización propia

- Acero AISI 1018

Tabla 7: Resultados de molienda Acero de transmisión 1018.

Dato:	Valor:
Masa de entrada:	230 g
Granulometría inicial:	10 mm
Granulometría final:	100% $\leq$ 0,4 mm 33,04% en un rango de 2,44 a 7,42 $\mu$ m, con un promedio de 4,9 $\mu$ m
Velocidad de molienda:	400 RPM
Bolas de molienda:	Acero templado
Masa final:	216 g
Tiempo de molienda:	4 hr
Perdida:	6,09 %

Realizado por: Autores 2018

Fuente: Realización propia

En los tres casos de análisis la pérdida de masa pudo presentarse por el cambio de las bolas de molienda, puesto que las partículas de la viruta pudieron adherirse a ellas, también pudo generarse al trasladar el polvo en la serie de tamices ya que al tratarse de elementos tan pequeños se puede ocasionar su dispersión en el aire.

## CONCLUSIONES

- Dentro de los procesos mecánicos para la obtención de polvo metálico se tiene las trituradoras y molinos, donde en la primera se genera partículas gruesas y en la segunda se puede obtener granos finos y ultra finos de allí su selección.
- El molino planetario de bolas es la mejor opción para la obtención de polvos metálicos a partir de la viruta obtenida de los procesos de mecanizado, por el impacto, fricción y corte que puede generar las bolas sobre los residuos producto del movimiento planetario dado, velocidad que puede alcanzar, fácil mantenimiento, fabricación y costo razonable.
- El diseño del prototipo se sustentó en los ensayos realizado en ANSYS y ADAMS View donde se pudo obtener una pauta del impacto de las bolas de molienda sobre la viruta, brindándonos una herramienta para verificar la validez del proceso.
- Construido el prototipo de molienda se tiene que sus dimensiones son de 0,6x0,6x0,31 m con un peso de 132 kg, volumen de alimentación del tanque de 500 ml y capacidad de 220gr, pudiendo usarse 25 y 100 bolas de diámetro 20 y 10 mm respectivamente.
- Se realizaron pruebas del molino con virutas de bronce, acero de transmisión 1018 y acero inoxidable ASTM A743, a una velocidad de 400 RPM, durante dos, cuatro y cinco horas en donde al tamizarlo se pudo obtener partículas  $\leq$  0,6 mm,  $\leq$  0,4 mm y  $\leq$  1 mm respectivamente, usando bolas de 20 mm de diámetro durante la primera hora en el caso de bronce y en el acero de transmisión e inoxidable en las dos primeras horas de molienda, por este tamaño se puede concluir entonces que se ha obtenido polvo.
- Del polvo tamizado se tiene en la base del mismo un peso de 69, 76 y 86 gr correspondiente al 31.08, 33.04 y 40% de bronce, acero de transmisión y acero inoxidable ASTM A743 lo que indica que mide menos de 0,06 mm, por lo que se usa el microscopio electrónico de barrido para determinar de la forma más exacta posible el tamaño real de estos granos.
- Las gráficas de control de medias y rangos muestran en los tres casos que en el proceso de molienda no se ha presentado ninguna

anormalidad que cause que los tamaños de las partículas sean muy dispersas, es así que en el bronce existen partículas con un tamaño promedio de 9.21  $\mu$ m con límites permisibles de 4.05 a 14,36  $\mu$ m, en el acero 1018 se tiene una media de 4,9  $\mu$ m en un rango de 2,44 a 7,42  $\mu$ m mientras que en el ASTM A743 un promedio de 5,48  $\mu$ m entre 1,47 y 9,49  $\mu$ m.

- En el bronce se tiene una masa de 153 gr en un rango de 0,6 a 0,06 mm, de los 69 gr que queda en la base del tamiz el 57,14% tiene un tamaño de 2,49 a 9,74  $\mu$ m, el 37,14% entre 9,74 a 16,78  $\mu$ m mientras que el 5,71% entre 16,98 a 24,23  $\mu$ m; en el acero de transmisión 143 gr están entre 0,4 a 0,06 mm, de los 86 gr de la base resultante del tamizaje se tiene que el 58,57 % están partículas de 1,02 a 4,72  $\mu$ m, el 30% de 4,72 a 8,41  $\mu$ m y el 11,43% está de 8,41 a 12,41  $\mu$ m, en el acero inoxidable 129 gr de la molienda tienen de 1 a 0,06 mm, mientras que el 78,57% de los 86 gr de la base de los tamices están en un rango de 2,13 a 8,45  $\mu$ m del tamaño de polvo.
- Las pérdidas que se dan en el proceso de molienda se presentan principalmente por el intercambio de los elementos moleadores puesto que cierta cantidad de partículas quedan adheridas a ellos otro motivo por el que pueden suceder, es que al abrir el tanque de molienda o al trasladar el producto obtenido a los tamices el polvo debido a su tamaño tiende a dispersarse en el aire.

## REFERENCIAS

1. Budynas, Richard; & Nisbett, Keith. *Shigley's Mechanical Engineering Desing*. 9ª ed: Mc Graw Hill, 2012.pp. 4-6, 220-221, 275-319
2. Budynas, Richard; & Nisbett, Keith. *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. 9ª ed. México: Mc Graw Hill, 2012.pp 725-745
3. Casco Cabezas, Erick; *Diseño y construcción de un molino de bolas* (Tesis). (Ingeniería) Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Mecánica, Escuela de Ingeniería Mecánica. Ambato, Ecuador. 2017. pp. 4-11 .
4. Castro, Guillermo. *Facultad de Ingeniería* [En línea]. Buenos Aires: [Consulta:26-06-2018]. Disponible en: [http://materias.fi.uba.ar/6715/Material\\_archivos/Apuntes%20Ing.%20Castro/67.15%20Unidad%202.pdf](http://materias.fi.uba.ar/6715/Material_archivos/Apuntes%20Ing.%20Castro/67.15%20Unidad%202.pdf).
5. CELEC EP. GENSUR [En línea]. *Corporación Eléctrica del Ecuador: 2013*. [Consulta: 14-06-2018]. Disponible en: <https://www.celec.gob.ec/gensur/index.php/84-central-eolica-villonacola-de-mayor-produccion-por-turbina-en-el-mundo>.
6. Rodríguez, Alberto; & Pierdant, Isaac. Control estadístico de la calidad de un servicio mediante graficas X y R, *Política y cultura*, n° 32 (2009), (México) pp. 151-169.
7. Sandvick Coromant. *De máquinas y herramientas* [En línea]. Mexico: 2015. [Consulta: 26-05-2018]. Disponible en: <http://www.demáquinasyherramientas.com/mecanizado/materiales-segun-la-norma-iso>.
8. González Rojas, Jorge. *Formulario de estadística*. [En línea]. México : 2013. [Consulta: 10-08-2018]. Disponible en: <http://web.uaemex.mx/PIgnacioRamirez/Documentos/MaterialDidáctico/formulario%20de%20estadística%201a%20fase.pdf>
9. Industrias, I. *Molienda*. [En línea]. 2015. [Consulta: 26-05-2018]. Disponible en: [http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06\\_Apunte%20Molienda.pdf](http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/06_Apunte%20Molienda.pdf).
10. Krahmer Martinez, Daniel. *Guía práctica para la selección de insertos de mecanizado* [En línea]. Perú: 2017. [Consulta: 26-05-2018]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/315741844\\_Guia\\_practica\\_para\\_la\\_seleccion\\_de\\_insertos\\_de\\_mecanizado](https://www.researchgate.net/publication/315741844_Guia_practica_para_la_seleccion_de_insertos_de_mecanizado).

11. Interempresas. *MonsterMill PCR UN, la especialista en rampas, inmersión y fresado de WNT* [En línea]. Mexico: 2017. [Consulta: 26-05-2018]. Disponible en: <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/187681-MonsterMill-PCR-UN-la-especialista-en-rampas-inmersion-y-fresado-de-WNT.html>.
12. NTN, Corportion. *Rodamiento de Bolas y de Rodillos*. [en línea]. 2004. [Consulta:10-08-2018]. Disponible en: <http://www.elementosindustriales.com/web/pdf/catalogogeneral.pdf>
13. Optibelt. *Manual técnico para transmisiones por correas trapeciales*. [En línea]. 2015. [Consulta: 6-08-2018]. Disponible en: <https://suministrosrsercoin.com/pdf/catalogo-correas-transmision-optibelt.pdf>
14. *Proceso de Corte*. [En línea].2014.[Consulta: 19-05-2018]. Disponible en: <http://wikifab.dimf.etsii.upm.es/wikifab/images/f/f2/GeometriaMecanizado.pdf>.
15. Union Process. *Bolas y otros medios para molienda*. [En línea]. 2012.[Consulta: 24-05-2018]. Disponible en: <http://unionprocess.com/spanish/grinding.html>.
16. Retsch. *Molino Planetario de bolas PM100* [En línea].[Consulta: 24-05-2018]. Disponible en: <https://www.retsch.es/es/productos/molienda/molinos-de-bolas/molinos-planetarios-bolas-pm-100/funcionamiento-caracteristicas/>.
17. Retsch. *Milling steving assisting* [En línea]. 2018.[Consulta: 25-05-2018]. Disponible en: <https://www.retsch.es/es/empresa/>.
18. Riba, Carles. *Diseño concurrente*. España, Barcelona:UPC, 2002. pág. 72-140.
19. Ruiz, Arturo. *Despliegue de la función calidad (QFD)* [En línea]. 2009. [Consulta: 16-05-2018.]. Disponible en: <http://web.cortland.edu/matresearch/QFD.pdf>.
20. Schulz, Bernd. 2003. *Introducción a la metalurgia*. Chile : s.n., 2003, págs. 277-288.
21. SPC Group. *Grafica de control* [En línea]. 2013. [Consulta: 10-08-2018]. Disponible en: <https://spcgroup.com.mx/grafica-de-control/>.
22. Union Process. *Equipo de reducción de tamaño de partícula* [En línea]. 2018. [Consulta: 25-05-2018]. Disponible en: <https://www.unionprocess.com/spanish/>
23. Valladares Alcántara, Juan. *Diseño práctico de un molino de bolas* (Tesis).(Ingeniería) Instituto Politécnico Nacional, Mexico, D.F. 2008. pp. 20-57
24. Ministerio de Trabajo. *Salarios mínimos sectoriales*. [En línea]. Ecuador: 2018. [Consulta:01-09-2018]. Disponible en: <http://www.ecuadorlegalonline.com/laboral/tabla-salarios>

# ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE UNA TURBINA FRANCIS DE UNA CENTRAL HIDROELÉCTRICA UTILIZANDO SOFTWARE DE ELEMENTOS FINITOS Y DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Mora Sánchez, Christian Andrés

Corporación Eléctrica del Ecuador CELEC PH - Hidroagoyán

andres.mora@celec.gob.ec

## **RESUMEN**

Uno de los principales desafíos en el campo de la generación eléctrica por medios hidráulicos es dimensionar el impacto del desgaste ocasionado por el agua en la eficiencia de la máquina. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la eficiencia de una turbina tipo Francis para una dimensión de holgura entre los álabes directores y las placas de desgaste utilizando CFD. Para llevar a cabo este estudio fue necesario obtener información real de las condiciones de operación y la geometría de toda una turbina. Se necesitó caracterizar los sedimentos del agua del río Pastaza ya que estos residuos ocasionan un deterioro acelerado de las piezas, se realizó el levantamiento tridimensional de todos los elementos de la turbina partiendo de planos 2D facilitados por CELEC EP HIDROAGOYÁN, además se realizó ingeniería inversa mediante escáner 3D de todas los elementos con geometrías complejas como el rodete y los álabes directrices y así poder generar la geometría completa para obtener el dominio computacional para estudiar y simular mediante métodos numéricos la eficiencia utilizando la metodología de la Dinámica de fluidos computacional (CFD). Con este análisis se llegó a determinar el valor real de la eficiencia con el modelo actual de la turbina con una confiabilidad del 90% en la simulación.

*Palabras clave: Eficiencia; CFD; álabe director; ingeniería de simulación; simulación virtual, laboratorios virtuales, Modelos tridimensionales*

## OBJETIVO

El objetivo del Centro de Investigación y Recuperación de Turbinas y Partes Industriales (CIRT) de la unidad de negocios Hidroagoyán es analizar la eficiencia de las turbinas tipo Francis de las centrales Hidroeléctricas existentes en el Ecuador para diferentes dimensiones de holgura entre los álabes directores y las placas de desgaste utilizando CFD.

Recopilar información necesaria de las centrales hidroeléctricas para realizar la modelación de la turbina y obtener un laboratorio virtual para determinar la eficiencia de las turbinas y visualizar en que sectores se producen otros fenómenos que se producen en la generación como los vórtices que conllevan a la formación de la cavitación que es el fenómeno que produce el desgaste de los elementos mecánicos de las turbinas y que en determinado tiempo perjudica al rendimiento de las mismas.

## INTRODUCCIÓN

En el país la energía hidroeléctrica es una de las principales formas de energía que se consume y constituye una parte importante de la vida de los seres humanos, por lo tanto, con un mayor potencial de generación, se encuentran mayores oportunidades y el alcance de la investigación y el desarrollo.

El estudio de este proyecto se enfoca en la estimación de los problemas operacionales que existen en las centrales hidroeléctricas de Ecuador, donde se tiene un modelo de turbina tipo Francis que está conformada por partes estacionarias (el caracol, alabes guía o fijos y álabes directrices) y componentes giratorios (el rodete). Aunque los álabes directrices son estacionarios, estos realizan movimientos periódicos basados en la variación de flujo o carga. Con el fin de permitir el movimiento de los mismos, se aplican pequeños espacios libres (holguras) entre las placas de desgaste de las tapas superior e inferior y los bordes de los álabes directrices. Estas holguras son un parámetro de diseño muy importante que influye directamente en la eficiencia y en la tasa de erosión de los componentes mecánicos que están en contacto con el agua.

En un determinado tiempo de operación, la turbina empieza a dar un incremento de esta holgura, el mismo que empieza a ocasionar daños en los elementos mecánicos, este incremento se da debido a que el fluido contiene una gran cantidad de partículas abrasivas que existen en las aguas de los ríos.

Con este estudio se logrará tomar medidas que atenúen la pérdida de eficiencia y desgastes prematuros lo que permitirá subir la producción de la central y abastecer de energía al sistema nacional interconectado.

## ANÁLISIS DE LA EFICIENCIA DE UNA TURBINA FRANCIS UTILIZANDO CFD

### DIMENSIÓN DE LA HOLGURA OPERACIONAL EN LOS ÁLABES DIRECTRICES [1]

La holgura operacional en los álabes directrices puede variar, en condiciones de diseño sin fluido, puede ir de 0,1 a 0,3 milímetros dependiendo de las máquinas. Sin embargo, una vez que la turbina está funcionando, el fluido interno presurizado hace que tanto la tapa inferior como la tapa superior se deformen ligeramente, aumentando eventualmente la separación. Por lo tanto, el fluido que atraviesa por

la holgura, que da lugar a un flujo secundario, altera los campos de presión y velocidad globales con fenómenos de vibración y desviación de velocidad, ocasionando daños severos, e incluso terminando en una avería que puede ser el final de la producción de una máquina.

El fenómeno que produce la holgura, es una desviación total de la velocidad del fluido aumentando distorsión del flujo a la entrada al rodete; por lo tanto conduce a una pérdida de eficiencia teórica disminuyendo su componente tangencial, según la ecuación de Euler.

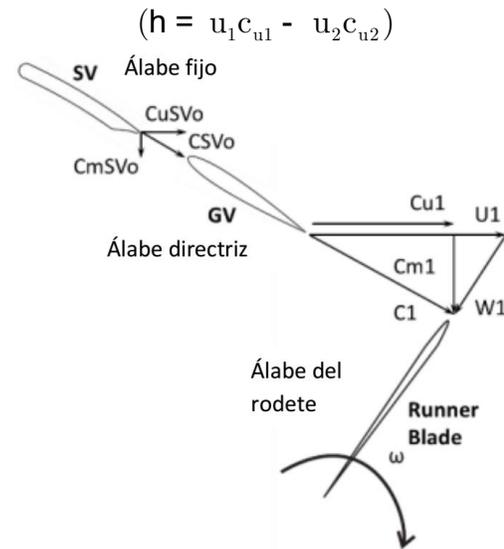


Figura 2.1. Componentes de velocidad en la turbina.

$$\eta_h = \frac{u_1 c_{u1} - u_2 c_{u2}}{gH} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde:

$\eta_h$  = eficiencia hidráulica

$C_1$  = Velocidad absoluta en la entrada del rodete

$C_{u1}$  = Componente tangencial en la entrada del rodete

$C_{m1}$  = Componente radial en la entrada del rodete

$C_{uSv0}$  = Componente tangencial en la salida del álabe fijo

$C_{mSv0}$  = Componente radial en la salida del álabe fijo

$C_{vSv0}$  = Velocidad absoluta en la salida del álabe fijo

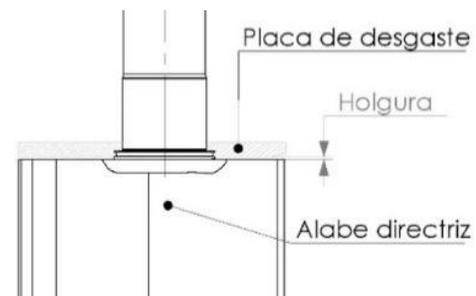


Figura 2.2. Holgura existente entre los álabes directrices y las placas de desgaste.

Si este proceso de erosión empieza a darse, tiende a dar la formación inestable y pulsante de un vórtice que se produce en la holgura, y con el tiempo deforma las superficies de forma áspera y desigual, debido a la naturaleza estocástica del tamaño de partícula y el fenómeno de la turbulencia, modificando drásticamente el perfil de los álabes directrices.

## EFFECTOS PRODUCIDOS EN LA HOLGURA ENTRE LOS ÁLABES DIRECTRICES Y PLACAS DE DESGASTE

Los álabes directrices tienen la función principal de convertir la presión en energía cinética; por lo tanto, el sistema en cascada de los álabes directrices tiene la aceleración más alta y la velocidad absoluta de descarga. Los fenómenos de flujo como la turbulencia, el flujo secundario, las fugas y la aceleración causan desgaste en los álabes directrices.

En la figura 2.3., se puede observar el desgaste de los álabes directrices, la tapa superior e inferior y el rodete de la turbina Francis.



Figura 2.3. Daños producidos debido al flujo

Estos daños conducen a mayores pérdidas en la turbina, cierre periódico, mantenimiento frecuente, etc. Se encontró que el borde de salida superior e inferior de los álabes directrices tienen una mayor cantidad de desgaste en comparación con el lado de ataque.

## PÉRDIDAS ENERGÉTICAS, POTENCIAS Y RENDIMIENTOS EN LAS TURBINAS HIDRÁULICAS [2]

En las turbinas hidráulicas las pérdidas energéticas se pueden clasificar en tres grupos: pérdidas en la instalación de la máquina, pérdidas en la máquina misma y pérdidas en el transporte o utilización de la energía que suministra la máquina.

En esta parte se tratará sólo de las pérdidas en la máquina, que son las que conciernen al diseñador y constructor de una turbina. Por ejemplo, las pérdidas en la tubería forzada que conduce el agua a presión a las turbinas hidráulicas de una central hidroeléctrica; las pérdidas en el alternador, transformadores y cables eléctricos en una central no se analizarán en este caso de estudio.

En una turbo maquinaria la transformación de energía, según el segundo principio de la termodinámica, se realiza con pérdidas. Siendo  $P_p$  la potencia perdida en la máquina; en toda turbo maquinaria hidráulica será:

$$P_{\text{absorbida}} - P_p = P_{\text{restituida}} \quad \text{Ec. 2.2}$$

El rendimiento total de la máquina será:

$$\eta_{\text{total}} = \frac{P_{\text{restituida}}}{P_{\text{absorbida}}} = \frac{P_{\text{mecánica}}}{P_{\text{hidráulica}}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

Y la ecuación de la potencia mecánica es:

$$P_{\text{restituida}} = M \cdot \omega \quad \text{Ec. 2.4}$$

M está en N.m,  $\omega$  está en rad/s y P en Watts.

Si Y es el salto energético en la máquina ( $\text{J/kg}$ ) = ( $\text{m}^2/\text{s}^2$ ) multiplicando por el caudal másico  $G = q \cdot \rho$  ( $\text{kg/s}$ ) que atraviesa la máquina se obtiene la potencia hidráulica:

$$P_{\text{absorbida}} = Q \cdot \rho \cdot Y \quad \text{Ec. 2.5}$$

Q está en  $\text{m}^3/\text{s}$ ,  $\rho$  en  $\text{kg}/\text{m}^3$ , Y está en  $\text{m}^2/\text{s}^2$  y P en Watts. Q = caudal suministrado a la turbina hidráulica. Se mide a la entrada de la turbina. Y = se denomina salto energético en la máquina.

## SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO DE TURBINAS HIDRÁULICAS [3]

Con la simulación numérica en turbinas hidráulicas se puede predecir las condiciones de funcionamiento y el análisis del flujo interno, lo que desde el punto de vista experimental es difícil o casi imposible de lograr. Una gran ventaja de la simulación es tener a disponibilidad las ecuaciones de evolución temporal de flujo y la realización de estudios paramétricos como las variaciones de las geometrías y condiciones de borde. Sin embargo aunque el desarrollo del CFD ha alcanzado un gran nivel, los resultados deben validarse con valores experimentales.

También la fuerte interacción que existe en las turbinas hidráulicas entre las partes estacionarias y rotatorias, hay que realizar un cálculo de acoplamiento de todas aquellas. Por otro lado también influye la simplificación en el modelado para los resultados numéricos que depende de muchos factores y no solamente del tipo de máquina. Por ejemplo se puede citar el modelado del flujo turbulento como el

más importante a la hora de realizar un buen cálculo numérico. En la literatura no existe hasta el momento un modelo de turbulencia universal que funcione totalmente bien en todos los casos, por lo que el modelado correcto del flujo turbulento sobre todas las piezas de la turbomáquina hidráulica constituye un problema abierto. Por lo tanto la obligatoria validación frente a diferentes modelos de turbulencia que sean apropiados permite cuantificar la influencia en el resultado final.

**FUENTES DE ERROR EN LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE TURBINAS HIDRÁULICAS [3] [4]**

En el cálculo de CFD se dan errores que son parcialmente responsables de la desviación de los resultados numéricos respecto de los valores experimentales. Por lo tanto, es correcto comparar los resultados numéricos con los resultados experimentales y estimar para los primeros unos intervalos de confianza, usando la metodología estándar del cálculo de errores que se utiliza habitualmente en el procesado de medidas experimentales. La ausencia frecuente de los intervalos de confianza en los valores numéricos se debe a la dificultad de estimarlos, puesto que existe una multiplicidad de factores que pueden dar malos resultados. Tan solo uno de esos factores, el error de discretización, puede realmente analizarse desde un punto de vista matemático riguroso. Sin embargo, la estimación del error numérico basado únicamente en tal causa es dudoso ya que la influencia de otras fuentes de error puede ser mayor. Por lo tanto, es indispensable, para la estimación de los intervalos de confianza de los resultados numéricos, conocer todas las posibles fuentes de error y su importancia relativa en un caso específico.

**METODOLOGÍA**

**OBTENCIÓN DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN LA TURBINA FRANCIS DE LA CENTRAL DE SAN FRANCISCO**

Se procede a obtener los elementos 3D en software CAD, los mismos que serán necesarios para obtener el volumen interno que en este caso será el fluido que atraviesa por la turbina y será el dominio computacional necesario para realizar la simulación en CFD.

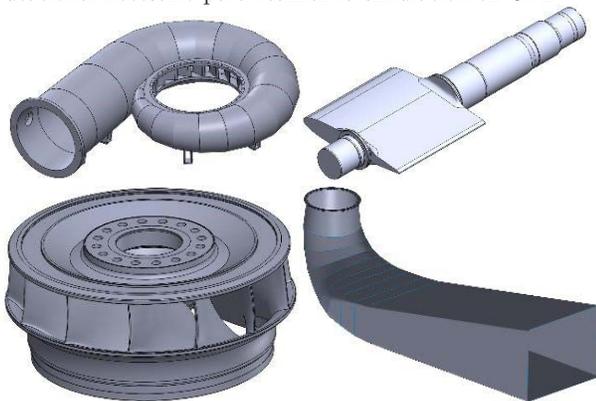


Figura 3.1. Elementos 3D obtenidos de planos dimensionales 2D

Luego de tener todos los elementos de la turbina Francis en 3D se procede a realizar el ensamble final el cual servirá para obtener el volumen interno por donde circula el fluido que será el dominio computacional necesario para realizar la simulación computacional en CFD y obtener la eficiencia de la máquina.

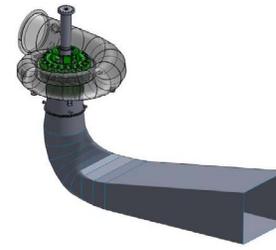


Figura 3.2. Modelo 3D de la turbina de San Francisco.

**DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)**

Con el crecimiento de la mecánica computacional, las máquinas hidráulicas virtuales son cada vez más realistas para obtener detalles menores en el flujo, que no son posibles en la prueba de modelos. La dinámica de fluidos computacional (CFD), es una de las ramas de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar los problemas que se presentan en el flujo de fluidos. El CFD se originó a partir de la combinación de la mecánica de los fluidos y el cálculo numérico.

Se utilizan ordenadores para realizar millones de cálculos requeridos para simular la interacción de los líquidos y los gases con superficies complejas, y aun teniendo ecuaciones simplificadas y superordenadores de alto rendimiento, solo se pueden alcanzar resultados aproximados.

**Creación del modelo computacional**

Luego de haber obtenido la geometría en conjunto de la turbina Francis de San Francisco mediante planos dimensionales y proceso de ingeniería inversa se procede a obtener el volumen por donde pasa el fluido que servirá para el análisis CFD y que será el modelo computacional a estudiar. Se definieron dominios separados como la caja espiral, el distribuidor, el rodete y el tubo de aspiración para luego ensamblarlos y obtener un modelo computacional en conjunto.

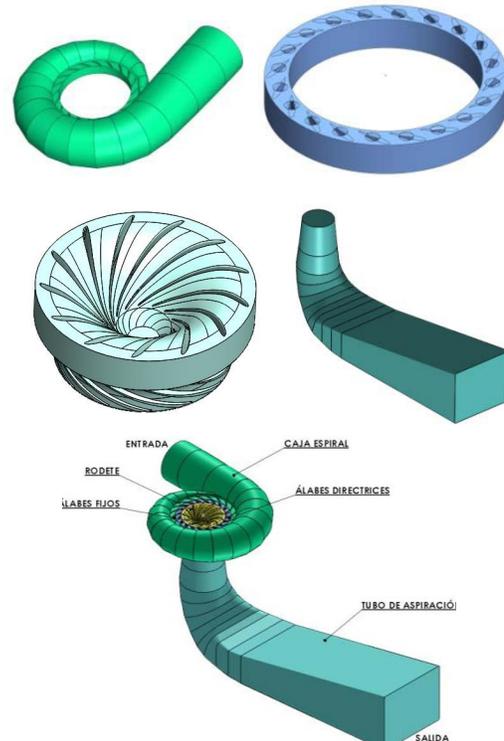


Figura 3.3. Dominio computacional de la turbina tipo Francis de San Francisco.

**Creación de las Mallas [5]**

Se realizó un mallado por separado para cada uno de los dominios (caja espiral, distribuidor, rodete, tubo de aspiración) con las superficies nombradas necesarias para colocar las condiciones de borde en CFX Pre. Se usó malla generada automáticamente con el módulo Ansys Meshing con refinamiento en las superficies necesarias para un mejor análisis y obtención de resultados.

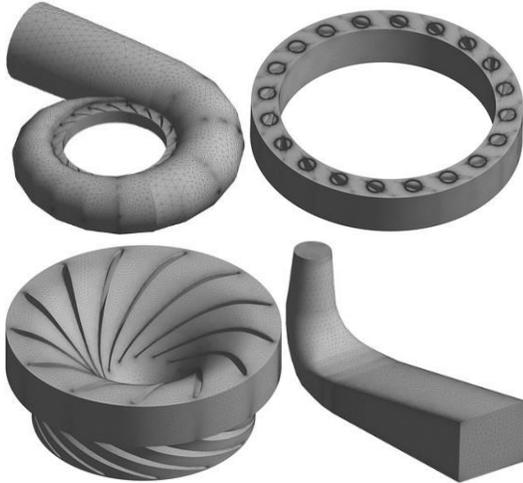


Figura3.4. Mallas generadas automáticamente

El número omega relaciona el número de elementos con el número de nodos que es un valor muy importante en una malla. Cuando dicho valor va en aumento, el recurso computacional requerido para realizar la simulación también va en incremento. La Ecuación 3.1 nos permite determinar un valor adimensional del número omega. [16].

Donde:

- NE, es el número total de los elementos. ND, es el número total de nodos.
- Luego de obtener el desarrollo de la malla de todos los elementos de la turbina, se puede determinar la calidad de la misma con la información que se obtiene de cada malla como se muestra en la tabla 3.1, y con estos valores se realiza el cálculo de omega Ω.

Tabla 3.1. Información de las mallas de la turbina para una holgura de 0,25mm.

DOMINIO COMPUTACIONAL	Número de elementos	Número de nodos	Omega Ω
CAJA ESPIRAL	3653946	674628	5,416
DISTRIBUIDOR	54857919	10591586	5,179
RODETE	8984538	1669883	5,380
TUBO ASPIRACIÓN	960146	184475	5,204
TOTAL	68456549	13120572	5,217

**Condiciones de borde y frontera**

Las condiciones de borde de entrada y de salida se obtienen de los datos operacionales de la máquina, los datos se obtuvieron de una turbina Francis de la central hidroeléctrica San Francisco perteneciente a la unidad de negocios Hidroagoyán, dichos valores son de presión estática, para lo cual es necesario calcular la presión total a la entrada sumando la presión dinámica.

Tabla 3.2. Datos de la turbina necesarios para el cálculo de la presión total.

Parámetro	Símbolo	Valor
Presión estática a la entrada [Pa]	$P_{es}$	$2.1 \times 10^6$
Diámetro entrada del caracol [m]	$\emptyset$	3.0
Caudal [m³/s]	$Q$	58
Densidad del agua [Kg/m³]	$\rho$	999.85

A continuación se realiza el cálculo de la presión total que existe en el ingreso de la turbina, en la tabla 3.2 se muestran los datos necesarios para realizar los cálculos.

$$Q = A * V_{in} \tag{Ec.3.2}$$

$$V_{in} = 8.205 \text{ m/s}$$

$$P_t = P_{es} + P_d \tag{Ec.3.3}$$

Donde:

$P_{es}$ , es la presión estática

$p_d$ , es la presión dinámica

$$P_d = \frac{1}{2} * \rho * V_{in}^2 \tag{Ec. 3.4}$$

$$P_d = 33655.96 \text{ Pa}$$

$$P_t = 2133655.96 \text{ Pa}$$

Tabla 3.3. Condiciones de borde para la simulación de la turbina.

Condición	Tipo	Símbolo	Valor
INLET	Presión Total [Pa]	$P_t$	2133655.96
OULET	Presión estática [Pa]	$P_{es}$	700000
GRAVITY	[m/s²]	G	9.777
MATERIAL	AGUA	-	-
INTERFACES MALLAS	GGI	-	-
BOUNDARY TIPE	Wall	-	-
TURBULENCE	K-Epsilon	-	-

Parámetro	Símbolo	Valor
Temperatura del agua [°C]	$T$	16
Densidad del agua [kg/m³]	$\rho$	999.85

Luego de ingresar todas las variables y condiciones de borde correctamente se procede a realizar el cálculo de la simulación numérica.

La simulación numérica en turbomáquinas hidráulicas tiene un gran potencial para el análisis de flujo interno y para la predicción de las condiciones de funcionamiento, lo que desde el lado experimental es difícil de lograr, dicha simulación es un proceso iterativo que tiene una gran ventaja frente a las medidas experimentales que es la disponibilidad de las ecuaciones matemáticas para flujos que se resuelven hasta que se llega a una solución que alcance con las condiciones requeridas de criterios de convergencia.

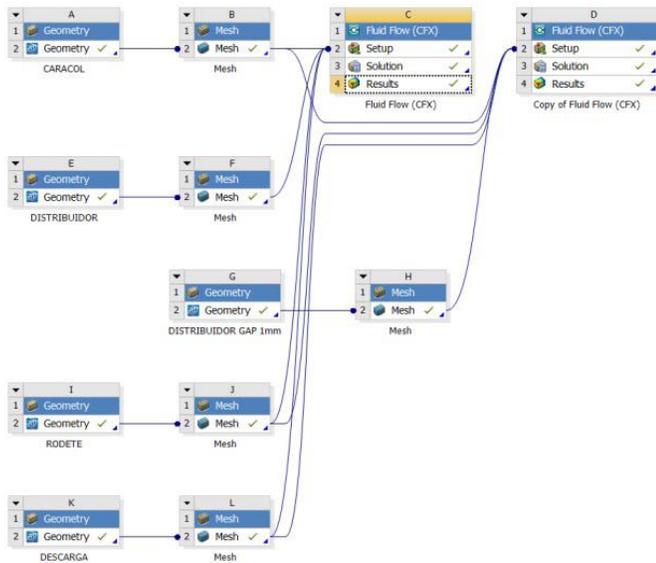


Figura 3.5. Esquema del proyecto en ANSYS 17.0.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Los resultados de las simulaciones numéricas del fluido en el diseño de la turbina Hidráulica de la central San Francisco se obtuvieron en un estado estable que es suficiente para determinar pérdidas de energía y mediante herramientas de visualización se obtuvo gráficas como la velocidad, la presión y la eficiencia de la turbina mediante expresiones.

Los resultados de la primera simulación se obtuvieron con una holgura entre las placas de desgaste de las tapas superior e inferior y los álabes directrices de 0.25mm como valor máximo sugerido por la empresa constructora de la turbina.

#### 4.1.1. Resultados de la simulación, obtención de velocidad y la presión del fluido interno con una holgura de 0,25mm

En la figura 4.1, 4.2, 4.3, se muestran los resultados de los cálculos obtenidos en el software ANSYS CFX para la turbina Francis de la central San Francisco.

En la figura 4.1, se puede observar claramente como la velocidad del fluido en las paredes es casi cero, y en la sección entre la entrada de los álabes directrices y la salida del rodete se puede observar que la velocidad del fluido es mayor, por lo que en estos sectores es donde se presentan diferentes tipos de efectos hidráulicos como turbulencias que pueden interferir en la eficiencia, condiciones de

En la figura 4.1, se puede observar a detalle los contornos de la distribución de la velocidad del fluido, en esta zona es donde el fluido aumenta su mayor velocidad desde la entrada del rodete hasta la salida del mismo, el cambio de la velocidad en este sector es el que ocasiona el giro de la turbina para la generación y cuando el fluido pasa del rodete hasta la descarga, la velocidad tiende a bajar nuevamente.

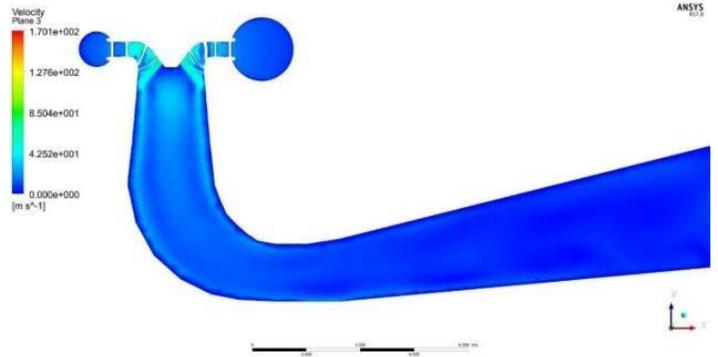


Figura 4.1. Resultado de la simulación en CFX del perfil de velocidad con holgura de 0.25mm.

Se puede notar que el incremento de la velocidad se da desde los álabes fijos del pre distribuidor con un valor aproximado de 18 m/s, hasta aguas debajo de la entrada del rodete con un valor aproximado de 50 m/s. Esta distribución de velocidad requiere un flujo de aceleración elevado, por lo que se tiene una distribución de presiones a la entrada del pre distribuidor mayor que a la salida del rodete.

Tabla 4.1. Ensayo de rendimiento de turbina de San Francisco.

Ensayo Ingeniería previo desmontaje  
08/07/2016

HORA	Apertura Dist.	Q	P1		P2		Z0	Z3	Pot. E.	Pot. H.	Rend. Turb.	Pot. Hidr.	Pérdidas Conducción
	%	m3/s	bar	Pa	bar	Pa	msnm	msnm	MW	MW	%	MW	MW
	medido	medido	medido	cambio u.	medido	cambio u.	medido	medido	medido	(P1-P2).Q	Pot. E/Pot. H.	pg.(Z0-Z3)	Pot. Hidr-Pot. H.
22:25	37,94	17,0	21,0	2100000	0,71	71000	1497,12	1276,19	29,3	34,5	84,94	36,63	2,13
22:16	46,25	25,9	20,9	2090000	0,72	72000	1497,04	1276,24	40,3	52,3	77,11	55,77	3,50
22:09	55,63	33,4	20,7	2070000	0,75	75000	1496,99	1276,30	55,5	66,6	83,29	71,88	5,25
8:15	55,17	33,2	20,6	2060000	0,70	70000	1495,94	1276,20	56,2	66,1	85,06	71,14	5,08
8:40	65,24	40,3	20,5	2050000	0,75	75000	1496,92	1276,39	70,6	79,6	88,70	86,67	7,08
9:10	71,20	45,1	20,5	2050000	0,80	80000	1496,83	1276,39	79,2	88,8	89,14	96,95	8,10
9:35	77,91	50,8	20,0	2000000	0,80	80000	1496,75	1276,45	90,9	97,5	93,20	109,13	11,60
10:00	85,22	56,0	20,0	2000000	0,80	80000	1496,61	1276,54	100,1	107,5	93,10	120,18	12,66
10:25	89,92	59,7	19,5	1950000	0,80	80000	1496,38	1276,56	105,8	111,6	94,77	127,98	16,34
10:46	93,46	62,4	19,5	1950000	0,80	80000	1496,52	1276,58	109,5	116,7	93,84	133,84	17,15

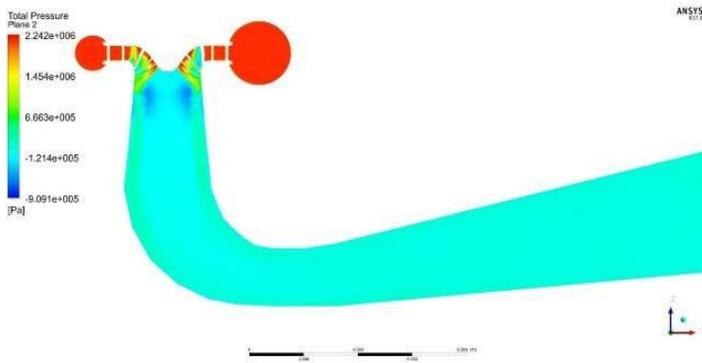


Figura 4.2. Resultado de la simulación en CFX del perfil de la presión del fluido con una holgura de 0.25mm.

En la figura 4.2, se puede observar la distribución de presión total (presión estática más la presión dinámica) sobre un plano que pasa por el centro del eje del rodete. Esta figura corresponde al punto de operación de la turbina con un caudal de 58 m<sup>3</sup>/s. En este plano se puede ver que la presión en el caracol es la presión mayor o presión inlet (presión dinámica) ingresada en la simulación en el CFX Pre con un valor de 2133655.96 Pa, y luego de pasar el fluido por el rodete se puede observar que existe una presión menor hasta llegar a una presión de salida con la que se le configuró en el outlet de 700000 Pa.

En la figura 4.2, se puede observar que la presión aguas arriba desde los álabes fijos tiene un valor mayor a 1,5 MPa hasta llegar a la presión de entrada al caracol de 2,13 MPa, y la presión aguas abajo desde la entrada del rodete son mucho menores a las presiones anteriores, en algunas zonas se pueden deducir incluso que son inferiores a la presión atmosférica, lo que puede provocar otros fenómenos de desgaste en la turbina como cavitación, el mismo que deteriora rápidamente las partes mecánicas en esas regiones que están en contacto con el fluido.

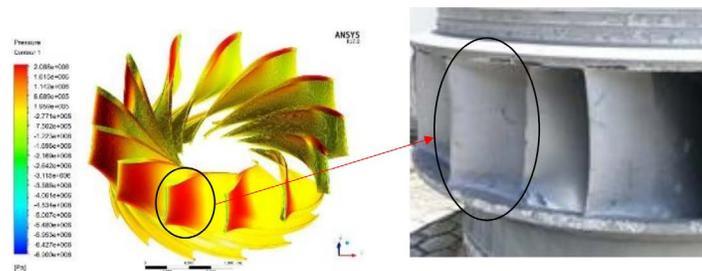


Figura 4.3. Perfil de la presión del fluido en las superficies de los álabes fijos del rodete con una holgura de 0,25mm.

En la figura 4.3, se puede observar cómo actúan las presiones en las superficies de los álabes del rodete, con lo que se puede deducir visualmente que en las partes donde la presión es más alta, es donde el rodete va a tener mayores esfuerzos, y comparando con un rodete en físico que está desgastado se ve claramente que los daños se dan en la parte por donde ingresa del fluido.

**Obtención de la eficiencia mediante expresiones (CFD Post)**

Una expresión ingresada en CFD Post, es una cadena de caracteres utilizada para definir alguna cantidad de interés que podría ser utilizada para algún propósito en un análisis. Se puede definir expresiones utilizando: Constantes dimensionales, variables de campo

escalares, funciones matemáticas intrínsecas, funciones de cantidad integrada, cualquier combinación matemática dimensionalmente consistente de lo anterior.

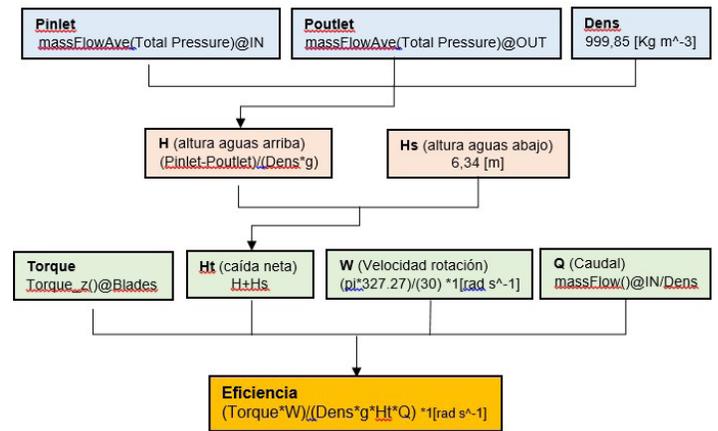


Figura 4.4. Diagrama de flujo con expresiones para el cálculo de la eficiencia.

Para obtener el valor de la eficiencia de la turbina tipo Francis de la central San Francisco, en el CFD Post se ingresaron diferentes expresiones para calcular dicho valor, las expresiones fueron ingresadas en el siguiente orden como se indica en el siguiente diagrama de flujo.

Luego de resolver las expresiones en el CFD Post, se obtiene un valor de la eficiencia del 80,266% para una holgura de 0,25mm que comparado con los datos de la tabla 4.1 de la eficiencia calculados en campo por el departamento de Ingeniería de la unidad de negocios de Hidroagoyán son casi similares con lo cual se puede dar por validado el modelo virtual ya que estos datos son comparados con datos de generación reales de la central Hidroeléctrica San Francisco.

**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

Se ha obtenido el laboratorio virtual luego de haber realizado todo el modelo 3D de la turbina, lo cual ha sido necesario para lograr obtener el dominio computacional para el análisis de la eficiencia, este laboratorio servirá para analizar otros estudios a futuro de otros fenómenos que se dan en las turbinas tipo Francis, estos estudios no se han podido realizar en el país debido a la dificultad de obtener con facilidad información necesaria para la modelación de la turbina en conjunto.

Se logró determinar la eficiencia virtual o numérica gracias a la obtención de la modelación de la turbina en conjunto, así validando el dominio computacional a razón de que se obtuvieron resultados favorables que fueron valores muy cercanos a los valores experimentales.

Para obtener mejores resultados de simulación en CFD, se debería realizar la obtención de una malla estructurada como por ejemplo con ICEM CFD, con lo que se llegaría a tener un valor del factor omega igual a 1, ya que el objetivo para tener un excelente mallado, es llegar a tener el mismo número de nodos y el mismo número de elementos, esto se logra estructurando la malla con elementos que sean de forma hexaédrica.

**BIBLIOGRAFÍA:**

- [1] Nicola, F, *Impact of a Guide Vane Clearance Gap in a Francis Turbine Flow*, University of Studies of Padua Department of Industrial Engineering. Mataix, C, Turbomáquinas Hidráulicas,
- [2] Madrid-15 (España): *ICAI Litoprint*, 1975.
- [3] Laín, S; García, M; Quintero, B; Orrego, B, Simulación Numérica del Flujo en Turbomáquinas Hidráulicas, Medellín Colombia: *Revista Universidad EAFIT*. Vol. 44. No.152, Octubre, Noviembre, Diciembre 2008.
- [4] V. Hidalgo, X. Luo, X. Escaler, B. Ji y A. Aguinaga, *Implicit large eddy simulation of unsteady cloud cavitation around a plane-convex hydrofoil*, Beijing: ScienceDirect, 2015.
- [5] ANSYS, *Workshop Mesh Creation Introduction to ANSYS Mechanical*, Realize Your Product Promise, 2017.
- [6] ANSYS, *Introduction to CFD Methodology, CFX, Realize Your Product Promise*, 2016.
- [7] CELEC EP, *Generación Hidroeléctrica en Unidades de Negocio del Ecuador*. 2016. [En línea]. Available: <https://www.celec.gob.ec/>.
- [8] Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, *Plan Maestro de Electricidad 2016-2025*, [En línea]. Available: <http://www.energia.gob.ec/biblioteca/>.
- [9] Koirala, Ravi; Zhu, Baoshan; Prasad Neopane, Hari, Effect of Guide Vane Clearance Gap on Francis Turbine Performance, *MDPI Energies*, 2016.

## RESISTENCIA MECÁNICA Y ELÁSTICA DE CINTURONES DE SEGURIDAD ORIGINALES Y ELABORADOS LOCALMENTE

Reyes, Gorky <sup>1</sup>; Chas, Sandra <sup>2</sup>; Bohórquez, Alejandra <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Coordinador investigación, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador.

<sup>2</sup> Coordinador Administrativa, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador.

<sup>3</sup> Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador. gureyesca@uide.edu.ec

### **RESUMEN**

En el presente artículo compara las características mecánicas de los cinturones de seguridad originales versus los cinturones de seguridad fabricados localmente de los seis vehículos más comercializados en el Ecuador. Mediante la realización de diferentes ensayos normados se establece que los cinturones de fabricación local no cumplen con las exigencias que determina la norma INEN NTE 2675. Según los ensayos destructivos realizados a los cinturones, ciertas muestras no cumplen con los límites mecánicos que exige la normativa como se pueden apreciar en los resultados cuantitativos, por lo que necesitan ser mejorados en su estructura y material para ser instalados en los vehículos que circulan en el país actualmente.

*Palabras clave: Anclaje, esfuerzo máximo, seguridad activa, tracción.*

### **ABSTRACT**

In this article, we compare the mechanical characteristics of the original safety belts versus the locally manufactured safety belts of the six most commercialized vehicles in Ecuador. By carrying out different standardized tests it is established that the locally manufactured belts do not meet the requirements established by the INEN NTE 2675 standard. According to the destructive tests carried out on the belts, certain samples do not comply with the mechanical limits required by the regulations. they can be seen in the quantitative results, so they need to be improved in their structure and material to be installed in the vehicles that circulate in the country at present.

*Keywords: Anchorage, maximum effort, active safety, traction.*

## INTRODUCCIÓN

Los cinturones de seguridad representan el elemento de seguridad pasiva más importante dentro del vehículo, en donde se estima que desde su inclusión en vehículos terrestres urbanos en el año de 1959 ha sido el responsable de salvar más de un millón de vidas y cada año evita cerca de cien mil muertes, además según datos de las principales direcciones de tránsito y seguridad gubernamentales de todo el mundo, el cinturón de seguridad de tres puntos, siendo el más usado en cuestión, reduce las probabilidades de muerte en un accidente cerca de un 50% (P. Guiterrez. 2011).

En el Ecuador existen varios distribuidores que comercializan diferentes elementos de seguridad tanto activa como pasiva del vehículo, los más importantes y los que serán el objeto de este estudio, son los cinturones de seguridad. Dado que los mismos tienen varias procedencias, es normal que tengan una normativa de fabricación propia de cada país para la elaboración de estos elementos, en el caso del Ecuador, todos los procesos que se realicen se rigen al INEN; en donde los cinturones de seguridad cumplen con ciertas características tales como su resistencia elástica y mecánica, las mismas que sirven especialmente para brindar más seguridad al conductor y ocupantes, sin embargo, al no existir una normativa específica en el país para la normalización de estándares de calidad de cinturones de seguridad, sino solamente una norma de seguridad conocida como la norma INEN RTE 034 en donde sí se encuentra en uno de sus apéndices cierta información sobre todo lo que se refiere a los cinturones de seguridad (INEN, 2016) aunque de forma muy general, se tomará como referencia diferentes normativas internacionales que permitirá un análisis más exhaustivo de los tipos de cinturones que ingresan y se comercializan actualmente en el territorio ecuatoriano, ya que el objetivo de este estudio es determinar si los cinturones de seguridad que se tienen en el país, ya sean de fabricación regional u original, cumplen con las expectativas de seguridad establecidas por el INEN, y de esa manera determinar qué tipo de cinturón tiene mejores características mecánicas, teniendo en cuenta factores como tipos de costuras, ángulos de anclaje, distribución de cargas, tipos de materiales usados para la fabricación de los cinturones (Hernández, M., Jesús, J., Pérez, M., 2009).

## PRUEBAS Y PROCEDIMIENTOS

### ÁNGULOS DE INCLINACIÓN DEL ASIENTO, ANCLAJES Y CHAPA DEL CARRO

De acuerdo a la figura 1, en el caso de ensayos de cinturones de seguridad, el carro, que solo transportará el asiento, tendrá una masa de  $400 \pm 20$  kg. En el caso de los ensayos de dispositivos de retención, el carro, con la estructura del vehículo unida al mismo, tendrá una masa de 800 kg (DUE, 2015). Sin embargo, en caso necesario, la masa total del carro y de la estructura del vehículo podrá aumentar por incrementos de 200 kg. Fuente: (CEPE, 2014).

En ningún caso la masa total podrá diferir del valor nominal más de  $\pm 40$  kg. 2. Respecto al asiento; será de construcción rígida y presentará una superficie lisa. Se respetarán las indicaciones de la figura 1 del presente anexo, asegurándose de que ninguna parte metálica esté en contacto con el cinturón. En el caso de un cinturón equipado con un dispositivo de ajuste de altura, dicho dispositivo estará fijado a una estructura rígida o a una parte del vehículo en el que vaya normalmente montado, la cual estará fijada firmemente al carro de ensayo. Los anclajes se dispondrán como se muestra en la figura 13. Los puntos que corresponden a la disposición de los anclajes indicarán la posición de la fijación de los extremos del cinturón en el carro o,

en su caso, en los transductores de la carga. Los anclajes para uso normal son los puntos A, B y K si la distancia entre el borde superior de la hebilla y el agujero de fijación del soporte no es superior a 250 mm (DUE, 2015).. En caso contrario, se utilizarán los puntos A1 y B1. La tolerancia en la posición de los puntos de anclaje será tal que cada punto de anclaje estará situado, como máximo, a 50 mm de los correspondientes puntos A, B y K indicados en la figura 1 o, en su caso, de los puntos A1, B1 y K.

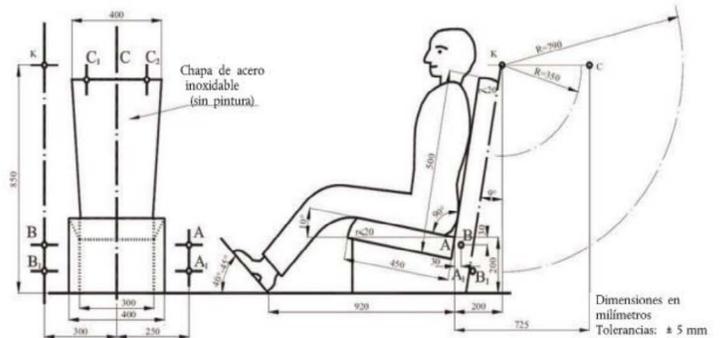


Figura 1: Carro, anclajes y asiento.

Fuente: (CEPE, 2014)

### 2.2. PRUEBAS EN LOS CINTURONES DE SEGURIDAD; ENSAYO DE LA HEBILLA COMÚN

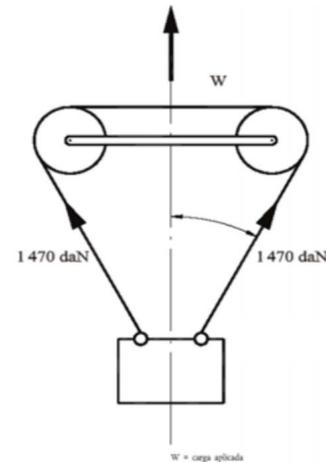


Figura 2: Ensayo de la hebilla común.

Fuente: (CEPE, 2014).

Las hebillas con partes comunes a dos cinturones de seguridad se someterán a una carga que permita simular las condiciones de utilización en un vehículo con los asientos regulados en su posición media. Se aplicará simultáneamente una carga de 1470 daN (DUE, 2015) a cada una de las correas.

### ENSAYO DE ABRASIÓN Y MICRO DESLIZAMIENTO - PROCEDIMIENTO 1

Este procedimiento se utiliza para los casos en los que la correa cambie de dirección al pasar a través de una parte rígida. Durante este ensayo, los ángulos de las correas se mantendrán como se muestra en la figura 3 y se mantendrá la carga permanente de 0,5 daN (Cornell Law School. 2009). En los casos en que la correa cambie de dirección más de una vez al pasar por una parte rígida, se podrá aumentar la carga de 0,5 daN de manera que, al pasar por dicha parte rígida, se alcancen los 300 mm de desplazamiento de correa prescritos.

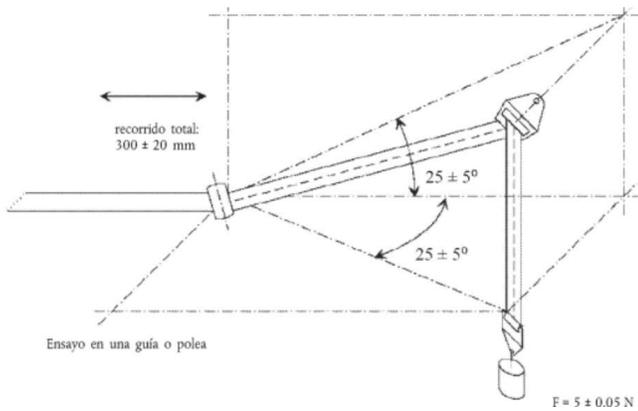


Figura 3: Ensayo de abrasión y microdeslizamiento  
Fuente: (CEPE, 2014).

### ENSAYO DE ABRASIÓN Y MICRO DESLIZAMIENTO - PROCEDIMIENTO 2

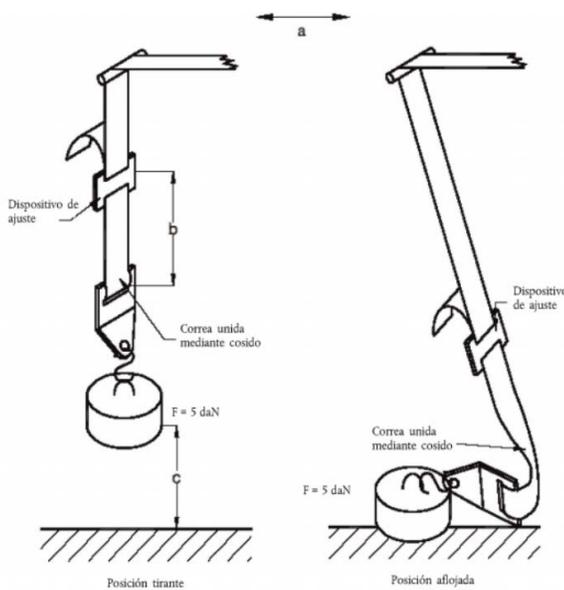


Figura 4: Procedimiento de tipo 3 y ensayo de microdeslizamiento.  
Fuente: (CEPE, 2014).

En el extremo inferior de la correa se colocará una carga de 5 daN. El otro extremo se someterá a un movimiento de vaivén de una amplitud total de  $300 \pm 20$  mm (Cornell Law School. 2009). También se verifica que, en el banco de pruebas, la correa, en su posición aflojada, desciende en forma de curva cóncava desde el dispositivo de ajuste, como en el vehículo. La carga de 5 daN aplicada en el banco de pruebas se guiará verticalmente de tal modo que se evite que la carga se balancee y que la correa se enrosque. La pieza de fijación se sujetará a la carga de 5 daN como en el vehículo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### METODOLOGÍA

Se realizan distintas pruebas a ocho muestras de cinturones de seguridad (cuatro de vehículos sedán y cuatro de vehículos SUV) para verificar si cumplen con las normas previamente especificadas. Las pruebas que se realizaron fueron de resistencia mecánica estática y de

deformación al máximo esfuerzo en el laboratorio de análisis, esfuerzos y vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

Estas pruebas las llevan a cabo personal capacitado del laboratorio, que se encargan de verificar, observar y demostrar la veracidad de los resultados que se obtienen, adicional a esto, las personas del laboratorio también emiten un informe de los resultados de las pruebas con cada uno de los cinturones.

La finalidad de realizar estas pruebas es demostrar mediante la práctica, si los cinturones que se comercializan en Ecuador, ya sean originales o de fabricación local, cumplen con las especificaciones de resistencia elástica y deformación al máximo esfuerzo de acuerdo a las diferentes normas vigentes de seguridad mencionadas anteriormente.

## MATERIALES

En total se utilizan ocho cinturones, los cuales se dividen en dos grupos de cuatro, los del primer grupo son de vehículos tipo sedán (Chevrolet Sail, Hyundai Accent, Kia Rio y un cinturón nacional para vehículos de este tipo) y los del segundo grupo son de vehículos tipo SUV (Chevrolet Vitara J20, Hyundai Tucson IX, Kia Sportage y un cinturón nacional para vehículos de este tipo). Los materiales de los cuales están fabricados los cinturones son por lo general nylon con un porcentaje de algodón (70% nylon/30% algodón) (TWP, 2016), sin embargo los cinturones nacionales aparentemente son fabricados de poliéster y algodón en diferentes porcentajes (50% poliéster / 50% algodón) aunque este dato no ha sido confirmado técnicamente puesto que para hacerlo, se necesita de un estudio de telas, y se desvía del objetivo principal del presente artículo.

Es importante conocer los materiales que se utilizan en la fabricación del cinturón de seguridad, debido a que estos afectan directamente al desempeño del cinturón a lo largo de su vida útil (M. Medina, M. Flores, V. López 1996) y se convierten en un factor determinante para mejorar la seguridad en los automotores y de brindar una idea de qué tanto se cumple la norma con los cinturones que se encuentran instalados en los vehículos que circulan actualmente.

Tabla 1: Materiales utilizados en la fabricación de las muestras originales y genéricas

Muestras a analizar	Porcentaje de materiales reales		Porcentaje de materiales según norma		Cumple	
	Nylon	Algodón	Nylon	Algodón	Sí	No
Originales	70 %	30%	70%	30%	X	
Nacionales	50%	50%	70 %	30%		X

Fuente: Autores

### Normativa

El presente artículo se rige estrictamente al uso de la norma INEN NTE 2675, misma que a su vez hace referencia a normativas de diferentes países del mundo, especialmente a la UNECE 14 (Europea), la FR 49-571 (estadounidense), y la normativa coreana GB 14166 (INEN. 2016).

Se continúa con estas normas puesto que son las que se encuentran vigentes en el mundo actualmente, y al ser muy estrictas en los países donde se las aplica, se logra que el estudio que se realiza sea lo más acertado a la realidad posible y demuestre si Ecuador se encuentra direccionado y capaz de cumplir con dichas normas o mejorar y reforzar los aspectos faltantes para cumplirlas a futuro con el fin específico de determinar si los cinturones de seguridad que se utilizan en la actualidad en los vehículos más comercializados de Ecuador, ya

sean originales o alternos, cumplen con los parámetros de las normas y por lo tanto si son aptos para proteger a los ocupantes en las diferentes circunstancias que ponen la vida de las personas en riesgo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

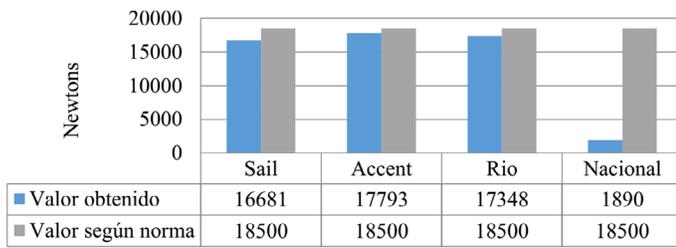


Figura 5: Prueba de tracción o rotura en muestras SEDAN.

Fuente: Autores

Las muestras originales cumplen con aproximadamente el noventa por ciento del total estipulado por la norma FR 49-571 de 18500 N, es decir ninguno llega al límite de rotura que debería llegar.

Para la muestra nacional, el valor obtenido en la prueba de tracción o rotura es de un 10% del valor mínimo que se estipula y no cumple por ningún motivo la norma en mención.

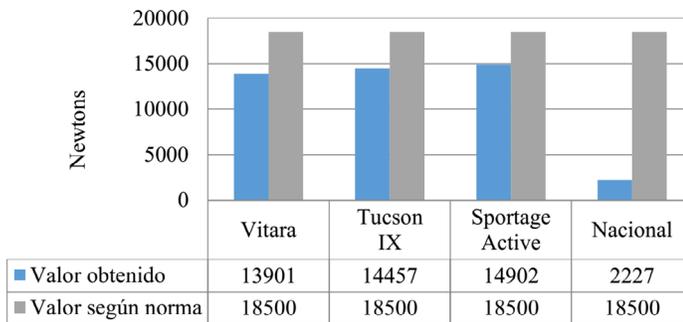


Figura 6: Prueba de tracción o rotura en muestras SUV.

Fuente: Autores

En la gráfica 2, los resultados obtenidos en la prueba de tracción de los cinturones originales de vehículos SUV demuestran que dichos cinturones cumplen con aproximadamente el setenta y ocho por ciento del total estipulado por la norma FR 49-571 de 18500 N, es decir ninguno de ellos llega a los valores mínimos que la norma dicta. Por otra parte, la muestra nacional cumple únicamente con un poco más del 12% de la fuerza mínima establecida por la norma para que pase las pruebas, por lo tanto no cumple la pruebas ni se compara con las muestras originales evaluadas, es muy probable que la muestra nacional no cumpla con las pruebas por la proporción de materiales utilizados y también por el tipo de cosido que no es el adecuado para cinturones de seguridad.

En las pruebas de porcentaje de deformación al máximo esfuerzo SEDÁN se mide el ancho del cinturón de seguridad, las muestras originales presentan un ancho de 46 mm. Como su nombre lo dice, esta prueba consiste en medir la deformación a lo ancho que se genera en el cinturón de seguridad después de ser sometido a un máximo esfuerzo, los rangos establecidos por la norma son de 46 mm a 48 mm como rango máximo de deformación para que el cinturón cumpla con las pruebas, una vez que se ha llevado a cabo esta prueba en las muestras originales, se observa que su deformación es mínima (tan

solo de 0,4 mm) por lo cual cumplen con la norma sin ningún tipo de problema, mientras que la muestra nacional no cumple desde el principio con la norma puesto que su ancho está por debajo de los rangos mínimos definidos sin embargo al realizar la prueba, la muestra nacional presentaba una medida inicial de 42,7 mm y después de la misma se obtiene una medida de 41,1 mm, la reducción del ancho de la muestra se debe netamente a la proporción de los materiales que se utilizaron en la fabricación de este cinturón.

Para la realización de la prueba del porcentaje de deformación SUV de la misma manera se toma las medidas de las muestras originales (46 mm para todos los casos), y se las somete a un máximo esfuerzo para determinar la nueva medida de ancho del cinturón y de esta manera conocer si cumplen o no con la norma FR 49-571, una vez realizada la prueba se toma las nuevas medidas de las muestras de cinturones originales los cuales presentan ahora un ancho de 46,3 mm, por lo tanto se encuentran dentro de los parámetros establecidos de la norma (46 mm a 48 mm) y cumplen las pruebas correctamente. Respecto a la muestra nacional, al existir tan solo un modelo de cinturón fabricado en el país y aplicado para cualquier vehículo, los resultados son exactamente los mismos que en las pruebas de vehículos SEDÁN, en donde la muestra tiene en un principio un ancho de 42,7 mm y posterior a la prueba tiene un ancho de 41,1 mm. Puesto que el ancho nominal de esta muestra no cumple con los parámetros mínimos dictaminados en la norma que se aplica, la muestra nacional no pasa esta prueba.

## CONCLUSIONES

En los ensayos de tracción o resistencia mecánica estática, ninguno de los cinturones pasó las pruebas en el banco, sin embargo los vehículos de procedencia coreana (de acuerdo a los parámetros establecidos por la norma K.M.V.S.S de Corea) dieron mejores resultados “en resistencia” que los vehículos americanos (cinturones fabricados en China y no son los adecuados para una resistencia total a las pruebas impuestas por la norma FR49-571), mientras los cinturones de fabricación nacional no alcanzan ni siquiera el 12% de la resistencia requerida antes de romperse para completar las pruebas con éxito, esto se debe especialmente al tipo de material utilizado en la fabricación del cinturón ya que no se encuentra en las proporciones adecuadas y con una fuerza mínima de 1890 N el cinturón se rompe en la zona de costura, misma que al no estar bien hecha posiblemente ayudó al fallo anticipado de las muestras.

Todas las muestras de cinturones de seguridad originales de las categorías sedán y SUV cumplieron con éxito la prueba de deformación al máximo esfuerzo, esto debido a que ningún cinturón se deformó más de lo que dicta la norma FR49-571, los cinturones nacionales de ambas categorías NO cumplieron con éxito la prueba de deformación al máximo esfuerzo debido a un desfase en el porcentaje de materiales utilizados y medidas no estandarizadas por lo que no son aptos para su aplicación en ningún tipo de vehículo sedán o SUV hasta que se mejore sus condiciones.

Los cinturones fabricados en el Ecuador actualmente no brindan ninguna garantía de seguridad, ya que incumplen totalmente las pruebas de tracción y deformación al máximo esfuerzo, pruebas que son fundamentales para avalar el correcto funcionamiento de estos elementos de seguridad y su aplicación no solo no protegería a los ocupantes de los vehículos, sino que sería el causante de generar lesiones graves en el caso de presentarse un accidente de tránsito.

## REFERENCIAS

1. Gutiérrez. Fayerwayer. 2011. [Disponible]: <https://www.fayerwayer.com/2011/09/elorigen-de-el-cinturon-de-seguridad/>
2. INEN. 2016 [Disponible]: <http://www.normalizacion.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2016/09/RTE-034-4R.pdf>
3. M. Hernández, J. Jesús y M Pérez. 2009) [Disponible]:<http://www.mdconsult.internacional.edu.ec:2071/lib/bibliovirtualuidesp/reader.action?docID=10505308&ppg=3>
4. Martí. 2000. “*Sistemas de seguridad y confort en vehículos automóviles.*” Barcelona.
5. J .Borja., J. Fenoll,y J. Seco de Herrera. 2009 [Disponible]:<http://www.mdconsult.internacional.edu.ec:2071/lib/bibliovirtualuidesp/detail.action?docID=10505296>
6. J. Flores. 2016 [Disponible]:<http://www.muyinteresante.es/innovacion/articulo/automoviles-coches-sistemas-deseguridad-pasiva>
7. Nexu. 2016 [Disponible]: <http://www.nexu.mx/blog/sistemas-de-seguridad-activa-y-pasiva-que-todo-auto-debe-tener/>
8. Comisariato Europeo del Automóvil. 2017 [Disponible]: <https://www.seguridadvial.net/vehiculo/seguridad-pasiva/51-seguridad-pasiva>
9. M. Moriche. 2008. [Disponible]: [https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/5535/PFC\\_Manuel\\_Moriche\\_Guerrero.pdf](https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/5535/PFC_Manuel_Moriche_Guerrero.pdf)
10. E. Celis. 2009. [Disponible]: <http://automecanico.com/auto2020/seatbelt04.html>
11. Land Transport Safety Authority. 2002. [Disponible]:<https://www.nzta.govt.nz/resources/rules/seatbelts-and-seatbelt-anchorage-2002-index.html>
12. Universidad Politécnica Salesiana UPS. 2015. “*Análisis de los sistemas faltantes de seguridad vehicular de la categoría M1 en la norma NTE INEN 034:2010 y una propuesta de mejora.*”
13. Gaetani [Online] [Disponible]: <http://www.gaetani.com.ar/cintas-para-seguridad/cinturonde-seguridad-1.html>
14. AEADE, 2014 [Disponible]: <http://www.aeade.net/servicios/sobre-el-sector-automotor/>
15. Ministerio de comercio exterior, 2014 [Online]
16. Diario oficial de la Unión Europea. 2015. [Disponible]<https://www.boe.es/doue/2015/304/L00001-00096.pdf>
17. Cornell Law School. [Disponible]: <https://www.law.cornell.edu/cfr/text/49/571.209>
18. Narrowtex. 2013. [On line] [Disponible]: <http://narrowtex.com/banda-trenzada-del-cinturonde-seguridad/?lang=es>
19. M. Medina, M. Flores, V. López 1996. “*Cinturón de seguridad y gravedad de lesiones en accidentes de tráfico en carretera. México*”

## ESTUDIO Y ANÁLISIS DE CALIDAD DE SERVICIO EN LA TRANSMISIÓN POR AM DIGITAL MEDIANTE EL USO DE CÓDECS EN USRP

Pérez Insuasti, Juan José <sup>1</sup>; Zabala, Mónica A. <sup>2</sup>;  
Pazmiño, Alexandra O. <sup>3</sup>; Moreno, Hugo O. <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ITS Carlos Cisneros, Riobamba, Ecuador

<sup>2</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba, Ecuador

<sup>3</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Riobamba, Ecuador

<sup>4</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Informática y Electrónica, Riobamba, Ecuador

juanjos19\_19@yahoo.es, m\_zabala@esPOCH.edu.ec, apazmino\_a@esPOCH.edu.ec, h\_moreno@esPOCH.edu.ec,

### **RESUMEN**

El espectro electromagnético es un bien no renovable, el rango de frecuencias utilizado para transmisiones de radio son AM y FM. Varios son los formatos y técnicas probados hasta ahora para la transmisión de radio en formato digital.

El sistema de transmisión se implementa con módulos desarrollados en GNU Radio. La recepción corresponde al uso del software DREAM junto con el software HSDSDR. Además de las tarjetas Ettus USRP N210, Ettus USRP B200, Rtl-Sdr Realtek Rtl2832U.

El resultado de este estudio fue la calidad de los niveles de servicio evaluados en la velocidad de transmisión (bps) y la relación señal / ruido (SNR) para determinar la fidelidad en la recepción de señales digitales. El sistema DRM utiliza las mejores tecnologías de compresión de sonido porque utiliza los algoritmos de audio y voz del MPEG-4 que proporcionan una excelente calidad de sonido a bajas tasas de bits, como la codificación AAC.

*Palabras clave: Amplitud modulada (AM), radio mundial digital (DRM), velocidad de transmisión (bps), relación señal a ruido (SNR), radio definida por software (SDR)*

### **ABSTRACT**

The electromagnetic spectrum is a non-renewable good, the frequency range used for radio transmissions is AM and FM. Several are the formats and techniques tested so far for radio transmission in digital format.

The transmission system is implemented with modules developed in GNU Radio. The reception corresponds to the use of the DREAM software together with the HSDSDR software. In addition to the Ettus USRP N210 cards, Ettus USRP B200, Rtl-Sdr Realtek Rtl2832U.

The result of this study was the quality of the service levels evaluated in the transmission speed (bps) and the signal-to-noise ratio (SNR) to determine the fidelity in the reception of digital signals. The DRM system uses the best sound compression technologies because it uses the MPEG-4 audio and speech algorithms that provide excellent sound quality at low bit rates, such as AAC encoding

*Keywords: Modulated amplitude (AM), digital radio mondiale (DRM), speed rate (bps), noise signal relation (SNR), software defined radio (SDR) .*

# INTRODUCCIÓN

DRM es un estándar para la transmisión de señales digitales de radiodifusión, definido inicialmente para las frecuencias menores a 30MHz en las bandas de LF, MF y HF, se lo denomina también como DRM30. (Salinas, 2011) (Sánchez, y otros, 2013). El sistema permite tener una mejor calidad de sonido similar a las FM comerciales, mejora la distribución del ancho de banda y efectos multitrayectoria gracias a que utiliza la codificación OFDM. Para cubrir la banda VHF de transmisiones de señal en FM se incorpora el estándar DRM+, una variante de DRM para estas frecuencias. (Salinas, 2011) (Sánchez, y otros, 2013)

## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DRM

El sistema DRM está diseñado para ser usado en cualquier frecuencia debajo de los 30 MHz, es decir dentro de las bandas de transmisión de onda larga, onda media y onda corta, con las limitaciones de canalización y las variables condiciones de propagación a lo largo de estas bandas. Están disponibles diferentes modos de transmisión que satisfacen estas limitaciones de operación. Cada modo se define por parámetros de transmisión. ((ETSI), 2014)

## DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA DRM

La Figura 1, representa las etapas de la arquitectura de DRM para el transmisor. A la entrada del diagrama se tiene dos tipos de información:

Audio y datos codificados que se combinan en el multiplexor de servicio principal, con diferentes relaciones de protección.

Canales de información denominados Canal de Acceso Rápido (FAC) y Canal de Descripción del Servicio (SDC) que no ingresan al multiplexor.

El multiplexador combina los niveles de protección de los servicios de datos y de audio. (Sánchez, y otros, 2013)

# MATERIALES Y MÉTODOS

## INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la implementación del sistema de transmisión de Radio AM Digital mediante USRP, a través de los módulos desarrollados en GNU Radio. Se describe además la recepción, con la utilización del software DREAM en conjunto con HSDR. Para la emisión de las señales de radiofrecuencia se utiliza las tarjetas USRP N210 y la tarjeta Rtl-Sdr Realtek Rtl2832U.

La configuración del transmisor DRM está determinada por una gran cantidad de parámetros, estos dependen uno de otros, siendo en ciertas circunstancias una estructura compleja. Los parámetros siguen una configuración jerárquica, lo cual permite la definición de múltiples parámetros de bajo nivel como como la duración del símbolo y la duración del intervalo de guarda a través de parámetros de orden superior Siguiendo esta estructura, es posible definir un grupo pequeño de parámetros por el usuario que permiten una configuración completa del transmisor. Los parámetros de nivel superior son: (Gil, y otros, 2015) (Sánchez, y otros, 2013)

- RM
- SO
- Bandera UEP para una alta protección de bytes
- Tipo de código de audio y velocidad de muestreo de la entrada de audio
- Esquema de mapeo MSC y SDC
- Velocidad de código MSC y SDC
- Bandera de entrelazado: corta o larga
- Nombre de la estación y mensaje de texto

En este proyecto el codificador será implementado para el modo de robustez A, B, C con un valor de Ocupación del Espectro igual a 2,3 y 4 lo que corresponde a un ancho de banda de 5,10 y 20kHz respectivamente, y utilizando únicamente EEP. Para el mapeo de los canales MSC, SDC, FAC se utiliza el mapeo estándar con 16-QAM para el MSC y 4-QAM para el SDC y FAC. La tasa de código es de 0.5. El entrelazado de células será largo. (Gil, y otros, 2015) (Sánchez, y otros, 2013) (Salinas, 2011)

La Figura 2, muestra los bloques de configuración de los parámetros de nivel superior iniciales del sistema, desarrollado en GNU Radio para la transmisión de la señal con modulación en DRM. (Pérez, 2018).

Una vez definidos los parámetros iniciales del sistema de transmisión, se genera la información que va a ser enviada por cada trama de datos MSC, SDC y FAC. La información del MSC la compone la fuente y la codificación de audio, mientras que las otras dos tramas son generadas automáticamente.

*Fuente de audio:* El canal MSC del codificador requiere como entrada un archivo de audio sin comprimir, es decir archivos en formato wave (.WAV). Para los canales FAC y SDC, las entradas requeridas siguen el formato establecido por el estándar, ver. (Pérez, 2018)

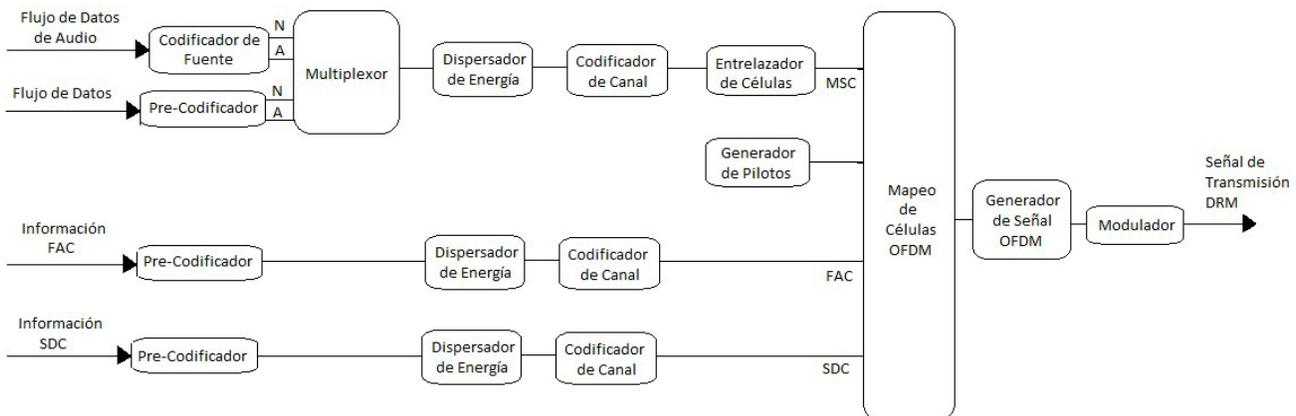


Figura 1: Arquitectura del estándar DRM

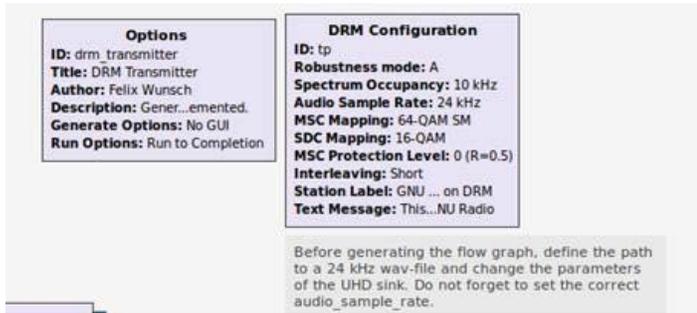


Figura 2: Parámetros iniciales configurados

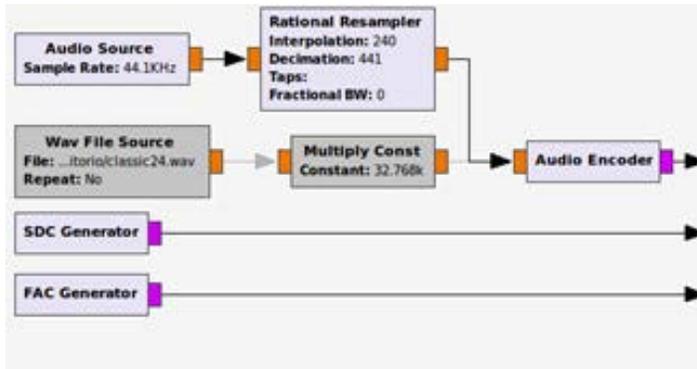


Figura 3: Tramas MSC, SDC y FAC

**Codificación de audio:** DRM utiliza los algoritmos de un subconjunto del estándar MPEG-4 para la codificación de audio. Existe una codificación para la música y dos para la voz. El subconjunto MPEG4 AAC, que incluye herramientas de robustez contra errores para transmisiones en audio mono y estéreo. El subconjunto de MPEG-4 CELP, que codifica muestras de voz para así tener una mayor robustez en la transmisión de voz en mono, usado en los casos cuando se necesita una baja tasa de bits o se necesita alta robustez a los errores. El subconjunto de MPEG-4 HVXC, que codifica muestras de voz para tasas de bits muy bajas, lo que provee alta robustez a errores de transmisión de voz en mono. El estándar DRM utiliza el formato AAC para comprensión y codificación de audio el cual consta de dos modos: AAC y xHE-AAC. Estos modos se combinan con las herramientas SBR y PS con el objetivo de obtener una comprensión de mayor calidad, ver (Sánchez, y otros, 2013)

**Multiplexor:** El multiplexor combina las transmisiones de audio y datos a un solo flujo de bits. En esto proceso, los servicios de datos pueden colocarse en la parte protegida superior o inferior, lo que permite protección contra errores para diferentes servicios. En el caso de la aplicación se enviará la información del texto y nombre de la estación transmisora, ver Figura 4. (Sánchez, y otros, 2013)

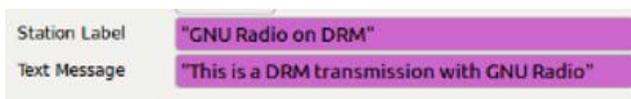


Figura 4. Datos enviados en la transmisión.

Se añaden nuevos bloques que procesan la información de cada trama por separado. Estos bloques son el Scrambler y el MLC Factory Block, el primero realiza las funciones de dispersador de energía, mientras que el segundo la codificación del canal, ver Figura 5. (Sánchez, y otros, 2013)

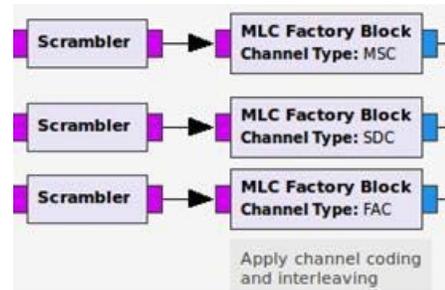


Figura 5. Dispersador de energía y Codificación de canal.

**Dispersador de energía:** Como los patrones sistemáticos pueden dar como resultado una regularidad no deseada que afecta la señal transmitida o el procesamiento de la señal de forma negativa, los bits se codifican mediante la adición de una secuencia aleatoria de bits o PRBS, ver Figura 6. El objetivo de esta secuencia es romper cadenas largas de constantes o ceros para crear una distribución uniforme entre los bits. (Sánchez, y otros, 2013)

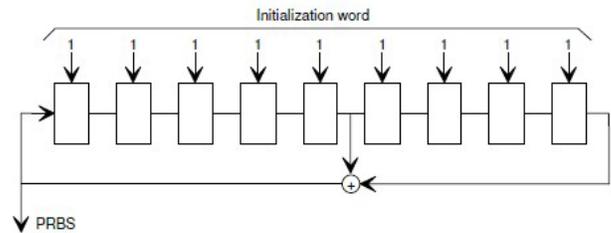


Figura 6. Generación de PRBS con el uso de shift registers.

**Codificación de canal:** Al utilizar QAM el estándar DRM las posiciones de bits más propensos a tener errores consiguen mayor protección. Una decodificación eficiente es necesaria para que los datos sean recibidos correctamente, siempre que exista una diferencia resultante en las relaciones de señal a ruido en los canales MSC y SDC. Esta diferencia se lleva a cabo cuando el MSC utiliza 64-QAM y el SDC 16-QAM, de la misma forma cuando el MSC utiliza 16-QAM y el SDC 4-QAM. (Sánchez, y otros, 2013)

**Entrelazado de células:** El entrelazado de células solo se usa para el MSC y realiza un entrelazado en el dominio de frecuencia.

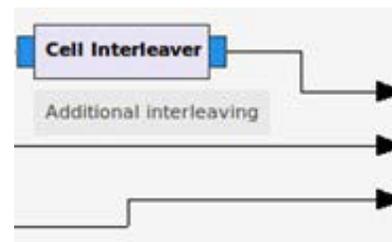


Figura 7. Entrelazado de células.

El principio del entrelazado de células se puede apreciar en la Figura 8. Utiliza el mismo algoritmo de entrelazado que el entrelazado de bits, pero también ofrece un modo "entrelazado largo". En este modo, se utiliza un esquema convolucional para aumentar la robustez de transmisiones en canales que sufren un desvanecimiento severo selectivo en tiempo y frecuencia como es típico para frecuencias inferiores a 30 MHz. El retraso del entrelazado siempre es un número entero múltiplo de la longitud de un cuadro de transmisión. DRM30 usa un factor D = 5 y para DRM+ un valor D = 6. Se determina un tiempo como compensación óptima entre el rendimiento y retraso de procesamiento; en el caso de DRM30, esto resulta en un retraso total de 2.4 segundos, ver Figura 9. (Sánchez, y otros, 2013)

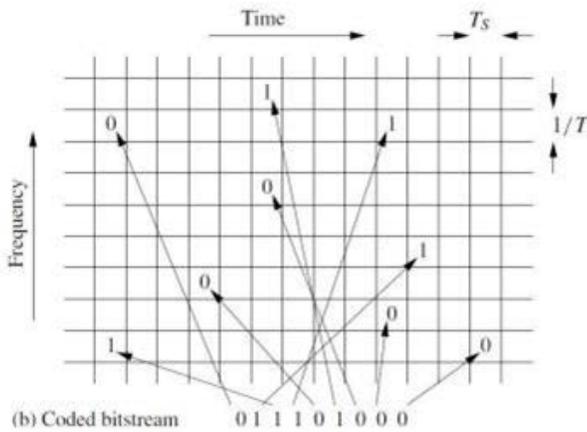


Figura 8. Entrelazado en tiempo y frecuencia

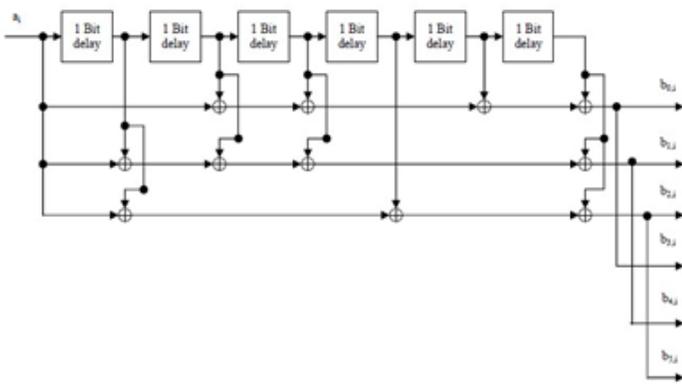


Figura 9. Codificador Convolutivo

**Mapeo de células OFDM:** El mapeo de células OFDM coloca las células MSC, SDC y FAC en el plano de tiempo-frecuencia llamada trama de transmisión. Una trama de transmisión consiste en una concatenación de un cierto número de símbolos OFDM que está determinado por la elección del RM. Además, múltiples tramas de transmisión se agrupan en una supertrama de transmisión, ver Figura 10.

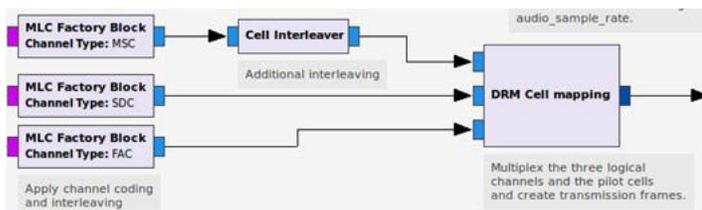


Figura 10. Mapeo de Células OFDM y Células Piloto.

Además de los tres canales, hay cuatro diferentes símbolos piloto o de referencia que ayudan en la demodulación del receptor. Las células de referencia de frecuencia representan ondas sinusoidales continuas a 750 Hz, 2250 Hz y 3000 Hz. Se utilizan para la detección de una señal DRM y corrección de desplazamiento de frecuencia. Estas las células no están presentes en RM E, DRM +. (Pérez, 2018)

**Generación de señal OFDM:** Para convertir la señal del dominio de frecuencia al dominio de tiempo, se utiliza la Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT) o su versión computacional más eficiente, Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT), ver Figura 11. (Gil, y otros, 2015)

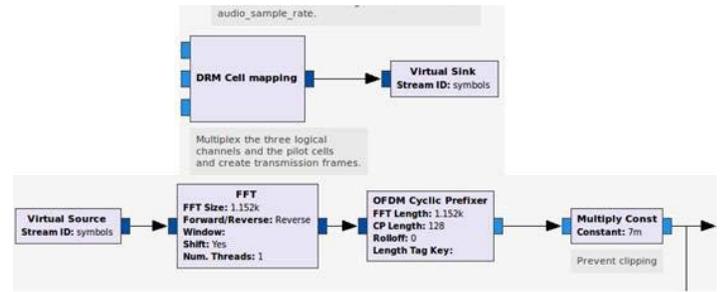


Figura 11. Generación de señal OFDM.

Para OFDM también se inserta un prefijo cíclico para el manejo de varios trayectos. La duración varía con la elección del RM. En DRM30, puede ser de hasta 7.33 ms de duración y por lo tanto cubrir trayectos múltiples con una longitud de 2200 km. El prefijo cíclico en DRM + está fijado a una duración más corta de 0.25 ms y, por lo tanto, maneja componentes multitrayecto con una longitud de hasta 75 km. (Daound, y otros, 2009) (Sánchez, y otros, 2013)

## RESULTADOS

Se desarrolló una interfaz gráfica para la configuración y transmisión de la señal en DRM, siendo mucho más intuitiva para usuarios en general, como se puede ver en la Figura 12.



Figura 12. Interfaz GUI DRM Transmitter.

En la Figura 13 y en la Figura 14 se puede observar la señal emitida por el transmisor.

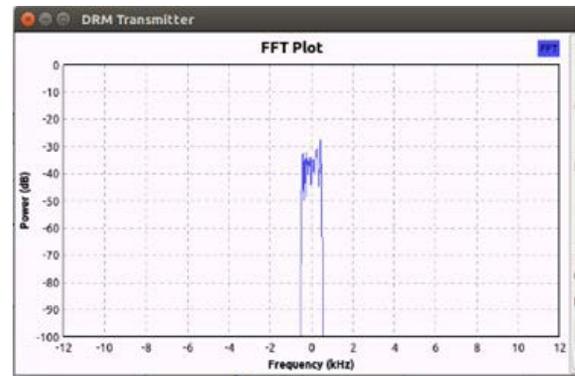


Figura 13. Análisis espectral señal emitida por el transmisor.

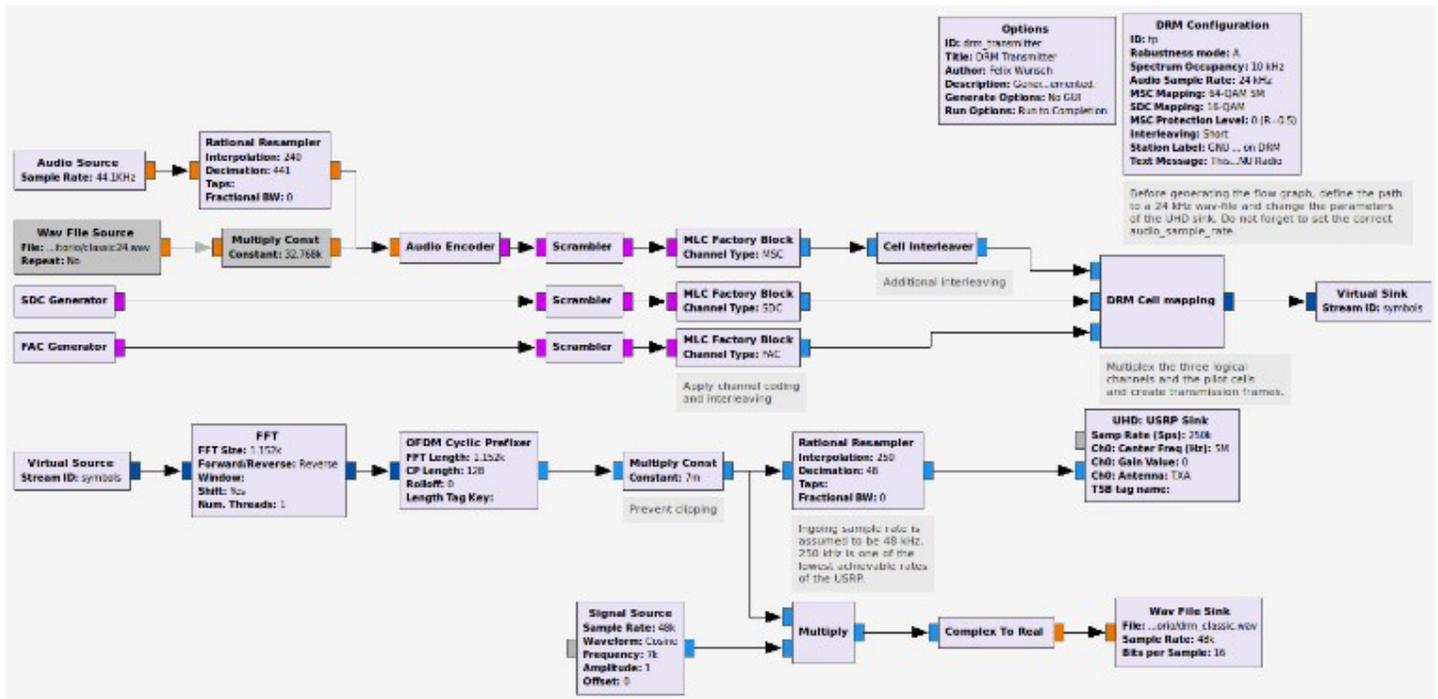


Figura 15. Puesta en marcha del sistema. Execute flow graph.

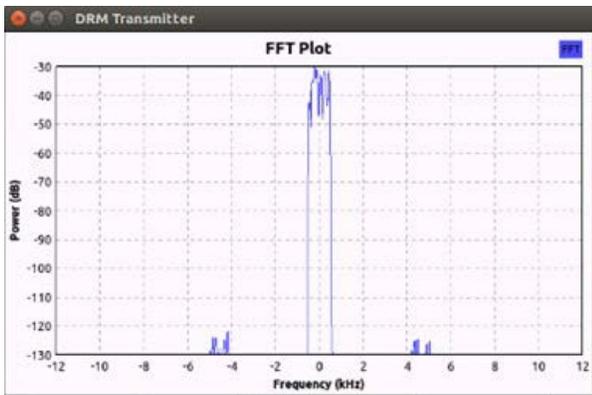


Figura 14. Análisis espectral señal emitida por el transmisor.

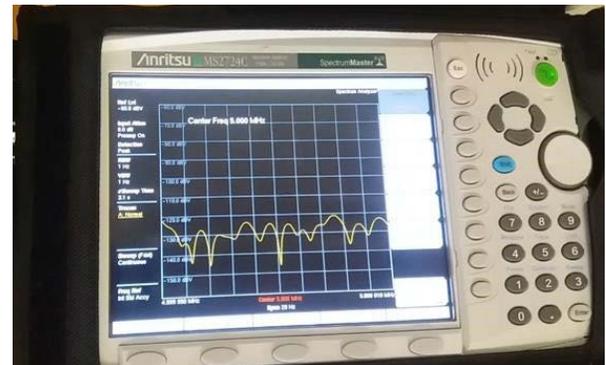


Figura 17. Señal transmitida, mostrada en el analizador de espectros.

Para la puesta en marcha del sistema de transmisión se ejecuta el flow graph. Como se puede observar en las Figura 15, en las cuales se realiza la transmisión de una señal generada a través de GNU Radio.

Para comprobar que la señal se ha transmitido se corrobora con la utilización de un analizador de espectros. Como se puede comprobar en la Figura 16, Figura 17, Figura 18.

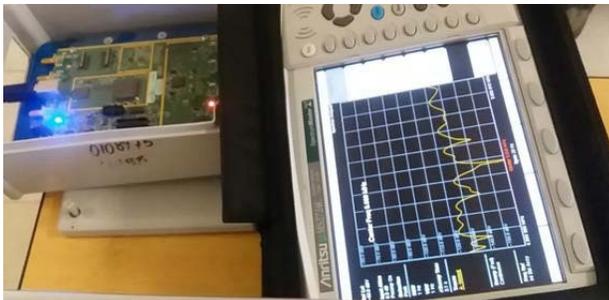


Figura 16. Tarjeta USRP y señal mostrada en el analizador de espectros.



Figura 18. Señal transmitida a 5 MHz.

Complementario a la transmisión de la señal se puede generar un archivo en .WAV codificado y modulado con DRM, para ser procesado a través del software Dream SDR.

La Figura 19, muestra la pantalla principal del software DREAM en la cual se puede apreciar el nombre de la estación y la codificación del audio.



Figura 19. Pantalla principal DREAM. Modo A, Ancho de Banda 5kHz.

En la Figura 20, se muestra el análisis espectral de la señal con los niveles de potencia definidos por la longitud de onda o frecuencia. La señal ocupa un ancho de banda de 10 kHz.

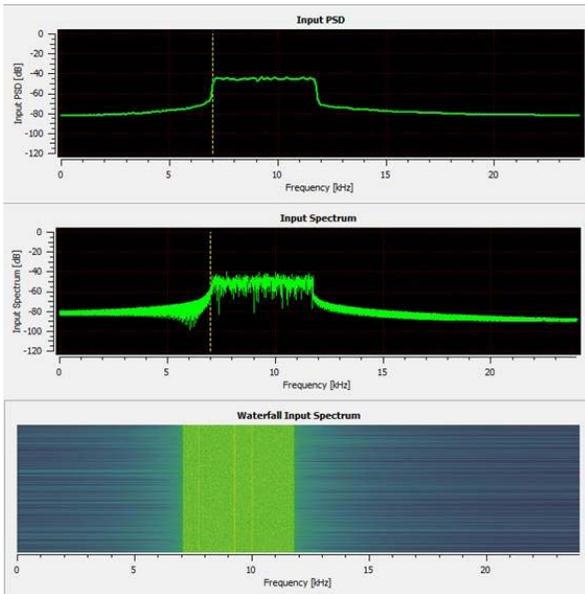


Figura 20. Input Spectrum.

La señal se mantiene estable en 35.2 dB, siendo posible verificar en la Figura 21.

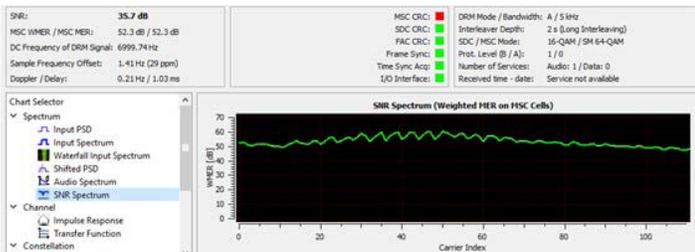


Figura 21. Pantalla principal SNR Spectrum. Modo A, Ancho de Banda 5kHz.

La Figura 22 muestra el diagrama de constelaciones de los canales MSC, SDC y FAC.

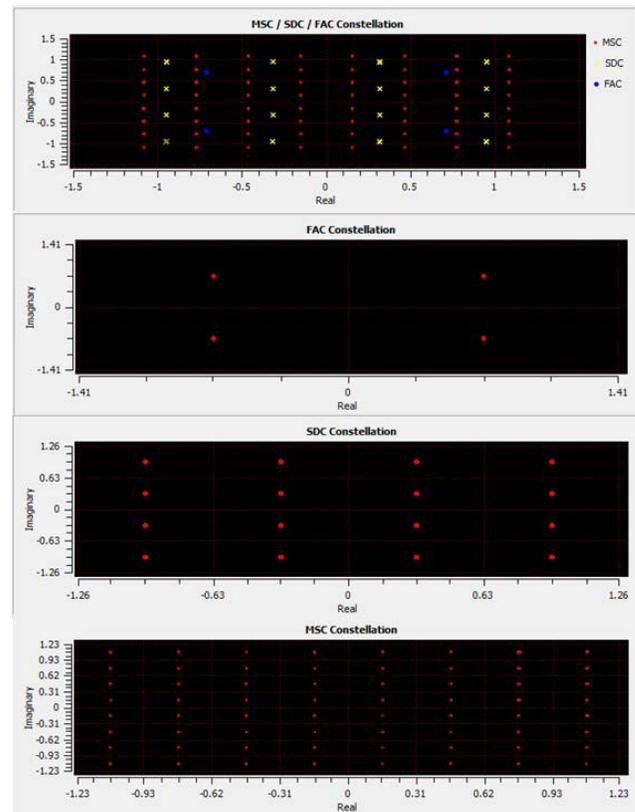


Figura 22. Diagrama de constelación de la modulación QAM.

Los tres modos de robustez configurados tuvieron una variación pequeña referente a cada parámetro de velocidad de transmisión y relación de señal a ruido. Con una ocupación espectral de 3, una tasa de código de 0.5, un entrelazado largo, y una modulación en MSC de 64-QAM y en SDC de 16-QAM, un ancho de banda de 10kHz se obtuvo (23.62 kbps y 17.3 dB en Modo A), (17.12 kbps y 21.50 dB en Modo B), (10.08 kbps y 14.05 dB en Modo C), podemos observar en base a los resultados que las características de funcionamiento de cada modo de robustez para un determinado canal de transmisión varían los valores de la velocidad de transmisión y la relación señal a ruido, ofreciendo el modo B una mejor protección de la señal con respecto al ruido, mientras que el modo A ofrece mayor velocidad de transmisión.

El resumen de los datos obtenidos se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 1: Resumen Datos obtenidos por el sistema

Modo	Ancho de banda (kHz)	MSC	SDC	Velocidad (kbps)	SNR (dB)
		X-QAM	X-QAM		
		1	2		
A	5	64	16	12.74	35.7
A	5	16	4	8,84	68
A	10	64	16	23.62	17.3
A	10	16	16	18,44	71,8
A	10	16	4	18,44	46,3
A	20	64	16	71.96	22,7
B	5	16	4	6.9	26.3
B	5	64	16	9,92	40,8
B	10	64	16	17.12	21.5
B	10	16	16	14.56	17.7
B	10	16	4	14.56	23.6
B	20	64	16	42,9	34,3
C	10	16	4	11,48	35
C	10	16	16	9,18	22,4
C	20	64	16	10,08	14,05

Elaborado por: El Autor  
Fuente: (Pérez, 2018)

Como resume del análisis del comportamiento de la señal frente a las distintas características de los medios de robustez y los parámetros iniciales del transmisor se adjunta la Figura 23 y la Figura 24 en que se observa el comportamiento de la velocidad de transmisión y la relación de señal a ruido (SNR) de los tres modos de robustez.

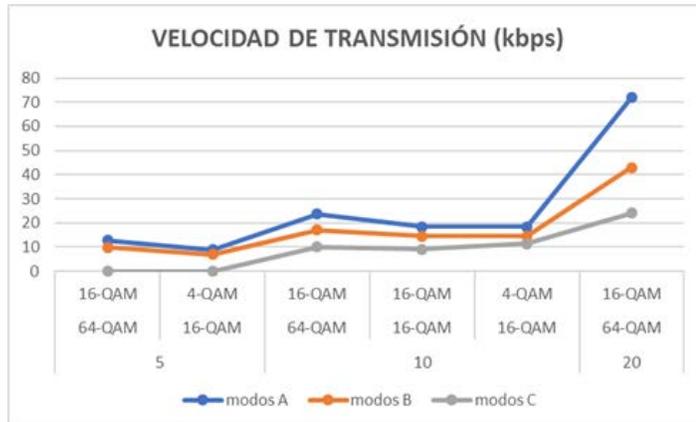


Figura 23. Velocidad de transmisión de los tres modos de robustez.

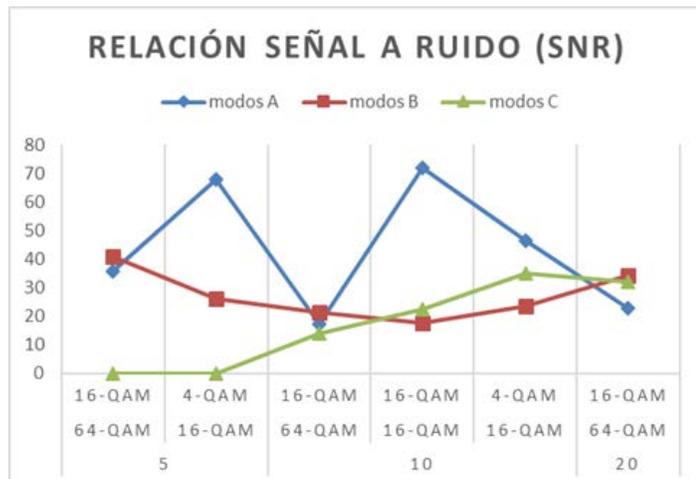


Figura 24. Relación de señal a ruido de los tres modos de robustez.

El comportamiento de la velocidad de transmisión y la relación de señal a ruido son muy similares en los tres modos de robustez, las cuales varían dependiendo el ancho de banda y la modulación QAM escogida. Sin embargo, en una transmisión con un ancho de banda de 20kHz la velocidad de transmisión se dispara en picos muy altos como se aprecia gráficamente tiene un porcentaje más alto de diferencia de los otros dos.

El valor de la relación de señal a ruido obtiene un valor alto en un ancho de banda de 5kHz con una modulación de 16-QAM (MSC) y 4-QAM (SDC), y con un ancho de banda de 10kHz con una modulación de 16-QAM (MSC) y 16-QAM (SDC). Se podría concluir que es el mejor modo de robustez para la transmisión de señales es el modo de robustez A. La modulación QAM con mayor estabilidad en el sistema es en el canal MSC de 16-QAM y en el canal SDC de 4-QAM, dando mejores resultados para la transmisión de la señal.

## CONCLUSIONES

Se ha diseñado e implementado un sistema de transmisión de AM digital a través del estándar DRM para determinar la calidad de servicios de la emisión de las señales en diferentes condiciones del medio, con lo cual se determinó la fidelidad en la recepción de señales digitales.

Se ha determinado que los valores de la velocidad de transmisión y la relación de señal a ruido varían según el modo de robustez, el ancho de banda y la modulación QAM utilizada.

Usando el códec AAC, se requiere un ancho de banda de 5kHz para realizar una transmisión estable de la señal comparada con la emitida por una estación FM analógica.

Los modos de robustez se determinaron para ciertas características del medio, siendo el modo A, el más fiable, con una alta velocidad de transmisión y relación de señal a ruido, lo cual determina que se puede utilizar el estándar DRM para transmisiones en media y baja frecuencia.

El sistema DRM emplea las mejores tecnologías de compresión de sonido ya que usa los algoritmos de audio y voz del MPEG-4 que brinda excelente calidad de sonido a bajas tasas de bit como la codificación AAC, las codificaciones de voz CELP y HVXC, complementada con Replicación de Banda Espectral SBR como su codificación digital principal. La SBR mejora la calidad de audio percibida y también puede emplear la codificación Estéreo Paramétrica para las señales estéreo.

El trabajo más eficiente del sistema se realizó con los parámetros configurados con el modo A de robustez, la ocupación del espectro en 3, un ancho de banda de 10kHz, una tasa de código de 0.5, un entrelazado largo y una modulación para el canal MSC de 16-QAM y para el canal SDC de 4-QAM.

La calidad total de recepción y fidelidad de servicio de recepción portátil y móvil serán similares a la actuación en receptores fijos. El sistema cubre los efectos del multi-camino y las características de cambios de propagación presentes en transmisiones de onda larga, media y onda corta.

## REFERENCIAS

- (ETSI) European Telecommunications Standards Institute (DRM) *Digital Radio Mondiale System Specifications*. - 2014.
- Cardenas A. E. J. *Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal Codificada (COFDM)*. - Chile: Universidad Austral de Chile : [s.n.], 2005.
- Daound O. y Al-Qawasmí A. *Efficient Performance of COFDM-Based DVB-T*. - Philadelphia: Department of Communication and Electronics Engineering : [s.n.], 2009.
- F. Institute Bosch R *Using MPEG-4 audio for DRM Digital Narrowband Broadcasting*. - Geneva : [s.n.], 2000.
- Gil Pedro David y Santillán Franklin *Implementación de las Etapas de Codificación, Mapeo y Mapeo Inverso QAM de un Transmisor de Radio Digital Según el Estándar DRM30*. - Cuenca : [s.n.], 2015.
- González J. M. V. *Simulación de un Esquema de Modulación/ Demodulación OFDM Utilizando un Modelo de Canal Multitrayectoria*. - Guayaquil : Escuela Superior Politécnica del Litoral : [s.n.], 2008.
- ISO/IEC Information Technology - *Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information - Part 7: Advanced*

- Audio Coding (AAC)* . - [s.l.] : International Standard: ISO/IEC, 2006.
8. ISO/IEC *Information Technology-Coding of Audio-Visual Objects- Part3: Audio* . - [s.l.] : International Standard: ISO/IEC. - Vol. 20014.
  9. Pérez Juan José *Estudio y Análisis de calidad de servicio en la transmisión por AM digital mediante el uso de códecs en USRP* . - Riobamba: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo : [s.n.], 2018.
  10. Prieto G. Pichel I. *Digital Radio Mondiale: Broadcasting and Reception* . - Dubrovnik, Croatia : [s.n.], 2004.
  11. Quiroz Juan Francisco *Emulador de un Sistema de Comunicaciones utilizando tecnología SDR* . - Latacunga: ESPE : [s.n.], 2010.
  12. Salinas Martha Alejandra *Comparación De Tecnologías De Radio Digital Para Su Aplicación En México* . - Mexico : [s.n.], 2011.
  13. Sanchez C. S. *Códigos Convolucionales* .
  14. Sánchez Felipe y Sagbay Giovanni *Estudios y análisis de la Estandarización y regulación para la migración del sistema de radio analógico al digital en el Ecuador* . - Quito : [s.n.], 2013.
  15. Villalva P. M. F. *Estudio de la Factibilidad para la Implementación del Servicio de Radiodifusión Digital DRM en el Ecuador* . - Sangolqui: Escuela Politécnica del Ejército : [s.n.], 2005.
  16. YUAN N. *An Equalization Technique for High Rate OFDM Systems* . - Canada: University of Saskatchewan : [s.n.], 2003.

## ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL DE LA RED MÓVIL CELULAR DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA Y PROPUESTA DE OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS PARA MEJORAR LA TRANSMISIÓN DE DATOS

Díaz, Oswaldo <sup>1</sup>; Benítez, Víctor <sup>2</sup>; Alvarez, Juan <sup>3</sup>; Pazmiño, Alexandra <sup>4</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Postgrado y Educación Continua, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

<sup>2</sup> Consorcio Ecuatoriano de Telecomunicaciones, Quito, Ecuador

<sup>3</sup> Consorcio Ecuatoriano de Telecomunicaciones, Quito, Ecuador

<sup>4</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba, Ecuador

oswdiazg1@gmail.com, victorh.benitez@hotmail.com, jalvarez@claro.com.ec, apazmino\_a@esPOCH.edu.ec

### RESUMEN

Este trabajo tuvo como objetivo determinar el estado de la red móvil celular de la ciudad de Riobamba en el primer semestre del año 2017 y con ello diagnosticar el comportamiento con respecto a las bajas velocidades de datos. Se enmarca en una investigación descriptiva no experimental y se trata de un análisis llevado a cabo con base técnica por lo que su diseño es longitudinal, se aplicó un enfoque cuantitativo pues se propuso analizar los datos antes y después de implementar cambios en las redes. Se describen los recursos disponibles de las tres operadoras en la ciudad como son: Asignación de radiofrecuencias de operación, infraestructura celular presente, tecnologías utilizadas y coberturas brindadas. Para efectuar el análisis del comportamiento de la red se utilizó los indicadores de accesibilidad, no retenibilidad, velocidades de datos y volumen de datos. Para esto se centra en la operadora Conecel debido a que se pudo contar con información del sistema de gestión de red que brinda datos completos del comportamiento de la red por medio de los indicadores mencionados. Como resultado se obtuvo una visión de la redes en la ciudad lo cual permitió plantear cambios con respecto a nuevas distribuciones del espectro radioeléctrico, incremento de estaciones celulares, nuevos sectores, nuevas portadoras, puesta a punto de la infraestructura existente y la instalación de nuevas tecnologías como LTE. El operador efectuó trabajos de modernización de la red GSM e instalación de redes de cuarta generación con lo cual se pudo verificar la mejora con respecto a las velocidades de datos. Como conclusión se pudo obtener resultados iniciales de la red de estudio donde la red GSM cumple con las metas del ente de control pero la red UMTS no llega a la meta, pero que con los trabajos efectuados se obtienen mejoras en las tasas de velocidad de datos.

*Palabras clave: accesibilidad, no retenibilidad, throughput, volumen de datos, espectro radioeléctrico*

### ABSTRACT

The objective of this work was to determine the state of the cellular mobile network of the city of Riobamba in the first semester of 2017 and thereby diagnose the behavior with respect to the low data rates. It is part of a non-experimental descriptive research and is an analysis carried out with a technical basis, so its design is longitudinal, a quantitative approach was applied because it was proposed to analyze the data before and after implementing changes in the networks. The available resources of the three operators in the city are described, such as: Assigning operating radio frequencies, present cellular infrastructure, technologies used and coverage provided. To analyze the behavior of the network, the indicators of accessibility, non-retention, data speeds and data volume were used. For this, it focuses on the operator Conecel because it was possible to have information on the network management system that provides complete data on the behavior of the network through the aforementioned indicators. As a result, a vision of the networks in the city was obtained, which allowed us to propose changes with respect to new distributions of the radioelectric spectrum, increase of cellular stations, new sectors, new carriers, development of existing infrastructure and installation of new technologies. as LTE. The operator carried out modernization work on the GSM network and installation of fourth generation networks, with which it was possible to verify the improvement with respect to data speeds. In conclusion, initial results could be obtained from the study network where the GSM network meets the goals of the control entity but the UMTS network does not reach the goal, but with the work done, improvements are obtained in data rates. As a recommendation, it is necessary to extend the study with other operators and include other indicators.

*Keywords: accessibility, non-retention, throughput, data volume, radio spectrum.*

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo surge del interés como usuario por conocer si el servicio de datos de las redes móviles de la ciudad de Riobamba es el adecuado y si es posible obtener mejores prestaciones. El trabajo se enfoca en las redes que prestan los servicios de datos en especial las redes GSM y UMTS las cuales por su tiempo en la ciudad son las que más usuarios presentan. Se describen los recursos disponibles en lo referente a espectro asignado a las operadoras, tecnologías existentes y número de estaciones celulares de la ciudad.

Para efectuar el análisis del estado de la telefonía celular en Riobamba se ha tomado como ejemplo a una de las operadoras en el primer semestre del año 2017. Se acudido al sistema de gestión de la red para obtener los datos de estudio. Derivado del conocimiento de las condiciones de la red y de recursos disponibles se efectúa algunas propuestas para optimización y aplicación de nuevas bandas de frecuencias y de nuevas tecnologías. Por ultimo gracias a que la operadora efectúo la implementación de modernización de la red GSM, nuevas portadoras en la RED UMTS y la instalación de la red LTE se pudo revisar los resultados y su comportamiento con respecto a la transmisión de datos.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo fue una investigación descriptiva no experimental, se basó en el estudio de las condiciones particulares de la red GSM y UMTS de Riobamba y la aplicación de técnicas y optimizaciones propuestas por los estándares implementados en otros países u operadoras de la región. Por tratarse de un análisis llevado a cabo con base técnica es más viable la aplicación del diseño longitudinal.

Se aplicó el enfoque cuantitativo pues se propuso analizar los datos antes y después de la implementación de cambios en las redes en el entorno de la ciudad de Riobamba. Las características del objeto de investigación deben enfocarse dentro del ámbito de las telecomunicaciones. En la presente investigación se analizará el impacto desde el punto de vista técnico.

Se recogió información de las tres operadoras presentes en la ciudad pero el análisis se centra en la operadora Conecel debido a que se pudo contar con información del sistema de gestión que brinda información amplia y completa del comportamiento de la red, la cual no se puede obtener por otros medios. Fuentes primarias obtenidas de los datos de comportamiento de los elementos de la red y recopilados por el sistema de gestión, los mismos que fueron recolectados en hojas de cálculo Excel usando gráficas para su comparación y pruebas estadísticas básicamente descriptivas con medias o medianas y error estándar. Se efectuaron comparaciones con valores referenciales promedios iniciales o con metas impuestas por el ente de control de telecomunicaciones y la misma operadora. Se consideró un valor de significancia estadístico menor 0.05.

## RESULTADOS

### ANÁLISIS DE LA SITUACION ACTUAL DE LA RED MOVIL CELULAR

El crecimiento de las comunicaciones móviles y en especial de las redes celulares producidas en los últimos años no tiene precedentes en todo el mundo. Para el caso de Ecuador la cuota de penetración ya supera el 100.53% [1] y el número de líneas móviles ya supera al de las fijas. Por otra parte la evolución de las redes celulares a LTE permite la muy esperada convergencia digital donde se pueden integrar todos los servicios de voz, video y datos. La ciudad de Riobamba no está alejada de la realidad del país pero al ser una ciudad pequeña y con menos

usuarios también la prioridad que tiene para los operadores en menor, por lo tanto los avances tecnológicos van a tardar más en llegar con respecto a las ciudades principales.

### Recursos de Red.

*Recurso Espectro Radioeléctrico B disponible por los operadores celulares en la zona de estudio.*

El espectro radioeléctrico es un recurso indispensable para proporcionar el servicio de telefonía de celular y servicios de datos inalámbricos (Bellamy John, 2000, p 161-223).

Tabla 1. Asignación de espectro a Conecel.

Denominación	Enlace	Ancho Banda (MHz)	Rangos (MHz)
Banda 850	Ascendente	12.5 MHz	824– 835 845 - 846.5
	Descendente	12.5 MHz	869– 880 890 - 891.5
Banda 1900	Ascendente	15.0 MHz	1880 - 1895
	Descendente	15.0 MHz	1960 – 1975
Banda AWS	Ascendente	20.0 MHz	1730 - 1750
	Descendente	20.0 MHz	2130 - 2150

Tabla 2. Asignación de espectro a Otecel.

Denominación	Enlace	Ancho Banda (MHz)	Rangos (MHz)
Banda 850	Ascendente	12.5 MHz	835 – 845; 846.5 - 849.0
	Descendente	12.5 MHz	880 – 890; 891.5 – 894.0
Banda 1900	Ascendente	30.0 MHz	1850 - 1880
	Descendente	30.0 MHz	1930 - 1960

Tabla 3. Asignación de espectro a CNT.

Denominación	Enlace	Ancho Banda (MHz)	Rangos (MHz)
Banda 700	Ascendente	15.0 MHz	735 - 740
	Descendente	15.0 MHz	780 - 795
Banda 1900	Ascendente	15.0 MHz	1895 - 1910
	Descendente	15.0 MHz	1975 - 1990
Banda AWS	Ascendente	20.0 MHz	1710 - 1730
	Descendente	20.0 MHz	2110 - 2130

*Infraestructura disponible sobre la Superficie de estudio S*

El número de estaciones que se utilizan para cubrir la superficie es otro de los factores importantes ya que a mayor número de estaciones mayor es el tráfico que puede entregar.

La superficie de la ciudad de Riobamba es de 45 Km<sup>2</sup> lo que implica que cada estación debe cubrir 2.14 km<sup>2</sup> para el caso Conecel, la siguiente figura muestra el número estaciones por operador y tecnología.

Tabla 4. Estaciones y tecnología por operador. [2]

Operador	Estaciones	Tecnología		
		GSM	UMTS	LTE
CONECEL	21	16	21	0
OTECCEL	23	17	23	0
CNT	20	0	20	18

Realizado por: Díaz, O. 2017

Esto da como resultado las coberturas ofrecidas en las diferentes tecnologías.

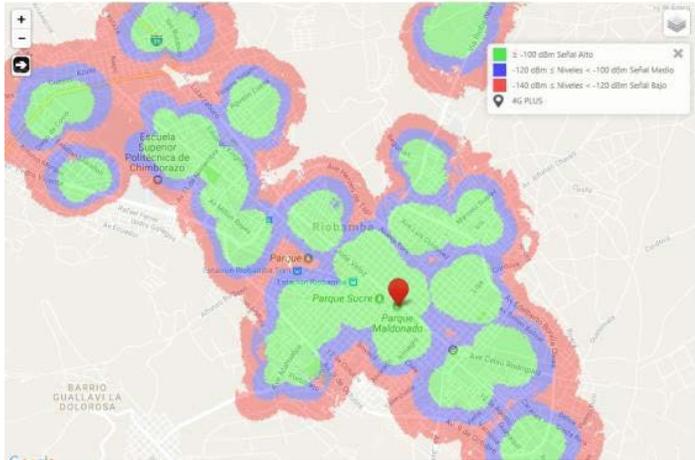


Figura 1. Cobertura de Conecel para UMTS en Riobamba. [3]

**Eficiencia espectral de las tecnologías Celulares. E**

Cada tecnología usada tiene un rendimiento con respecto a la capacidad de datos que es capaz de entregar a los usuarios, al inicio de las redes celulares el objetivo principal fue la transmisión de voz, pero con el tiempo la orientación cambio paulatinamente hacia los datos, de tal manera los esfuerzos en el desarrollo tecnológico también se han orientado para ofrecer cada vez mayores velocidades, en la figura 4 se observa las tecnologías existentes en el primer semestre del 2017 en la ciudad de Riobamba. A continuación podemos ver la eficiencia espectral esperada por tecnología

Tabla 5. Eficiencia espectral pico por tecnología.

	GSM	UMTS	HSDPA	LTE
Velocidad	9.6 Kbps	2 Mbps	14 Mbps	100 Mbps
A banda	200 KHz	5 MHz	5 MHz	20 MHz
Eficiencia	0.05bps/Hz	0.4bps/Hz	3 bps/Hz	5bps/Hz

Realizado por: Díaz, O. 2017

Para poder cubrir la demanda de la red celular se debe cumplir la siguiente ecuación.

$$B \times E / S = U \times T$$

Ecuación 1. (Agusti Comez, 2010, p 26).

Donde el ancho de banda asignado al operador y la tecnología utilizada para cubrir la superficie de interés debe cumplir la demanda de densidad de usuarios y el tráfico generado.

**Análisis de situación para el operador Conecel**

En el análisis correspondiente se considera los principales indicadores de una red UMTS, los mismos que son monitoreados por el ente regulador ARCOTEL e indicadores propios de la operadora. Los principales indicadores de red de datos son los siguientes:

- Inaccesibilidad de Datos
- Drop call de Datos
- Throughput (Uplink, Downlink)
- Volumen de Tráfico de datos

Tabla 6. Las metas de indicadores.

KPIs	Inaccesibilidad	Drop Call	Throughput GPRS	Throughput EDGE	Throughput HSDPA
2G Datos	1%	2%	>40kbps	>128kbps	
3G Datos	2%	2%			>1Mbps

Realizado por: Díaz, O. 2017

Los datos son obtenidos del sistema de gestión de la red celular del operador y se presentan las observaciones más relevantes tanto en la red 2G y 3G

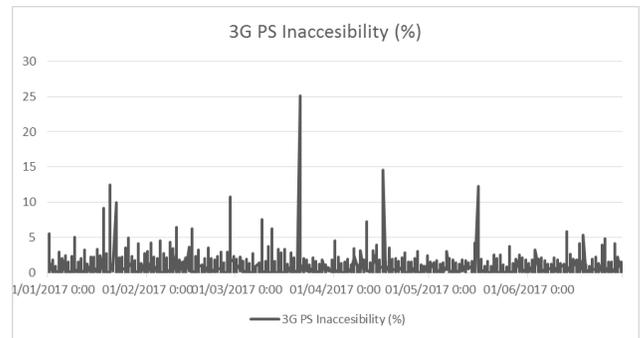


Figura 2. Inaccessibilidad red 3G. Realizado por: Díaz, O. 2017

La inaccessibilidad en la red 3G (UMTS) se aprecia que se encuentra por encima de la meta establecida, por lo cual se requiere un proceso de optimización para mejorar este indicador. Las causas para que este indicador este fuera de su meta puede ser varias, entre las que se puede mencionar: carga de usuarios, falla en la configuración de equipos, sistema radiante, etc.

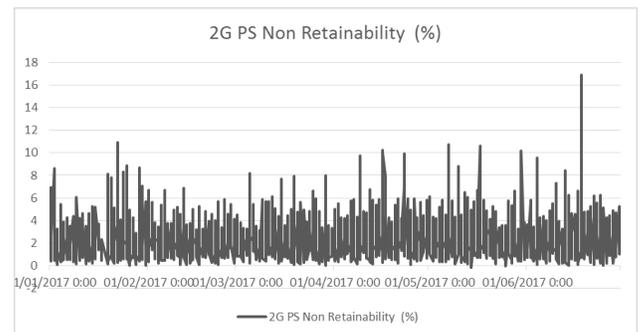


Figura 3. Caídas de conexiones red 2G Realizado por: Díaz, O. 2017

Las caídas de conexiones o no reneblabilidad para la red GPRS/EDGE se aprecia que no cumple con los valores de la meta establecida por la Operadora en la zona de estudio, esto se puede deber a factores como: Falta de capacidad en la red GPRS/EDGE, Propagaciones excesivas de las estaciones de servicio.

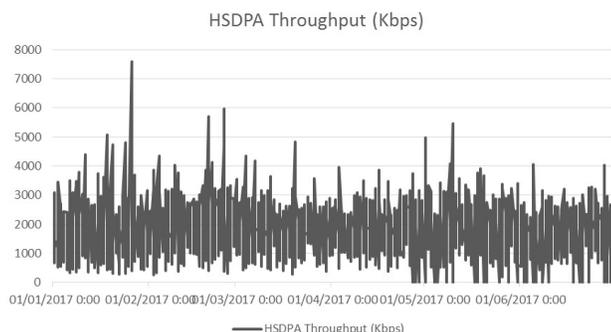


Figura 4. Troughput de red HSDPA  
Realizado por: Díaz, O. 2017

Las velocidades de la red 3G (HSDPA) en la zona de estudio no alcanzan los valores establecidos como meta por lo que se requiere un proceso de mejora para alcanzar los valores objetivos, determinando previamente las causas de su bajo desempeño.

### PROPUESTA DE OPTIMIZACION DE RECURSOS PARA MEJORAR LA TRANSMISIÓN DE DATOS

#### Propuesta de Distribución del Espectro Radioeléctrico

Para la Tecnología GSM (2G), teniendo presente que está más orientada brindar servicio de voz y cobertura amplia para llegar a la mayor cantidad de usuarios se propone la siguiente distribución del espectro radioeléctrico y configuración de sus canales de control y tráfico.

- Canales de control y canales de tráfico en banda 850 MHz
- Canales de tráfico en banda 1900 MHz
- GSM trabajaría en configuración de Común BCCH, un único canal de control para las dos bandas de frecuencia.

Para la tecnología UMTS (3G), teniendo presente que esta tecnología tiene mejor desempeño para servicios de Datos para tratando de tener una cobertura y penetración adecuada, se recomienda contar con la siguiente distribución del espectro radioeléctrico.

- Contar con una portadora de 5 MHz en la banda 850 MHz, que se desempeñe como portadora de Cobertura.
- Implementar 2 portadoras en la Banda 1900 MHz, para soporte de tráfico y mejora de percepción de usuario en el servicio de datos.

Para tecnología LTE (4G), se utiliza la banda AWS (2100 MHz) con un ancho de banda de 20 MHz para el enlace ascendente y 20 MHz para el enlace descendente. (Peñañiel Yanza, 2015, p. 15-37

- Una portadora de 20 MHz
- Se implementa en zonas de alta concentración de tráfico de Datos, puesto que esta tecnología está diseñada para tener un alto rendimiento en servicio de Datos.

### Propuesta Incremento del número de estaciones celulares

Efectuar un recorrido de evaluación de la zona midiendo Niveles de señal y calidad para cada una de las tecnologías. Para GSM (2G): Rxlevel del canal de control. Para UMTS (3G): RSCP potencia de código de la señal recibida. Para LTE (4G): RSRP y RSRQ niveles de potencia y de calidad de una señal de referencia o canal de control

### Propuesta Incremento de número de sectores en la infraestructura existente

La solución para incrementar capacidad implementando nuevos sectores es utilizar antenas de multihaz, las que por su diseño minimizan el solapamiento entre haces de radiación.

### Propuesta Mejora mediante optimización

Tomando como base las metas de KPIs planteados por la Operadora, se procede a efectuar el análisis de los diferentes indicadores y determinar los sectores incidentales y cuál es la causa raíz para la desviación de los valores objetivos.

Las principales acciones a ejecutar para mejorar el performance de la red de datos móviles son las siguientes:

- Análisis de capacidad de transmisión para soportar el tráfico demandado por la estación celular.

Acción por ejecutarse: ampliación de ancho de banda en el caso de TX IP, o ampliación de EIs en caso de TX ATM.

Un sitio celular que se integra a la red, con las tecnologías GSM/UMT/LTE al menos debe contar con los siguientes anchos de banda en Transmisión para cada una de las tecnologías:

Tabla 7. Requerimiento de transmisión mínimo.

Tecnología	Ancho de banda en transmisión
GSM (2G)	2 MB
UMTS (3G)	10 MB
LTE (4G)	100 MB

Realizado por: Díaz, O. 2017

- Análisis de propagación de cada uno de los sectores en la zona objeto de estudio.

Acción por ejecutarse: Control de propagación mediante ajuste al sistema radiante (Cambios de Tilt, Azimut), basado en las características físicas, electromagnéticas del sistema radiante y morfología de zona geográfica. El objetivo principal del control de propagación es mejorar los KPIs de Inaccesibilidad, caída de llamadas, Definir un servidor único en la zona de servicio de la RB, mejorando los niveles de señal y calidad

- Análisis de recorridos de evaluación de niveles de señal y calidad de cada una de las tecnologías.

Acciones por ejecutar: Ajuste del sistema radiante para disminuir o incrementar la propagación de los sectores en base a los resultados del recorrido realizado · Análisis de interferencia del sistema.

Acciones por ejecutarse; determinar si los niveles de ruido de piso son los adecuados para el correcto funcionamiento de las tecnologías

- Estandarización de parámetros a nivel de BSC, RNC, Celda, NodoB, eNodeB.  
Acción por ejecutarse: Búsqueda de parámetros que discrepen sus valores establecidos, los mismos que luego de identificarlos se los corrige.
- Aplicación de nuevas características y funcionalidades disponibles de acuerdo a los estándares del 3GPP para cada una de las tecnologías que nos brindan el servicio de datos móviles.

**Propuesta Implementación de nuevas portadoras**

La mejor forma de disponer de capacidad cuando se incrementan los usuarios o el tráfico es con el uso de nuevas bandas de operación pero lamentablemente es un recurso costoso por cuanto depende de las concesiones o asignaciones de frecuencia de los Entes reguladores, esta propuesta está relacionada a la redistribución del espectro donde se asignan tres bandas de Operación para UMTS una en 850 Mhz y dos en la banda de 1900 Hz.

**Propuesta de mejora Implementado nueva tecnología LTE**

Puesto que la red LTE se encuentra lista para ser implementada, el objetivo principal es compensar la brecha de cobertura. Puesto que con la implementación de LTE en la banda AWS la cobertura es mucho menor comparada con GSM y UMTS

**RESULTADOS DE IMPLEMENTACION MODERNIZACIÓN, SEGUNDAS PORTADORAS E INSTALACION DE LTE.**

Con la finalidad de verificar el cumplimiento de las propuestas se recolecta datos antes y posterior al proceso de modernización de la zona objeto de estudio; con los siguientes resultados en algunos de los indicadores para el servicio de Datos.

- Análisis de Inaccesibilidad de datos GSM (2G)  
En la Figura 12 podemos apreciar el comportamiento del KPI inaccesibilidad, como posterior a la modernización de la red GSM se mejora.

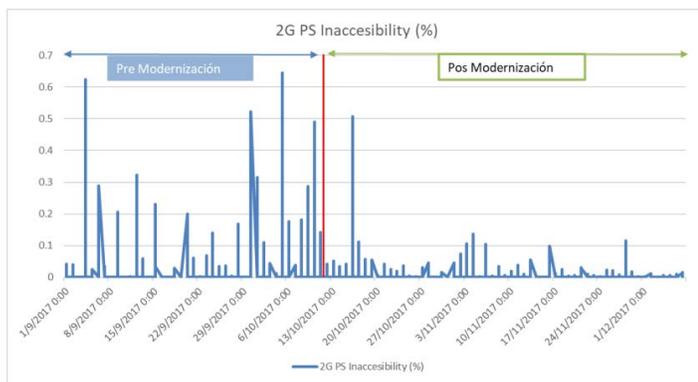


Figura 5. 2G PS Inaccesibilidad, RBS Zona Centro de Riobamba  
Realizado por: Díaz, O. 2017

La figura 12 muestra la mejora en el indicador de inaccesibilidad a partir de la fecha de modernización del grupo de radiobases de la zona centro de la ciudad de Riobamba, Si obtenemos un valor promedio de antes de la modernización y posterior de la modernización se aprecia la variación del indicador inaccesibilidad.

- Análisis de caída de llamadas en datos GSM (2G).  
En la Figura 13 se muestra el comportamiento de las caídas de servicio de datos que presenta el terminal, que si bien el usuario no lo visualiza por la característica de uso del servicio de datos, afecta al comportamiento de la conexión.

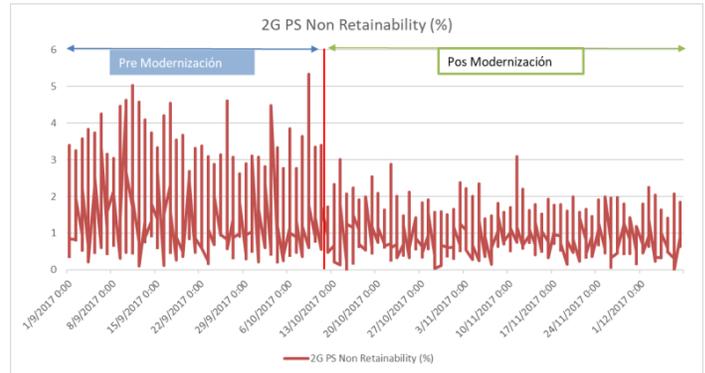


Figura 6. PS No Retenebilidad, RBS Zona Centro de Riobamba  
Realizado por: Díaz, O. 2017

En la figura 13 se aprecia que se tiene menos caídas de llamadas posteriores a la modernización de los equipos GSM (2G) en la zona de estudio, esto indica que se tiene un mejor comportamiento de los nuevos equipos y a la parametrización utilizada está haciendo un uso más eficiente de recursos para proporcionar el servicio de voz y datos.

Obteniendo el valor promedio de los datos antes y después de la modernización se aprecia la variación obtenida en este indicador de red.

Tabla 8 Consumo de Datos RBS Zona Centro de Riobamba

Zona centro de la ciudad de Riobamba								
antes				después				
GSM	UMTS	LTE	2G + 3G + 4G	GSM	UMTS	LTE	2G + 3G + 4G	VARIA.
19420	1291627	1059.39	14169.86	244.12	11473,2	12976,99	24694,31	10524,45

Realizado por: Díaz, O. 2017

La Figura 14, presenta un resumen del comportamiento de datos cursados en las redes GSM/UMTS/LTE en los periodos de comparación y se aprecia que el volumen total cursado en las tres redes celulares que brindan el servicio de datos se ha incrementado en un 70% el volumen por hora.

La red que más contribuye en el aumento de tráfico de datos móviles es la red LTE (4G) con un 52.55%.

## CONCLUSIONES

Se efectuó el análisis de la red móvil celular en la ciudad de Riobamba del primer semestre del 2017 y se toma como ejemplo a una de las operadoras para su análisis, de los resultados se observa que para la red GSM se encuentra por arriba de la meta con un 103 % y para la red 3G no se cumple la meta con un 60 %, es importante indicar que el mismo procedimiento se puede aplicar ya sea cuando se quiera efectuar un análisis detallado a nivel radiobases o en un grupo grande como es el caso de toda la ciudad, pero es indispensable contar con los datos específicos según el caso.

Se presentó propuestas para mejorar la transmisión de datos, las propuestas son las siguientes:

Distribución del Espectro Radioeléctrico e implementación de segundas portadoras, incremento de estaciones o de sectores, Optimización de parámetros de la red y por último la instalación de nuevas tecnologías como LTE y la modernización de equipamiento para tecnologías anteriores pero que deben seguir funcionando como es el caso de GSM.

Debido a la implementación de varias de las propuestas se pudo evidenciar un incremento en las tasas de Throughput de 112% para GSM y de 121% para UMTS.

## REFERENCIAS

1. ARCOTEL, Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, Quito – Ecuador. Web site: <http://www.arcotel.gob.ec/servicio-movil-avanzado-sma/>
2. ARCOTEL, Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones, Quito – Ecuador. Web site: [http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/09/1.2-Radiobases-por-operador-ytecnologia-nivel-provincial\\_OCTUBRE\\_2017.xlsx](http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/09/1.2-Radiobases-por-operador-ytecnologia-nivel-provincial_OCTUBRE_2017.xlsx)
3. Consorcio Ecuatoriano de Telecomunicaciones, CONECEL, Quito – Ecuador. Web site: <https://www.claro.com.ec/personas/servicios/servicios-moviles/cobertura>

## BIBLIOGRAFIA

1. Agusti, R. (2010). *Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Fundación Vodafone España. ISBN: 84-934740-4-5. pp. 129-157.
2. Peñafiel, L., Chenche, F. (2015). La convivencia de la tecnología 4G con 3G y 2G en el Ecuador”. *Revistas UESS – Investigation. Ecuador. 1(6)*, pp. 15-37.
3. Bellamy, J. (2000) *Digital Telephony*, 3<sup>a</sup> ed. EEUU New York. Wiley Interscience, Wiley y Sons,2000. pp.161-223

## SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE UN REFUERZO EXTERNO PARA ENSAYOS DE IMPACTO CHARPY

Caicedo Reyes, J. Isaías<sup>1</sup>; Viteri Núñez, Edwin F.<sup>1</sup>; Saca Llamba, Edwin David <sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica. Riobamba, Ecuador

iscarey@hotmail.com

### **RESUMEN**

El ensayo de impacto Charpy es un procedimiento normado cuyo objetivo es obtener el valor de energía que absorbe un material (resiliencia) cuando éste se fractura, producto del impacto de un mazo acoplado a un eje, en el cual gira libremente en una especie de péndulo. Este estudio evalúa el comportamiento de un acero de calidad AISI 1045 al impacto y posteriormente lo compara con el comportamiento del mismo material, pero con un refuerzo externo denominado Siltex 800, rigiéndose en los lineamientos de la norma ASTM E23. Previo a la experimentación se analizan factores que determinan el comportamiento del material con y sin recubrimiento, como son: temperaturas de ensayo, espesor del refuerzo, métodos de calentamiento y enfriamiento de las probetas. Para ejecutar un análisis comparativo se analizaron 23 probetas rectangulares con entalle en V, cuyos datos nos sirven para la construcción de la curva de transición dúctil-frágil del material. Los datos obtenidos son altamente de nivel comparativo debido a que son ensayados a las mismas condiciones y temperaturas obteniéndose así la efectividad y comportamiento del refuerzo.

*Palabras clave: Ensayo de impacto, Resiliencia, Refuerzo externo, comportamiento del material*

### **ABSTRACT**

Charpy impact test is a regulated procedure whose objective is to obtain the energy value that a material absorbs (resilience) when it fractures, product of the impact of a mallet coupled to an axis, in which it freely rotates in a kind of pendulum. This study evaluates the behavior of a quality steel AISI 1045 at impact and then compares it with the behavior of the same material, but with an external reinforcement called Siltex 800, following the guidelines of the ASTM E23 standard. Previous to the experimentation, factors that determine the behavior of the material with and without reinforcement are analyzed, such as: testing temperatures, thickness of the coating, methods of heating and cooling of the specimens. To perform a comparative analysis, we analyzed 23 rectangular specimens with a V notch, whose data are useful for the elaboration of the ductile-fragile transition curve of the material. The data obtained are highly comparative level because they are tested at the same conditions and temperatures, thus obtaining the effectiveness and behavior of the reinforcement.

*Keywords: Impact test, Resilience, External reinforcement, behavior of the material*

## INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se refiere al tema del análisis de un refuerzo externo aplicado a un material de acero de máquinas, el cual se le reforzará y analizará el comportamiento del mismo exponiéndolo a condiciones de alta fragilización.

Uno de los motivos para el desarrollo de esta investigación es el mejoramiento en las propiedades mecánicas de un material. Siendo principalmente utilizada la aplicación de tratamientos térmicos a elementos de máquinas y estructuras, sin embargo así como efectivo también posee ciertas limitaciones en lo que concierne a los altos costos que se requieren, imposibilidad de aplicación a elementos de magnitudes considerables. Para lo cual se desea llegar con esto, a reemplazar métodos tradicionales mediante la aplicación de un refuerzo externo, que además de abaratar costos cumpla con las características adecuadas para el buen funcionamiento, resistencia y durabilidad de los elementos reforzados.

Para evaluar el comportamiento del refuerzo propuesto se hará uso del método de caracterización conocido como ensayo de impacto Charpy, que en general consisten en impactar una determinada probeta mediante un mazo y calcular la energía absorbida durante la fractura. Las condiciones del ensayo son de manera que la deformación ocurre a temperaturas bajas, la velocidad de deformación es elevada y se produce un estado triaxial de tensiones debido a la presencia de la entalla. Estas tres condiciones favorecen la fractura frágil del material es decir estamos poniendo material en las condiciones de mayor fragilización.

Los datos obtenidos del ensayo son altamente a nivel cualitativo o de interés comparativo es decir dos materiales ensayados mediante el mismo método a la misma temperatura y entalla podremos comparar directamente su tenacidad y resiliencia. Es en este aspecto donde se evalúa la efectividad del refuerzo de análisis para lo cual se ejecutan ensayos iniciales que tienen como fin la selección del espesor del refuerzo, en el cual presenta un mejor comportamiento en comparación con la probeta sin refuerzo. Una vez establecido este espesor, se ensayan 10 probetas sin refuerzo las cuales nos ayudarán con la construcción de la curva de transición dúctil-frágil del material.

Dicha curva está constituida mediante diversos ensayos a distintas temperaturas en donde se mide su resiliencia, ésta depende grandemente de la temperatura, en general disminuye cuando disminuye la temperatura y además está muy influenciada por el tipo de material. La temperatura de transición dúctil frágil se denomina así, ya que por encima de esa temperatura el material absorbe mucha energía es dúctil, mientras que por debajo de esa temperatura el material absorbe muy poca energía es frágil. Además esta temperatura o rango de temperaturas está en dependencia de la microestructura y de la composición de la aleación. En general depende de la microestructura: cuanto menor sea el tamaño de grano más baja es la temperatura de transición dúctil frágil (por lo tanto, más favorable) y con la composición pues depende del material y de la aleación.

Esta curva es comparada con otra, la cual será constituida mediante el ensayo de la misma cantidad de probetas evaluadas y a las mismas condiciones que las iniciales, a diferencia que éstas están reforzadas mediante el refuerzo de análisis, con un espesor de aplicación seleccionado de los ensayos iniciales. Finalizando con la comparación de curvas y determinando si es favorable o no el comportamiento del refuerzo aplicado. Cabe mencionar que las probetas ensayadas se

rigen a la norma ASTM E23, además que los rangos de temperatura de análisis están establecidos en base a ensayos donde se busca determinar las temperaturas extremas donde el refuerzo no presente cambios en su estructura.

Finalmente se puede decir que el ensayo de fractura por impacto en sí, nos permite caracterizar la resistencia de los materiales en condiciones extremas de fragilización es decir alta velocidad impacto, bajas temperaturas y presencia de entallas. Además, esta propiedad viene influenciada en gran medida por la estructura cristalina, la composición y la microestructura de los materiales.

## METODOLOGÍA

Varios parámetros de análisis previo, para el desarrollo de la investigación se los puede enumerar a continuación:

- Selección de la máquina
- Selección del material
- Selección del refuerzo
- Selección de método de enfriamiento
- Selección de método de calentamiento
- Selección de espesor de recubrimiento

### Selección de la máquina

*Tipo de máquina:* CHARPY II

*Capacidad de energía:* 335,4 julios.

*Velocidad antes del impacto:* 4,4 m/s

*Maquinado de la probeta:* Maquinado en fresa siguiendo las dimensiones establecidas en la norma ASTM E23 usando taladrina como refrigerante.

### Selección del material

Considerando las condiciones dadas para su análisis tenemos dos opciones de materiales entre las cuales tenemos:

- Aceros Estructurales.
- Aceros de máquinas.

La elección del mismo tenemos:

**Material:** Acero de calidad AISI 1045

Este acero seleccionado es de máquinas, entre las ventajas tenemos:

- Fácil adquisición y mecanización
- Presentación de sección en forma cuadrada
- Costo relativamente bajo
- Buena tenacidad
- Alta uniformidad y rendimiento
- Puede utilizarse en condición de suministro o con tratamientos térmicos.
- Aplicable a partes relativamente simples de máquinas.

Entre sus principales usos debido a sus características de temple en general de resistencia media tenemos:

- Ejes y semiejes automotrices y de maquinaria.
- Cigüeñales
- Piñones
- Cuñas
- Tornillo y pernos
- Martillos
- Pasadores y remaches
- En general partes de maquinaria y herramientas agrícolas.

Tabla 1 Propiedades del acero de calidad AISI 1045

PROPIEDADES	CARACTERÍSTICAS
Composición del acero	C:0.43-0.50% ; P:0.04% máx.; S:0.05% máx.; Mn:0.60-0.90%
Forma de suministro:	Varillas o ejes
Límite de fluencia:	40 Kg/mm <sup>2</sup>
Resistencia a la tracción:	63-73 Kg/mm <sup>2</sup>
Alargamiento porcentual:	16%
Reducción de área	40%
Dureza (HB)	163

Fuente: Catálogo BRAVO

### Selección del refuerzo

Las condiciones dadas para la selección del refuerzo se enumeran a continuación:

- Resistencia a elevadas temperaturas.
- El refuerzo debe ser completamente adherible con el material base.

### Refuerzo: SILTEX 800

Tabla 2 Propiedades del poliuretano SILTEX 800

PROPIEDADES	CARACTERÍSTICAS
Naturaleza	Elastómeros y resinas sintéticas
Color	Gris, negro y blanco
Espesor Filmseco	150-200 micras 1 capa
Rendimiento	5-7 m <sup>2</sup> /Kg

Fuente: Catálogo ROBERLO

Este refuerzo es un poliuretano protector anti gravilla HS Premium de altas prestaciones para aplicación en partes visibles y no visibles de las carrocerías que exijan reproducir el nivel de calidad de una aplicación original, entre sus principales características de selección tenemos:

- Producto para recubrimientos de los baldes de las camionetas, un producto para resistencia a impactos.
- Método de aplicación relativamente sencillo el cual nos permite un recubrimiento eficaz en todas las partes de nuestra probeta.
- Producto con gran resistencia a altas y bajas temperaturas.
- Costo medio de 80\$ por litro

### Procedimiento de pintura

Empleando un compresor con un motor de 2HP de potencia se aplica la pintura con una pistola de pintura común, se recomienda una pistola Airless Texture la cual cumple sus características para realizar este tipo de trabajos con pinturas de elevada viscosidad. Inicialmente se aplica un adherente de pintura de la misma marca (Roberlo), se evita la necesidad de lijar la superficie a pintar pues el acabado del mecanizado de las probetas es suficientemente rugoso para aplicar la pintura.

Se aplica la pintura en condiciones ambientales recomendando un porcentaje de humedad que debe estar dentro del rango del 50 hasta el 70%, aplicando capas delgadas con una velocidad de aplicación promedio de 0,5 metros por segundo. No existe la necesidad de usar

un horno para el proceso de pintura pues pinturas al horno son ajenas al propósito de nuestro ensayo.

Se aplica una capa delgada de adherente de pintura dejando secar un tiempo aproximado de una hora. Posteriormente se aplican capas del refuerzo dejando que este se seque durante dos horas pues el refuerzo Siltex 800 posee en su estructura catalizador que disminuye el tiempo de secado del mismo.

Aplicamos las capas de manera que los especímenes cumplan con las medidas de probetas de la norma a la que se rige el presente ensayo. Finalmente se procede con el lijado de todas las superficies de nuestra probeta, cumpliendo con las exigencias de la norma ASTM E23.

### Selección del método de enfriamiento.

Entre las alternativas de enfriamiento se tienen principalmente:

- En base a hielo seco.
- En base a nitrógeno líquido.

Donde el método más factible para el enfriamiento es: HIELO SECO. Entre sus principales características de selección tenemos:

- Capacidad de enfriamiento de hasta -78°C
- Costo relativamente bajo de 5\$ por Kilogramo.
- Procedimiento de aplicación sencillo.

Para la aplicación del mismo se pretende realizarse en un sistema aislado para evitar transferencia de calor con el medio, así como la utilización de alcohol cuyo punto de fusión es de -114°C, el cual nos permite evitar el congelamiento del fluido en donde se encuentra inmersa la probeta de análisis. La temperatura del acero será censada mediante un sensor térmico y mostrada en el exterior del sistema.

Para el control de temperatura y la homogenización del ambiente se utiliza dos ventiladores de tipo axial ubicados estratégicamente al interior del sistema.

### Selección del método de calentamiento.

Para el calentamiento se empleará un horno de la marca "OSTER" con la ventaja de poder obtener elevadas temperaturas de hasta 250°C. El mismo posee una perilla graduada para el control de la temperatura. Y se estima un lapso de 5 minutos para llegar y mantener la temperatura requerida.

Entre las principales características del horno tenemos:

- Control de temperatura completamente ajustable de 90°C a 230°C (194°F a 450°F) para una amplia variedad de usos.
- Cronómetro incorporado de hasta 30 minutos.

Una característica desfavorable en el uso del mismo es que la temperatura es regulable a partir de los 90°C, por lo cual con ayuda de un pirómetro digital de rango de medición de 0 a 250°C, se pretende el censado de temperaturas más bajas a éstas y superiores a las del medio.

### Selección del espesor del refuerzo

Entre las condiciones de aplicación del refuerzo tenemos:

- Refuerzo uniforme y total de la probeta.
- Las dimensiones de la probeta con el refuerzo deben ser exactamente las mismas que sin el refuerzo, para poder efectuar un análisis comparativo.
- El refuerzo debe estar completamente adherido al material base.

Además, sabiendo que el espesor del refuerzo a aplicarse juega un papel preponderante en el aumento o disminución de la cantidad de energía absorbida por el material se establece los siguientes espesores de análisis:

- Espesor de 0.25 mm
- Espesor de 0.5 mm
- Espesor de 0.75 mm
- Espesor de 1 mm
- Espesor de 1.25 mm

Los cuáles serán analizados mediante comparación directa con el material sin refuerzo, encontrando así el espesor más adecuado.

## RESULTADOS

### Rango de temperatura de análisis

En base a la resistencia del refuerzo aplicado sin observarse cambios en la estructura del mismo se establece:

- Temperatura mínima de -17.5 °C
- Temperatura máxima de 150°C

### Resiliencia

Sabemos que la resiliencia es la medida de la resistencia del material al impacto por lo tanto:

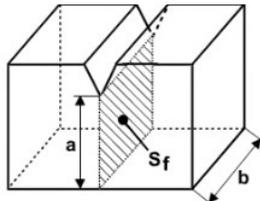


Figura 1 Esquema de las probetas  
Fuente: Ensayo de rotura por impacto (UPV)

Entonces:

$$\rho = (\text{Energía absorbida}) / (\text{Área de impacto (Sf)})$$

### Espesor del refuerzo de análisis

Considerando cinco probetas con distintos espesores de refuerzo y una sin refuerzo se tiene:

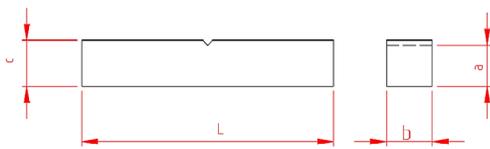


Figura 2. Dimensiones de las probetas  
Realizado por: Autores

Tabla 3 Dimensiones de probetas de ensayo para determinación del espesor del refuerzo

#	Espesor (mm)	Dimensiones (mm)			
		a	b	c	L
1	0.00	8.10	10.00	10.00	55.20
2	0.25	8.54	10.77	10.69	55.84
3	0.50	8.34	9.63	10.08	56.26
4	0.75	8.50	10.40	10.25	55.92
5	1.00	8.00	10.07	10.14	56.74
6	1.25	8.83	10.33	9.82	57.07

Realizado por: AUTORES, 2018.

Ejecutando las respectivas pruebas para su comparación se tiene:

Tabla 4 Resultados obtenidos para determinación del espesor del refuerzo.

#	Energía de Impacto (J)	Energía de Impacto (kgf-cm)	Área de Impacto (cm <sup>2</sup> )	Resiliencia (kgf/cm)
1	5	50.986	0.81	62.945
2	7	71.38	0.919	77.608
3	5	50.986	0.803	63.483
4	5	50.986	0.884	57.676
5	8	81.577	0.805	101.263
6	8	81.577	0.912	89.435

Realizado por: AUTORES, 2018.

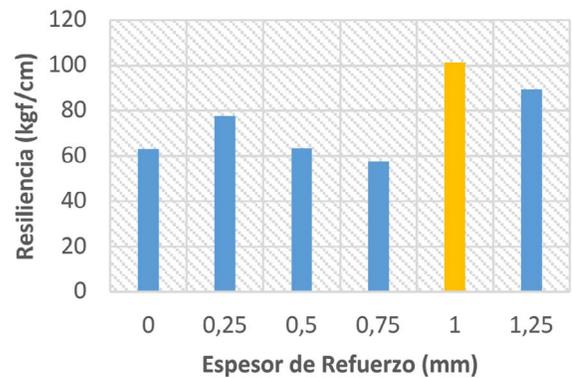


Figura 3 Energía absorbida (Resiliencia) en función al espesor del refuerzo.  
Realizado por: AUTORES, 2018.

Si observamos el comportamiento de la energía absorbida (resiliencia) por el material en función al espesor del refuerzo, se tiene que el mayor incremento se da en el espesor de 1mm, generando un aumento de 38.32 kgf/cm.

Ahora bien, se selecciona este espesor de refuerzo para las pruebas finales a realizar. Además, se presenta las siguientes ventajas:

- El material de suministro se lo encuentra a dichas dimensiones abaratando los costos de producción.
- El tiempo de aplicación del refuerzo hasta alcanzar el espesor mínimo se reduce considerablemente.

### Análisis de probetas sin refuerzo

Entre los análisis a realizarse, se tiene el comportamiento del material seleccionado a distintas temperaturas, para lo cual se selecciona nueve probetas en base a la norma ASTM E23 con un entalle en tipo V.

Estas probetas son mecanizadas en Fresadora usando taladrina como refrigerante, además el material de suministro fue en varilla cuadrada de 10 x 10 mm, abaratando costos de producción.

Tabla 5 Dimensiones de probetas de ensayo sin refuerzo

#	Dimensiones (mm)			
	a	b	c	L
1	8.10	10.00	10.00	55.20
2	7.80	10.00	10.00	55.00
3	8.00	10.00	10.00	54.45
4	8.00	10.00	10.00	55.00
5	8.10	10.00	10.00	55.60
6	8.00	10.00	10.00	54.90
7	8.10	10.00	10.00	55.20
8	8.00	10.00	10.00	55.10
9	8.05	10.00	10.00	55.75

Realizado por: AUTORES, 2018.

Ejecutando las pruebas en el péndulo Charpy se tiene:

Tabla 6 Resultados obtenidos para la construcción de la curva de resiliencia en función a la temperatura del material sin refuerzo.

#	Energía de Impacto (J)	Energía de Impacto (kgf-cm)	Área de Impacto (cm <sup>2</sup> )	Resiliencia (kgf/cm)
1	2.5	25.493	0.81	31.473
2	4	40.789	0.78	52.293
3	5	50.986	0.8	63.732
4	5	50.986	0.8	63.732
5	8	81.577	0.81	100.713
6	10	101.972	0.8	127.465
7	15	152.957	0.81	188.836
8	15	152.957	0.8	191.197
9	16	163.155	0.805	202.677

Realizado por: AUTORES, 2018.

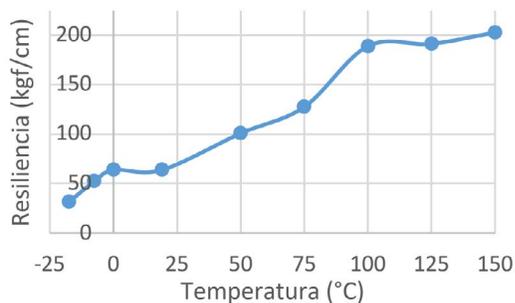


Figura 4 Comportamiento del acero AISI 1045 sin refuerzo en función a la temperatura.

Realizado por: AUTORES, 2018.

En el cual observamos como el material varía su comportamiento de dúctil a frágil a medida que su temperatura disminuye. Teniendo una estabilización y mayor resiliencia a partir de los 100°C. Ahora bien, como el objetivo de la presente investigación es evaluar la eficiencia del refuerzo seleccionado en este caso: el poliuretano Siltex 800. Se realiza el ensayo de nueve probetas adicionales teniendo así:

Tabla 7 Dimensiones de probetas de ensayo con refuerzo.

#	Dimensiones (mm)			
	a	b	c	L
1	8.10	10.00	10.20	56.60
2	8.00	10.00	10.00	56.00
3	8.35	10.00	10.25	56.30
4	8.00	10.07	10.14	56.74
5	8.05	10.00	10.10	56.10
6	7.95	10.00	10.15	56.60
7	8.15	9.90	10.30	56.10
8	8.05	10.00	10.05	56.95
9	8.10	10.00	10.10	56.60

Realizado por: AUTORES, 2018.

Ejecutando los ensayos a las mismas temperaturas y en las mismas condiciones se tiene:

Tabla 8 Resultados obtenidos para la construcción de la curva de resiliencia en función a la temperatura del material con refuerzo.

#	Energía de Impacto (J)	Energía de Impacto (Kgf-cm)	Área de Impacto (cm <sup>2</sup> )	Resiliencia (Kgf/cm)
1	1.00	10.197	0.81	12.589
2	1.00	10.197	0.80	12.746
3	1.00	10.197	0.835	12.212
4	8.00	81.577	0.806	101.263
5	21.00	214.140	0.805	266.013
6	30.00	305.915	0.795	384.799
7	30.00	305.915	0.807	379.147
8	30.00	305.915	0.805	380.018
9	31.00	316.112	0.810	390.262

Realizado por: AUTORES, 2018.

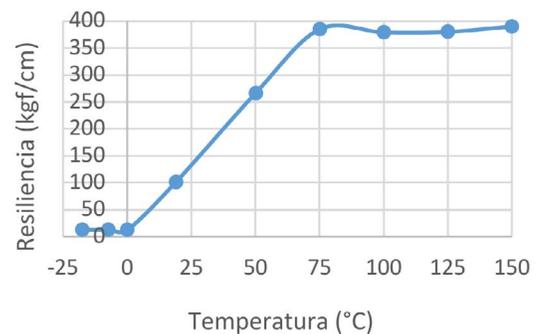


Figura 5 Comportamiento del acero AISI 1045 con refuerzo en función a la temperatura.

Realizado por: AUTORES, 2018.

En la cual efectivamente observamos un incremento, así como una disminución de la resiliencia.

Tabla 9 Aumento (+) o disminución (-) de la resiliencia en función a la temperatura.

Temperatura (°C)	Incremento o disminución (kgf/cm).
-17.5	- 18.884
-7.5	- 39.547
0	- 51.520
19	+ 37.531
50	+ 165.300
75	+ 257.334
100	+ 190.311
125	+ 188.822
150	+ 187.585

Realizado por: AUTORES, 2018.

Si se analiza el comportamiento del refuerzo aplicado, se evidencia como éste deja de ser efectivo a temperaturas bajas obteniendo disminuciones de hasta -51.520 Kgf/cm, pero a su vez conforme sube la temperatura el refuerzo es completamente efectivo logrando incrementos en su resiliencia de hasta de 257.334 Kgf/cm. Ahora bien, es apreciable su temperatura de transición dúctil-frágil, la cual se encuentra en el intervalo de 0°C a 75°C, a partir de esta temperatura se observa una estabilización casi completa de su resiliencia.

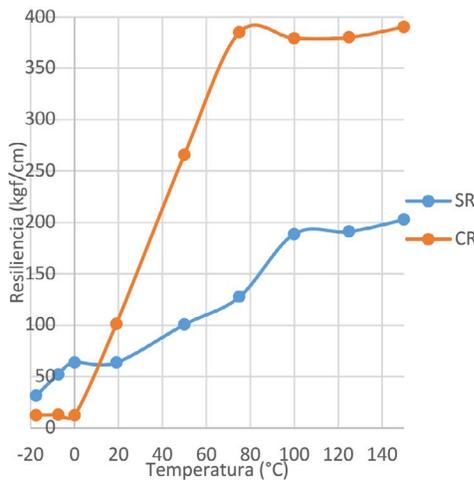


Figura 6 Comportamiento de la resiliencia en función a la temperatura con recubrimiento (CR) y sin recubrimiento (SR) Realizado por: AUTORES, 2018.

**Microestructura del acero ensayado**

El acero del cual han sido fabricadas las probetas para el ensayo, pertenecen a la misma barra de acero en donde las características del mismo se detallan a continuación. A través de un proceso de espectrometría se obtuvo la siguiente composición:

Tabla 10 Resultados obtenidos para la composición del acero, brindados por: "Brunker Analysis Report"

Elemento	Cantidad Porcentual
Carbono	0.404
Silicio	0.237
Manganeso	0.748

Fósforo	< 0.003
Azufre	< 0.003
Cromo	0.073
Molibdeno	0.033
Níquel	0.037
Cobre	0.027
Aluminio	0.027
Cobalto	0.0055
Niobio	< 0.0050
Titanio	0.0036
Vanadio	0.0079
Wolframio	< 0.020
Boro	< 0.0010
Estaño	0.0059
Hierro	98.39

Realizado por: AUTORES, 2018.

Por el contenido de carbono que está entre el intervalo de 0.2 a 0.5 %C perteneciente a aceros de medio carbono, lo comparamos con datos brindados por el libro Metals Handbook en donde tenemos:

Figura 7 Composiciones de acero y aleaciones de medio de carbono Fuente: Metals Handbook

En donde las composiciones se asemejan más a un acero 1040 y 1045 en los distintos componentes. Sin embargo más a un acero 1040 que a un 1045 en lo que concierne al contenido de carbono. Por lo cual se procede con el análisis metalográfico del acero estudiado:



Figura 8 Microestructura del acero ensayado, atacado con Nital al 2%. Ampliación 500 X Fuente: AUTORES

Y comparándolo con las microestructuras brindadas por el libro citado se tiene:

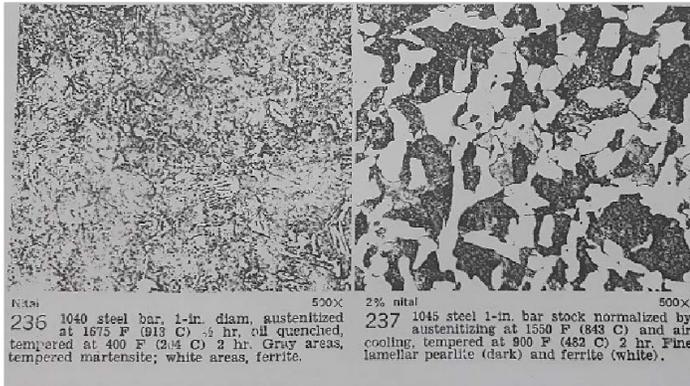


Figura 8 Microestructura del acero 1040 y 1045 respectivamente, atacadas con Nital al 2%. Ampliación 500 X

Fuente: Metals Handbook

En donde la microestructura del acero ensayado se asemeja más a un acero 1045 que a un acero 1040, en donde la diferencia en su contenido de carbono se puede atribuir a las imperfecciones de un material en lo que concierne a la homogenización del mismo.

## ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

El objetivo de la presente investigación es la selección y análisis de un refuerzo externo, para lo cual se analiza el comportamiento del poliuretano Siltex 800 haciendo uso del método conocido como ensayo de impacto Charpy. Llevando a cabo los ensayos de las probetas con y sin refuerzo se ha notado un incremento importante en la energía absorbida del material, el cual se observa en las gráficas comparativas de las curvas de transición dúctil-frágil del material.

Los ensayos se rigen a la norma ASTM E23, en donde se hace necesaria la presencia de una entalla en V, que sumado con las variaciones de la temperatura y velocidad de impacto hace que nuestro material este expuesto a condiciones elevadas de fragilidad. Podemos hacer énfasis en los contratiempos que se presentaron al momento de realizar las prácticas como es: la precisión de la máquina (Péndulo Charpy) la cual tiene baja precisión de tal manera que a esta máquina se debe realizar una previa calibración cada dos ensayos realizados, proporcionando un margen de error al momento de la toma de resultados. De la misma manera se pudo apreciar que después de aplicar una variación de la temperatura en las probetas, existe una variación en lo que concierne al traslado de las probetas al lugar de su ensayo, esto se dificulta debido a la ausencia de equipos en el laboratorio. Sin embargo se ha tomado los correctivos respectivos para lograr obtener datos lo más confiables posibles.

En lo que concierne al peso de las probetas se comprobó que el refuerzo no afectó en gran manera el peso de las probetas, el cual incrementó en 3 gramos el peso original. Sin embargo es un aspecto importante a considerar para aplicaciones de magnitudes considerables.

Finalmente se recomienda que para mayor fiabilidad de datos obtenidos se realicen al menos 3 ensayos para cada punto de interés obteniendo menores rangos de error.

## CONCLUSIONES

El método experimental aplicado en el análisis de la efectividad del poliuretano “SILTEX 800” utilizado como refuerzo en probetas mecanizadas bajo la norma ASTM E23 con entalle en V, con un espesor de aplicación de 1 mm indica un aumento de su resiliencia en un promedio de 101.88 Kgf/cm. Siendo esta una excelente opción para el incremento de su resiliencia cuando los requerimientos no sean exigentes debido a su fácil aplicación, excelentes acabados superficiales y al ser aplicable en la mayoría de superficies sin resultados adversos como falta de adhesión, sin embargo se observa que el mismo no es competitivo cuando se tenga temperaturas de trabajo por debajo de los 16°C, siendo recomendable cuando se tenga temperaturas de trabajo iguales o mayores a la del ambiente.

## BIBLIOGRAFÍA

1. ASTM E23 (2007) *Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials*.
2. Aceros BRAVO (25/06/2018) *Aceros al Carbono, Suministro laminado y trefilado*. Recuperado de <http://www.acerosbravo.cl/imgmodulo/Image n/112.pdf>
3. Roberlo (25/06/2018) *Siltex 800, Protector antivilla HS premium*. Recuperado de: <http://es.roberlo.com/carrocera/productoscomplementarios/protectores-y selladores/siltex-800/>
4. Fernando J. (23/06/2018) *Resiliencia - Prácticas - Fundamentos de Ciencias de los Materiales*. Recuperado de <https://www.docsity.com/es/resilienciapracticas-fundamentos-de-ciencias-de-losmateriales-ingeniero-tecnicoindustrial/180132/>
5. Jackson B. (23/06/2018) *Estudio del ensayo de impacto y su incidencia en el comportamiento mecánico del acero AISI 8620 mediante la norma ASTM E23*. Recuperado de: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/3704>
6. Rubio I., Yuquilema B. (23/06/2018) *Diseño, Construcción e Implementación de un Sistema de Elevación y Frenado del Péndulo Charpy*. Recuperado de <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/2339>
7. Viracocha C., Lasluisa E. (23/06/2018) *Diseño y construcción de una máquina de ensayo de impacto Charpy, para el laboratorio de electromecánica de la Universidad Técnica de Cotopaxi en el periodo 2014*. Recuperado de: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/1867>
8. UPV. (23/06/2018) *Curso básico: Ciencia de los Materiales* Universitat Politècnica de València (UPV). Recuperado de <https://www.upv.es/>
9. Eduardo F. Robles Piedras, Jesús Hidalgo Ibañes, Miliam Brumovský, “Pruebas mecánicas requeridas por el programa de vigilancia de la vasija, su aplicación en la CLV y requisitos reguladores”, *VIII Congreso de la SNM*, Guanajuato, México.
10. Mariano C. (15/07/2018) *Tecnología de los plásticos*. Recuperado de: <http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/06/abs.html>
11. Robert F. Mehl, Metals Handbook, 8va edición, Vol. 7 *Atlas of Microstructures of industrial Alloys*. Pág 29-32.

## LISTA ALFABÉTICA DE AUTORES

Alvarez, Juan  
Antamba Guasgua, Jaime  
Aquino, Miguel  
Asto, Cristian  
Astudillo, Christian  
Aucatoma, Ricardo  
Benítez, Víctor  
Bohórquez, Alejandra  
Buenaño M., Luis F.  
Caicedo Reyes, Isaías  
Cayán, Juan  
Cazorla B., Francisco M.  
Chas, Sandra  
Chimborazo, Segundo F.  
Cuaical A., Bolívar A.  
Curisaca, Jhonn  
Díaz, Oswaldo  
Fuertes, Marcelino  
García Flores, Alcides  
García, Eduardo  
Guamán Lozano, Ángel  
Gusqui Martínez, Estefanía P.  
Jácome, Román  
Laguas, Williams  
Leguísamo Milla, Julio  
Llanes Cedeño, Edilberto  
López, Damián  
Medina, Eduardo  
Miño Cascante, Gloria  
Mora Sánchez, Christian Andrés  
Moreno P., Ligia E.  
Moreno, Hugo O.  
Moyano Alulema, Julio  
Néjer, Jorge  
Ochoa, Marcelo  
Ojeda, David  
Orozco, Jhonny  
Ortiz González, Tatiana  
Pachacama, David  
Padilla, Celin  
Pancha, Johnny Marcelo  
Pazmiño, Alexandra  
Pérez Insuasti, Juan José  
Pozo, Jonatan  
Quinga, Milton  
Reyes Campaña, Gorky  
Reyes, David  
Rivera Enriquez, Marco I.  
Rocha Hoyos, Juan  
Rockwood, Robert  
Rojas, Vicente  
Romero, Vicente  
Saldaña, Xavier  
Santillán, Carlos  
Torres, Francisco  
Vaca, Oscar  
Velasco, Jenny  
Zabala, Mónica A.





Durante los días 15, 16, 17 y 18 de noviembre de 2018, la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por segunda ocasión se constituyó como el punto de encuentro de investigadores de Estados Unidos de Norteamérica, México, España, Cuba y Bélgica. El evento reunió a más de 50 investigadores que presentaron más de 20 ponencias, conferencias y pósters referentes a los nuevos avances tecnológicos y su aplicación en los campos de diseño, construcción, desarrollo e innovación en la ingeniería.



ISBN: 978-9942-801-01-2



9 789942 801012