



"La innovación en la ingeniería  
como herramienta para el desarrollo"

# 3<sup>er</sup> CONGRESO INTERNACIONAL DE INGENIERÍA

Fac. Mecánica, **ESPOCH**, 2019

ISBN: 978-9942-40-065-9





Con la finalidad de establecer una tradición académica que permita ser el espacio para la presentación de los diferentes resultados de investigación generados desde los espacios de la docencia y la industria, la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo presentó el evento denominado “*III Congreso Internacional de Ingeniería*” destinado a docentes, estudiantes y profesionales relacionados con la temática moderna y actualizada planteada como “*La innovación en la ingeniería como herramienta para el desarrollo*”; cuyo objetivo propuesto se relaciona con la posibilidad de actualizar y perfeccionar los estándares de calidad que plantean los nuevos retos de la educación superior, así como, el de patrocinar relaciones de comunicación y colaboración con otras universidades nacionales e internacionales.

En este contexto, los días del 21 al 24 de octubre de 2019 se genera el lugar para el intercambio, reflexión y renovación de los conocimientos cambiantes en el día a día de nuestras profesiones; se proporciona el espacio para la promoción y apoyo a las múltiples iniciativas, a las nuevas alternativas derivadas de investigaciones, innovaciones, desarrollos tecnológicos, y retos de la mecánica; se acentúa la comunicación academia, industria y sociedad, se genera las bases que conllevaran al reto próximo de la internacionalización de la Facultad, todo esto, gracias a la participación de profesionales, investigadores, docentes y estudiantes, nacionales e internacionales mediante posters, ponencias, talleres y conferencias en las 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.

La mencionada internacionalización se logra en esta ocasión con el aporte del profesor Stefano Belluci, Doctor en Física de Partículas de la Universidad de Sapienza Roma, de la profesora Roemi Emilia Fernández Saavedra Ph.D. en Robótica y Visión por Computadora desde España, profesor Antonio Jesús Sánchez Herguedas Doctor en Ingeniería de la Organización Industrial de la Universidad de Sevilla, profesor Giacomo Barbieri, Doctor en Ingeniería Mecatrónica en la universidad Modena y Reggio Emilia de Italia; investigadores docentes de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, Universidad del Azuay, e investigadores de la ESPOCH, con 17 ponencias aceptadas previa evaluación a doble ciego de los artículos correspondientes.

Finalmente, con la expresión de agradecimiento y reconocimiento a las autoridades institucionales por su total apoyo en la consecución de este evento científico, al equipo organizador, de logística y de apoyo, me permito presentar a vuestra consideración con enorme 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

# 3er Congreso Internacional de Ingeniería

"Nuevos avances tecnológicos aplicados a la ingeniería"

Facultad de Mecánica  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo

## COMITÉ ORGANIZADOR

### *Presidente:*

Ing. Miño Cascante Gloria Elizabeth, Ph. D.

### *Vicepresidente:*

Ing. Santillán Mariño Carlos José, Msc.

### *Miembros:*

Ing. Aquino Arroba Sócrates Miguel, Mgs.  
Dr. Audelo Guevara Mario Efrain, Mgs.  
Lcda. Carrillo Lopez Jacqueline, Mgs.  
Ing. Cayán Martínez Juan Carlos, Mgs.  
Ing. Escobar Gachambala Miguel Ángel, Mgs.  
Ing. Gallegos Londoño César Marcelo, Mgs.  
Ing. García Cabezas Eduardo Francisco, Mgs.  
Lcda. Jiménez Zavala Norma Mariella  
Ing. López Ortiz Santiago Alejandro Mgs.  
Ing. Orozco Ramos Jhonny Marcelo, Mgs.  
Ing. Padilla Padilla Celin Abad, Mgs.  
Dr. Ramos Flores Juan Marcelo, Mgs.  
Ing. Viteri Núñez Edwin Fernando, Mgs.

## COMITÉ CIENTÍFICO

Dr. Audelo Guevara Mario Efrain, Mgs.  
Ing. Balseca Sampedro Otto Fernando, Mgs.  
Ing. Buenaño Moyano Luis Fernando, Mgs.  
Ing. Caicedo Reyes Jorge Isaías, Mgs.  
Ing. Cayán Martínez Juan Carlos, Mgs.  
Ing. Cuaical Angulo Bolivar Alejandro, Mgs.  
Ing. García Cabezas Eduardo Francisco, Mgs.  
Ing. Gavilán Carrión Javier José, Mgs.  
Ing. Granizo José Antonio, Ph. D.  
Ing. Jácome Domínguez Edwin Ángel, Mgs.  
Ing. Llanes Cedeño Edilberto Antonio, Ph. D.  
Ing. Mayorga Pérez Diego Fernando, Mgs.  
Ing. Montúfar Paz Paúl Alejandro, Mgs.  
Ing. Moyano Alulema Julio César, Mgs.  
Ing. Néstor Alcibar Ulloa Auqui, Mgs.  
Ec. Orellana Quezada Dalton Paúl, Ph. D.  
Ing. Orna Chavez Javier Enrique, Mgs.  
Ing. Orozco Cantos Lenin Santiago, Mgs.  
Ing. Orozco Ramos Jhonny Marcelo, Mgs.  
Ing. Padilla Padilla Celin Abad, Mgs.  
Ing. Pérez Pupo Juan Rafael, Ph. D.  
Ing. Rocha Hoyos Juan Carlos, Mgs.  
Ing. Santillán Mariño Carlos José, Msc.  
Ing. Serrano Aguiar Carlos Oswaldo, Mgs.  
Ing. Viteri Núñez Edwin Fernando, Mgs.

## LIBRO DE MEMORIAS

### *Comité Editorial:*

Ing. Santillán Mariño Carlos José, Msc.  
Ing. Cayán Martínez Juan Carlos, Mgs.  
Ing. García Cabezas Eduardo Francisco, Mgs.  
Ing. Orozco Ramos Jhonny Marcelo, Mgs.  
Ing. Padilla Padilla Celin Abad, Mgs.  
Dr. Ramos Flores Juan Marcelo, Mgs.  
Ing. Viteri Núñez Edwin Fernando, Mgs.

### *Diseño y Maquetación:*

Juan Marcelo Ramos Flores

### *Fecha de publicación:*

28 de agosto de 2020

## ISBN

978-9942-40-065-9

## CONTACTO:

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo  
Facultad de Mecánica

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

Riobamba - Ecuador

© 2020

## ÍNDICE DE PONENCIAS

Estudio teórico del rendimiento de una bomba de calor aire-agua para producción simultánea de agua caliente sanitaria y calefacción en climas fríos.	1
<i>Tello Oquendo, F.; Vásconez Núñez, D.; Navarro Peris, E.</i>	
Influencia de la absortividad de las superficies exteriores y la transmisividad de los cristales sobre el consumo energético del sistema A/C y las emisiones de CO <sub>2</sub> en un autobús eléctrico.	12
<i>Vásconez Núñez, D.; Tello Oquendo, F.; González Maciá, J.</i>	
Comportamiento de la conductividad térmica y resistencia mecánica del mortero adicionado fibras de cabuya.	23
<i>Ordóñez, M; Pozo, E.; Aquino, M.</i>	
Caracterización del ecodriving mediante pruebas dinanométricas y de ruta en la ciudad de Quito.	33
<i>Leguísamo, J.; Rocha, J.; Llanes, E.; Dávila, J.</i>	
Análisis termodinámico por componentes de un prototipo dinámico caso práctico: sistema de refrigeración doméstica.	43
<i>Calderón Freire, E.; Tenicota García, A.; Moyano Arévalo, J.; Gallegos Londoño, C.; Moreano Sánchez, G.</i>	
Diseño y selección de elementos principales para la elaboración de una trituradora de neumáticos.	51
<i>Moyano, J.; Naranjo, E.; Chuqui, W.; Soria, B.; Casa, J.</i>	
Validación de metodologías empleadas en simulaciones CAE utilizadas para el desarrollo del prototipo Shell Eco-Marathon de la Universidad del Azuay	62
<i>Rockwood, R.; Muñoz, F.; Torres, F.; Delgado, G.</i>	
Evaluación de la capacidad calorífica del propilenglicol mediante la adición de nanopartículas de alofan.	79
<i>Vargas, A.; Martínez, E.; Moreno, T.; Silva, J.; Chango, G.; Vera, J.; Viteri, E.</i>	

Diseño y construcción de una rueda hidráulica para la generación de energía.	89
<i>Balseca, O.; Camacho, M.; Naranjo, W.</i>	
Turbocompresores: Análisis y selección.	104
<i>Balseca, O.; Hidalgo, J.; Tenemaza, S.</i>	
Cálculo de costos en la construcción de recipientes a presión bajo estándar ASME.	112
<i>Córdova, J.; Miño, G.; Logroño, S.; Gallardo, F.</i>	
Metodología para la simulación de un ensayo de impacto mediante MEF.	126
<i>López, S.; Quinga, M.; Abarca, E.; Sánchez, E.</i>	
Evaluación de resistencia al impacto mediante péndulo tipo Izod en probetas impresas en 3D de PLA y ABS con estructura cúbica y tri hexagonal.	137
<i>Novillo, G.; Pozo, E.; Aquino, M.; Escobar, M.</i>	
Sistema de telemetría aplicado a vehículos de bajo consumo de combustible participantes en la competencia Shell Eco Marathon.	146
<i>Morocho, David.; Gavil ánes, J.; Néjer, J.</i>	
Propuesta metodológica para la enseñanza de calibrador, micrómetro y goniómetro a nivel superior con la utilización de la herramienta Syvem desarrollada en el OSS P5.JS.	156
<i>Mayorga, D.; Viteri, E.; Salazar, M.; Varela, A.</i>	
Mejoramiento del proceso de producción de losas alveolares bajo metodología Lean Six Sigma en la Empresa Pública Cementera EPCE	170
<i>Carrera Cabezas, R. M.</i>	

## ESTUDIO TEÓRICO DEL RENDIMIENTO DE UNA BOMBA DE CALOR AIRE-AGUA PARA PRODUCCIÓN SIMULTÁNEA DE AGUA CALIENTE SANITARIA Y CALEFACCIÓN EN CLIMAS FRÍOS

Tello-Oquendo, Fernando M. <sup>1</sup>; Vásconez-Núñez, Daniela C. <sup>1</sup>; Navarro-Peris, Emilio <sup>2</sup>

1. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
2. Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Energética (IUIIE), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, Valencia, España.  
Autor de correspondencia: ferficho@hotmail.com

### RESUMEN

Hoy en día, uno de los desafíos más importantes en sector residencial es la mejora de la eficiencia de los equipos y sistemas utilizados para la producción de calefacción (Cf) y agua caliente sanitaria (ACS). El objetivo principal es reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de CO<sub>2</sub> en estas aplicaciones. En este contexto, las bombas de calor se consideran una tecnología efectiva como una alternativa a las calderas para la producción de Cf y ACS. Sin embargo, la demanda de Cf tiene un nivel de temperatura diferente al de la demanda de ACS. En general, la demanda de Cf tiene un nivel de temperatura variable que depende del tipo de sistema de distribución (tipo de edificio) y las diferentes condiciones climáticas, mientras que la demanda de ACS requiere el almacenamiento de agua caliente a una temperatura superior a 60 °C para evitar la presencia de legionella. Por otro lado, el rendimiento de las bombas de calor se deteriora cuando se trabaja con altas temperaturas de condensación. Este artículo presenta un estudio teórico del rendimiento de una bomba de calor aire-agua para la producción simultánea de Cf y ACS, donde se analiza el uso de un desrecalentador para la producción de ACS y el condensador para la producción de Cf. El estudio muestra la optimización de la capacidad del desrecalentador para una demanda de Cf determinada. El rendimiento de la bomba de calor se analiza en términos de COP y las capacidades del condensador y del desrecalentador.

Palabras clave: bomba de calor, rendimiento, calefacción, agua caliente sanitaria, estudio teórico.

### ABSTRACT

Nowadays, one of the most important challenges in the residential sector is the efficiency improvement of the equipment and systems used for space heating (SH) and domestic hot water (DHW) production. The main objective is to reduce the consumption of fossil fuels and CO<sub>2</sub> emissions in these applications. In this context, heat pumps are considered to be an effective technology as an alternative to boilers for SH and DHW production. However, the SH demand has a different temperature level than the DHW demand. Generally, the SH demand has a variable temperature level that depends on the type of distribution system (type of building) and the different climate conditions, while the DHW demand requires storage of hot water at a temperature above 60 °C to prevent the presence of legionella. On the other hand, the performance of heat pumps is deteriorated when working with high condensing temperatures. This paper presents a theoretical study of the performance of an air-to-water heat pump for simultaneous SH and DHW production, where the use of a desuperheater for DHW production and the condenser for SH production are analyzed. The study shows the optimization of the desuperheater capacity for a given SH demand. The performance of the heat pump is analyzed in terms of the COP and the capacities of the condenser and desuperheater.

Keywords: heat pump, performance, space heating, domestic hot water, theoretical study.

# 1 INTRODUCCIÓN

En la Unión Europea, el sector residencial utiliza principalmente energía para calefacción: esto representa alrededor de dos tercios (64,7%) de su consumo final de energía. Además, la energía utilizada para el calentamiento del agua representa el 14.5%, lo que significa que, en general, el calentamiento de agua y la calefacción representaron el 79.2% de la energía final consumida por el sector residencial, como se muestra en la Figura 1.

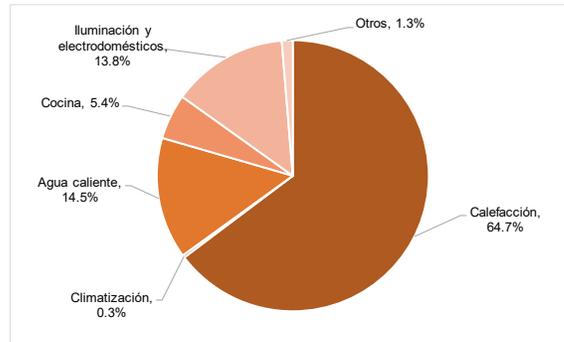


Figura 1: Consumo final de energía en el sector residencial para cada tipo de uso final, EU-28, 2016 (1).

Por otro lado, en el sector residencial, la mayoría de la energía consumida para calefacción y agua caliente sanitaria es producida mediante la utilización de gas natural y electricidad como suministro de energía de calderas. En el caso particular de la Unión Europea, para el calentamiento del agua, la mayor parte de la energía consumida es gas natural (49,3%) y electricidad (19,7%). Las energías renovables representan el 9.9% del consumo de energía, los productos derivados del petróleo el 10.6% y el calor derivado el 9.2%, mientras que una pequeña proporción (1.4%) todavía está cubierta por combustibles sólidos. Para la calefacción de espacios, la proporción de combustibles en el consumo final es similar. Sin embargo, las energías renovables representaron el 22.1% y los productos derivados del petróleo el 10.6%, como se muestra en la Figura 2.

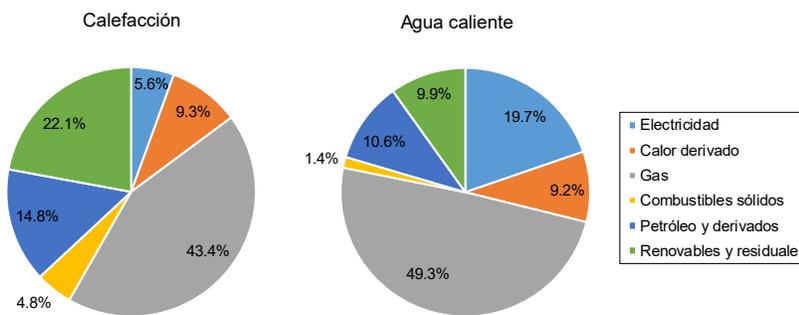


Figura 2: Participación de los combustibles en el consumo final de energía en el sector residencial para calefacción y agua caliente sanitaria, EU-28, 2016 (1).

Por estas razones, la mejora de la eficiencia de los equipos y sistemas utilizados para la calefacción (Cf) y la producción de agua caliente sanitaria (ACS) es uno de los desafíos más importantes en el sector residencial. El objetivo principal es reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de CO<sub>2</sub> en estas aplicaciones.

En este contexto, la bomba de calor se considera una tecnología energéticamente eficiente para la calefacción y la producción de agua caliente sanitaria. Esta tecnología puede ser una alternativa a las

calderas convencionales para la producción de Cf y ACS, que utilizan combustibles fósiles. Por lo tanto, la aplicación de bombas de calor a la calefacción de espacios para edificios residenciales en regiones frías reducirá la combustión de gas, petróleo y otros combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero.

Sin embargo, la demanda de Cf tiene un nivel de temperatura diferente que la demanda de ACS. En general, la demanda de Cf tiene un nivel de temperatura variable que depende del tipo de sistema de distribución (tipo de edificio) y las diferentes condiciones climáticas, mientras que la demanda de ACS requiere el almacenamiento de agua caliente a una temperatura superior a 60 °C para evitar la presencia de legionella. Por otro lado, el rendimiento de las bombas de calor se deteriora cuando se trabaja con altas temperaturas de condensación.

En general, las bombas de calor pueden producir ACS en edificios residenciales de dos maneras: una unidad individual con una capacidad relativamente baja para cubrir toda la demanda o un calentador de agua separado en una unidad integrada que proporciona simultáneamente Cf.

En los mercados europeos, las ventas de la bomba de calor de ACS individual con una capacidad promedio de 2 a 3 kW se han desarrollado significativamente durante la última década. Por otro lado, varias unidades de bomba de calor de fuente geotérmica de gran capacidad (100 a 400 kW) que utilizan HFCs como refrigerantes se han implementado con éxito con desrecalentador en la línea de descarga, que puede proporcionar ACS simultáneamente con calefacción o refrigeración de espacios (2). Ambas soluciones son un reemplazo prometedor para el calentamiento eléctrico directo al proporcionar ACS, lo que ahorrará energía en los edificios (3).

La mayoría de los sistemas analizados con producción simultánea de calefacción de espacios y calefacción de agua son bombas de calor de agua-agua (4), (5), (6); sistemas de bomba de calor de CO<sub>2</sub> (7). Blanco et al. (6) estudió una bomba de calor que funciona con R-410A, con un desrecalentador y un condensador, dividiendo deliberadamente el proceso de enfriamiento de gas y condensación en dos partes. Un compresor de velocidad variable y una válvula de expansión electrónica controlan el ciclo. Para una temperatura objetivo de agua caliente sanitaria de 65 °C y una temperatura de calentamiento de espacio de 35 °C, suministrada por una temperatura de entrada al suelo de 5 °C, el COP más alto medido fue 4.5.

Todos los estudios previos abordaron el análisis experimental del rendimiento de la bomba de calor para la producción de Cf y ACS, con un diseño específico. Sin embargo, hasta donde sabemos, no existe un análisis sistemático y de optimización de este tipo de sistemas. Además, un desafío importante sobre esta aplicación es optimizar la relación de capacidades, el diseño y el rendimiento de las bombas de calor monovalentes con el objetivo de cumplir con los requisitos térmicos de calefacción de espacios y calentamiento de agua en hogares de baja energía de acuerdo con la variación de la demanda.

En este contexto, este artículo presenta un estudio teórico del rendimiento de una bomba de calor aire-agua para la producción simultánea de Cf y ACS, donde se analiza el uso de un desrecalentador para la producción de ACS y el condensador para la producción de Cf. El estudio muestra la optimización de la capacidad del desrecalentador para una determinada demanda de Cf. El rendimiento de la bomba de calor se analiza en términos de COP y las capacidades del condensador y el desrecalentador.

## 2 METODOLOGÍA

Para estudiar el rendimiento de la bomba de calor, se implementó un modelo general del ciclo de compresión de vapor utilizando el software EES (8). Las condiciones de contorno del ciclo son la temperatura de evaporación, la temperatura de condensación, el sobrecalentamiento en la entrada del compresor y el subenfriamiento en la salida del condensador.

El caudal másico del evaporador está determinado por la ecuación (1) donde el número 1 se encuentra en la entrada del compresor,  $\rho$  representa la densidad en (kg/m<sup>3</sup>),  $\eta_v$  representa su eficiencia volumétrica,  $\dot{V}_s$  es el volumen desplazado por el compresor en (m<sup>3</sup>/s). La eficiencia volumétrica del compresor se modela como una correlación lineal en términos de la relación de presión ( $P_r$ ) determinada por la ecuación (2). Todos los puntos se refieren al esquema del ciclo de la Figura 3. Las propiedades del

refrigerante en la salida del evaporador (punto 1) están definidas por la temperatura de evaporación ( $T_e$ ) y el sobrecalentamiento en la entrada del compresor (SH) mediante la ecuación (3). Las propiedades del refrigerante en la salida del condensador (punto 4) están definidas por la presión de condensación y el subenfriamiento (Ecuación (4)).

$$\dot{m}_e = \eta_v \dot{V}_s \rho_1 \quad (1)$$

$$\eta_v = A_1 * P_r + B_1 \quad (2)$$

$$T_1 = T_e + SH \quad (3)$$

$$T_4 = T_c - SC \quad (4)$$

La eficiencia del compresor se calcula mediante la ecuación (5) en función de la relación de presión. Los coeficientes de las correlaciones de eficiencia del compresor (ecuaciones (2) y (5)) se ajustaron en base a los datos de catálogo de un compresor scroll de 14.269 m<sup>3</sup>/h.

$$\eta_c = A_2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{P_r - D_2}{B_2}\right) \right] - C_2 \ln(P_r + 1) \quad (5)$$

Todas las propiedades termo-físicas del refrigerante en los diferentes puntos del ciclo se calculan con la base de datos NIST REFPROP (9). El modelo desprecia la caída de presión en los intercambiadores de calor y considera una expansión isoentálica en la válvula.

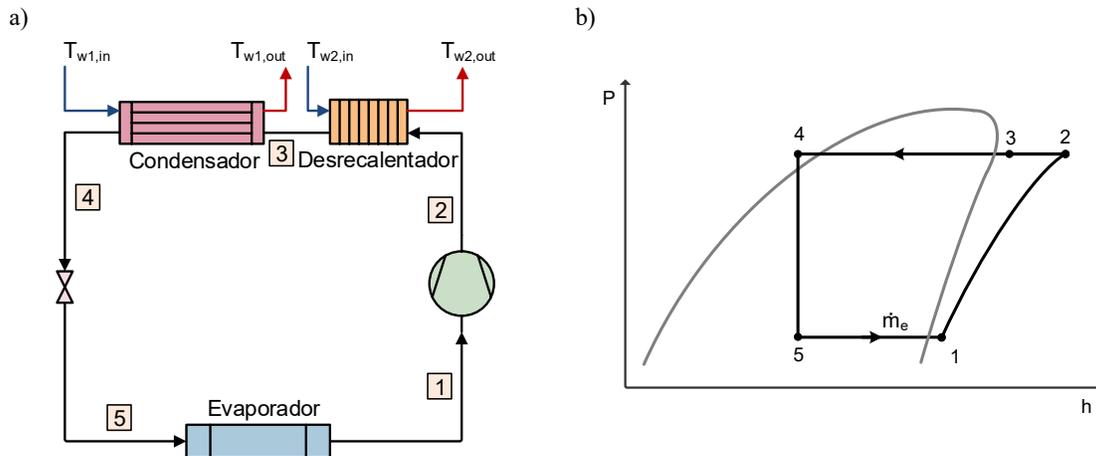


Figura 3: a) Esquema del ciclo de una bomba de calor para producción simultánea de calefacción y agua caliente sanitaria. b) Diagrama P-h del ciclo.

El desrecalentador (DC) se modela utilizando una aproximación  $\varepsilon$ -Ntu, considerando flujo a contracorriente entre el refrigerante y el fluido secundario (agua). El calor intercambiado en el DC se calcula mediante la ecuación (6), donde  $\dot{C}_{min}$  es la capacitancia mínima de los fluidos, la efectividad ( $\varepsilon$ ) se calcula mediante la ecuación (7) y el Ntu por la ecuación (8). La conductancia UA es un parámetro del modelo en (W/K).

$$\dot{Q}_{DC} = \varepsilon * \dot{C}_{min} * (T_2 - T_{w2,in}) \quad (6)$$

$$\varepsilon = f(\dot{C}_{ref}, \dot{C}_w, Ntu) \quad (7)$$

$$Ntu = \frac{UA}{\dot{C}_{min}} \quad (8)$$

Cuando el estado del refrigerante en la salida del desrecalentador (punto 3) está en condición de sobrecalentamiento, la temperatura de condensación se define por el balance de energía en el condensador. Por lo tanto, la temperatura de condensación está limitada por el perfil de temperatura del fluido secundario a través de un punto de aproximación (pinch) interno como se muestra en la Figura 4.

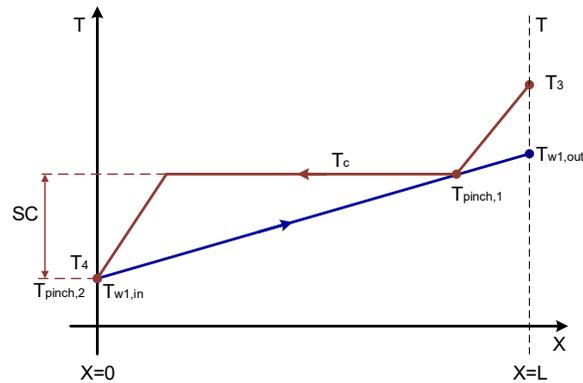


Figura 4: Perfil de temperatura del agua y del refrigerante en el condensador.

Por lo tanto, el siguiente balance de energía se plantea en el condensador.

$$\dot{m}_{w1} C_{p_{w1}} (T_{w1,out} - T_{w1,in}) = \dot{m}_e (h_3 - h_4) \quad (9)$$

$$\dot{m}_{w1} C_{p_{w1}} (T_{pinch,1} - T_{w1,in}) = \dot{m}_e (h_{pinch,1} - h_4) \quad (10)$$

$$T_{pinch,1} = T_c \quad (11)$$

La entalpía en la salida del condensador está definida por la ecuación (12). La aproximación de temperatura en el condensador con área de transferencia de calor infinita (Ecuación (13)) es igual a 0 K.

$$h_4 = h(P_c, T_b(P_c) - SC) \quad (12)$$

$$DT_{pinch,2} = T_4 - T_{w1,in} \quad (13)$$

El consumo energético del compresor ( $\dot{E}$ ) se estima a partir de la definición de eficiencia isentrópica, utilizando la ecuación (14).

$$\dot{E} = \frac{\dot{m}_e (h_{2s} - h_1)}{\eta_c} \quad (14)$$

La capacidad destinada a ACS (capacidad del desrecalentador) se define en la ecuación (15), y la capacidad destinada a la calefacción de espacios (capacidad del condensador) se define en la ecuación (16). El COP de calentamiento de la bomba de calor se define en la ecuación (17).

$$\dot{Q}_{ACS} = \dot{m}_{w2} C_{p_{w2}} (T_{w2,out} - T_{w2,in}) \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{Cf} = \dot{m}_{w1} C_{p_{w1}} (T_{w1,out} - T_{w1,in}) \quad (16)$$

$$COP = \frac{\dot{Q}_{ACS} + \dot{Q}_{Cf}}{\dot{E}} \quad (17)$$

Para las simulaciones de ciclo, se definen los parámetros que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros definidos para las simulaciones del ciclo.

Parámetro	Valor
Refrigerante	R-290
$\dot{V}_s$	14.269 m <sup>3</sup> /h
$T_e$	-8 °C
SH	5 K
$T_{w1,in}$	40 °C
$T_{w1,out}$	45 °C
$T_{w2,in}$	10 °C
$T_{w2,out}$	60 °C

Teniendo en cuenta que la bomba de calor está diseñada para satisfacer la demanda de calefacción de espacios, este estudio tiene como objetivo analizar cuánta capacidad se puede extraer para calentar agua utilizando un desrecalentador antes del condensador.

La bomba de calor analizada tiene dos disipadores térmicos con diferentes niveles de temperatura y diferencias de temperatura. Para ACS, el desrecalentador trabaja con un salto de temperatura grande (50 K) y alto nivel de temperatura (60 °C). Para Cf, el condensador tiene un salto de temperatura pequeño (5 K) y un bajo nivel de temperatura (45 °C). En este contexto, la temperatura del disipador de calor (fluido secundario) tanto del condensador como del desrecalentador no tienen temperatura constante. Por lo tanto, la definición utilizada en la Ecuación 16 para estimar el COP del ciclo, considerando como referencia el ciclo ideal de Carnot, no es la mejor manera de estimar el rendimiento del ciclo en esta aplicación. Consecuentemente, para analizar el rendimiento del ciclo cuando el disipador de calor tiene un incremento de temperatura, se considera el ciclo de Lorenz ideal como referencia. El coeficiente de rendimiento de Lorenz (10) se define para cada disipador de calor, mediante las ecuaciones (18) y (19).

$$COP_{L,1} = \frac{\overline{T_{H,1}}}{\overline{T_{H,1}} - \overline{T_{C,1}}} \quad (18)$$

$$COP_{L,2} = \frac{\overline{T_{H,2}}}{\overline{T_{H,2}} - \overline{T_{C,2}}} \quad (19)$$

Donde  $\overline{T_{H,i}}$  es la temperatura media logarítmica del disipador de calor y  $\overline{T_{C,i}}$  es la temperatura media logarítmica de la fuente de calor. En este caso,  $\overline{T_{C,i}} = T_e$  porque la temperatura de evaporación ( $T_e$ ) se considera constante. Las  $\overline{T_{H,i}}$  para Cf ( $\overline{T_{H,1}}$ ) y para ACS ( $\overline{T_{H,2}}$ ) se calculan mediante las ecuaciones (20) y (21), respectivamente.

$$\overline{T_{H,1}} = \frac{T_{w1,in} - T_{w1,out}}{\ln\left(\frac{T_{w1,in}}{T_{w1,out}}\right)} \quad (20)$$

$$\overline{T_{H,2}} = \frac{T_{w2,in} - T_{w2,out}}{\ln\left(\frac{T_{w2,in}}{T_{w2,out}}\right)} \quad (21)$$

Puesto que el ciclo tiene dos disipadores de calor y cada disipador de calor tiene su capacidad respectiva, es necesario definir un COP ponderado de Lorentz ( $\overline{COP}_L$ ) para el ciclo, utilizando la Ecuación (22).

Este factor es la suma del producto de cada  $COP_{L,i}$  por la relación de capacidad ( $\alpha_i$ ) de cada disipador de calor.

$$\overline{COP}_L = \alpha_1 COP_{L,1} + \alpha_2 COP_{L,2} \quad (22)$$

$$\alpha_1 = \frac{\dot{Q}_{Cf}}{\dot{Q}_{Cf} + \dot{Q}_{ACS}} \quad (23)$$

$$\alpha_2 = \frac{\dot{Q}_{ACS}}{\dot{Q}_{Cf} + \dot{Q}_{ACS}} \quad (24)$$

Finalmente, basándose en un análisis de la segunda Ley de la Termodinámica, se define la Eficiencia de Lorenz ponderada mediante la ecuación (25). Esta eficiencia relaciona el COP del ciclo con el COP ponderado de Lorenz del ciclo.

$$\eta_L = \frac{COP}{\overline{COP}_L} \quad (25)$$

Para analizar las capacidades del condensador y del desrecalentador, se realiza un estudio paramétrico para varios valores del caudal másico de agua a través del desrecalentador ( $\dot{m}_{w2}$ ), que varía de 0,0001 a 0,0475 kg/s.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 5a muestra la variación de la capacidad de Cf y ACS en función del caudal másico de agua a través del desrecalentador ( $\dot{m}_{w2}$ ). A medida que aumenta el caudal másico de agua a través del desrecalentador, la capacidad destinada a Cf disminuye linealmente. Con estos resultados, no se puede establecer una relación de capacidad óptima para la producción simultánea de Cf y ACS. La Figura 5b representa la variación del COP y la temperatura de condensación en función del flujo de agua a través del desrecalentador.

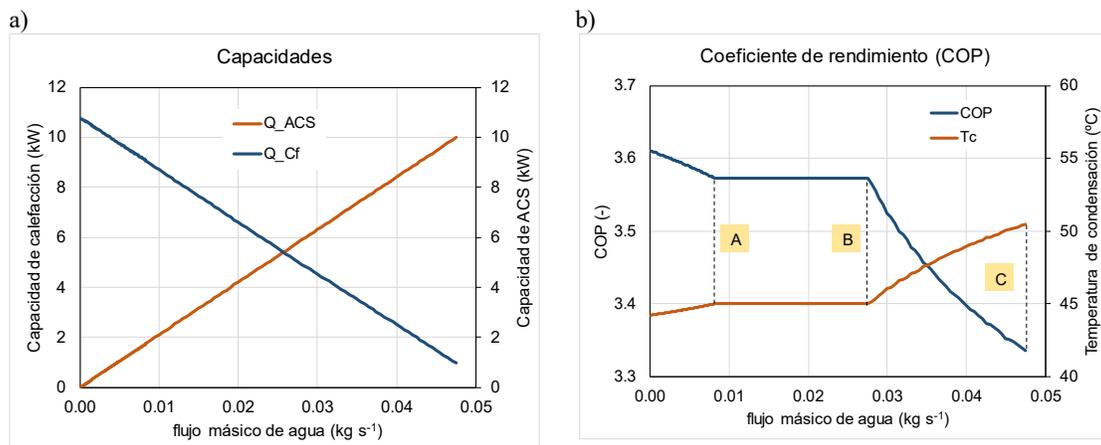


Figura 5: a) Variación de la capacidad para Cf y producción de ACS en función del flujo másico de agua a través del desrecalentador. b) Variación del COP y de la temperatura de condensación en función del flujo másico de agua a través del desrecalentador.

La Figura 5b muestra que el COP y T<sub>c</sub> varían en tres fases. La primera fase corresponde de 0,0001 a 0,008298 kg/s, hasta la condición "A". En este rango, el refrigerante en la salida del desrecalentador (ver

punto 3 en la Figura 3a) está en condición de sobrecalentamiento. Por lo tanto, la temperatura de condensación está definida por el balance de energía en el condensador, y está limitada por el perfil de temperatura del fluido secundario, como se puede ver en la Figura 4. Consecuentemente, el valor de  $T_c$  más bajo, el cual maximiza el COP, se alcanza cuando hay dos puntos de aproximación (pinch) iguales a cero en el condensador. Durante esta primera fase, la temperatura de condensación aumenta ligeramente y el COP disminuye.

A medida que aumenta el  $\dot{m}_{w2}$ , el refrigerante alcanza la condición "A". En esta condición, el punto 3 está en un estado saturado, como se muestra en la Figura 6. Por lo tanto, el valor más bajo de  $T_c$  es igual a la temperatura de salida del agua en el condensador ( $T_c = T_{w1,out} = 45\text{ °C}$ ), para evitar cruces de temperatura y para cumplir con la segunda ley de la Termodinámica.

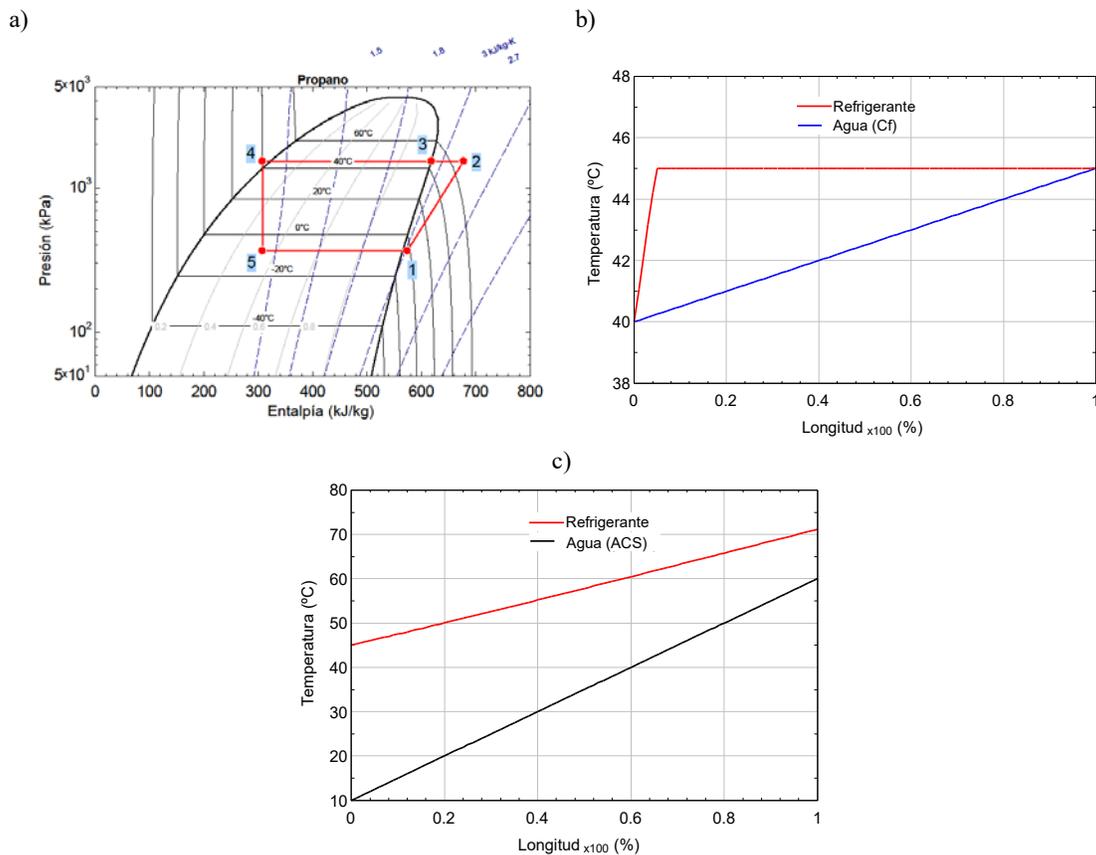


Figura 6: a) Diagrama P-h del ciclo cuando el punto 3 está en condición de saturación (condición "A"). b) Perfil de temperatura del condensador. c) Perfil de temperatura del desrecalentador.

La segunda fase es cuando el punto 3 está en condición bifásica, para valores de  $\dot{m}_{w2}$  de 0.008298 kg/s a 0.0275 kg/s. En este rango,  $T_c$  también está determinada por el balance de energía en el condensador. Por lo tanto,  $T_c$  y el COP permanecen constantes hasta la condición "B" (ver Figura 5b). La condición "B" se alcanza cuando el punto de aproximación interno en el desrecalentador es igual a cero, como se muestra en la Figura 7b. Este punto es el límite térmico en el intercambiador de calor de área infinita. Por lo tanto,  $T_c = 45\text{ °C}$  y el perfil de temperatura del condensador es el que se muestra en la Figura 6b.

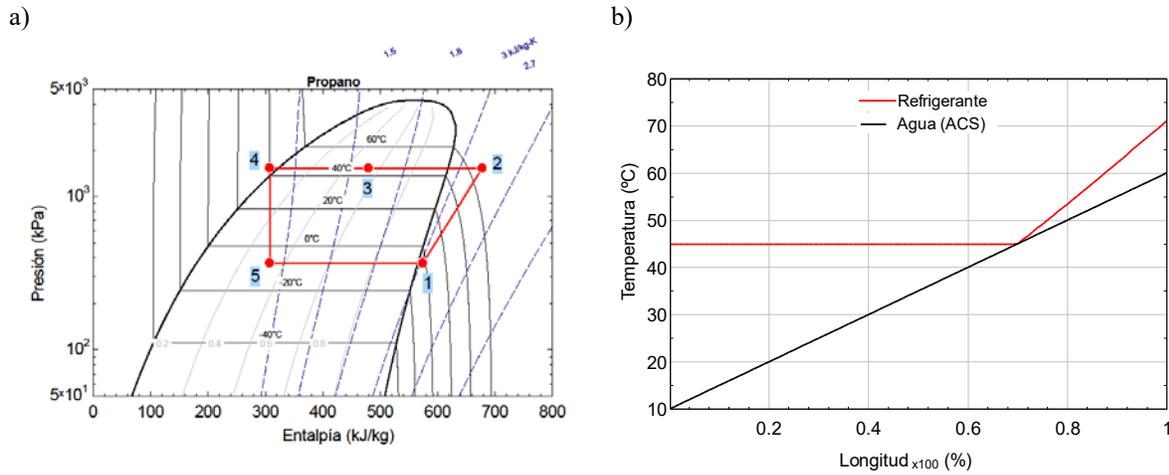


Figura 7: a) Diagrama P-h del ciclo cuando el punto 3 está en condición bifásica (condición “B”). b) Perfil de temperatura del desrecalentador.

Después de la condición "B", en la tercera fase, la temperatura de condensación está determinada por el balance de energía en el desrecalentador. Debido a que  $\dot{m}_{w2}$  aumenta de 0.0275 a 0.04575 kg/s, la  $T_c$  tiene que aumentar para suministrar la energía necesaria para calentar el agua del desrecalentador, manteniendo el punto de aproximación de temperatura interno. Por lo tanto, el punto 3 permanece en condición bifásica hasta la condición "C" que corresponde al punto de burbuja (líquido saturado). Puesto que  $T_c$  aumenta en esta tercera fase, el COP del ciclo se ve afectado y disminuye hasta 3.572. Para ilustrar la variación de las propiedades refrigerantes del punto 3, su entalpía y temperatura se representan en la Figura 8.

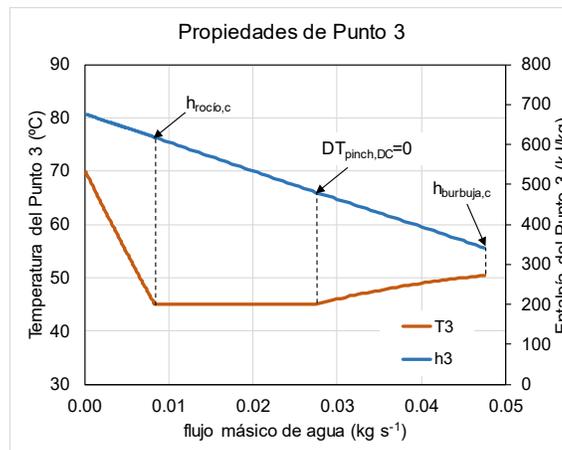


Figura 8. Propiedades térmicas del refrigerante en el punto 3 en función del flujo másico de agua a través del desrecalentador.

Sin embargo, con las variables analizadas previamente, no es posible encontrar una condición de funcionamiento óptimo para esta bomba de calor. Como se comentó en la sección 2, el ciclo debe estudiarse teniendo en cuenta la Eficiencia de Lorentz ponderada ( $\eta_L$ ). La Figura 9 representa la variación de  $\eta_L$  en función de  $\dot{m}_{w2}$ . Esta figura muestra un  $\eta_L$  óptimo cuando el ciclo funciona en la condición "B". Es entonces cuando hay un punto de aproximación de temperatura interno igual a cero en el desrecalentador. En esta condición,  $T_c$  tiene el valor más bajo (45 °C).

Este análisis demuestra que el COP del ciclo no es suficiente para analizar el rendimiento real de una bomba de calor cuando los disipadores de calor tienen diferentes niveles de temperatura y diferentes saltos de temperatura.

La Tabla 2 resume las condiciones óptimas de funcionamiento de la bomba de calor para esta aplicación.

Tabla 2: Condiciones óptimas de operación de la bomba de calor.

Parámetro	Condensador	Desrecalentador
$T_{w,in}$ (°C)	40	10
$T_{w,out}$ (°C)	45	60
$\dot{m}_w$ (kg/s)	0.2409	0.0275
$\dot{Q}$ (kW)	5.028	5.782
$\alpha$ (-)	0.465	0.535
$UA$ (W/K)	-	0.0845

Los resultados muestran que la fracción de capacidad ( $\alpha$ ) del condensador y el desrecalentador se acercan a 0.5. Es decir que, la relación de capacidades entre producción de ACS y Cf está en torno a la mitad. Por otro lado, a partir de la relación de capacidades óptima de la bomba de calor, se puede dimensionar el tamaño del desrecalentador. Para este caso particular, el UA del intercambiador de calor es de 0.0845 W/K.

Es importante tener en cuenta que la bomba de calor funcionará continuamente para satisfacer la demanda de Cf y, cuando sea necesario, la bomba de calor funcionará para satisfacer simultáneamente la demanda de Cf y de ACS. Cuando esto ocurra, el sistema tiene que trabajar en las condiciones obtenidas en el presente estudio para lograr un rendimiento óptimo. El agua caliente se almacena en un tanque.

Una vez identificadas las condiciones óptimas, los diseñadores pueden dimensionar el desrecalentador para alcanzar estas condiciones óptimas.

#### 4 CONCLUSIONES

Este artículo presenta un estudio teórico del rendimiento de una bomba de calor aire-agua para la producción simultánea de Cf y ACS, donde se analiza el uso de un desrecalentador para la producción de ACS y el condensador para la producción de Cf. Las siguientes conclusiones se pueden extraer de este estudio:

- La condición de funcionamiento óptima de la bomba de calor para la producción simultánea de Cf y ACS se logra cuando se tiene un punto de aproximación de temperatura interno igual a cero en el desrecalentador.
- Para la aplicación estudiada, la relación de capacidades es cercana a 0.5 para la producción de Cf y ACS.
- Según los resultados de la optimización, se puede estimar el tamaño del desrecalentador, en este caso, la UA recomendada es de 0.0845 W/K.
- A medida que aumenta el caudal másico de agua en el desrecalentador, el COP del ciclo siempre disminuye. Por lo tanto, el COP no es útil para analizar el rendimiento del ciclo real porque la aplicación propuesta no tiene fluido secundario con una temperatura constante.
- Se definió una eficiencia ponderada de Lorentz para estudiar el rendimiento del ciclo. Esta eficiencia relaciona el COP del ciclo con el COP ponderado de Lorentz, considerando el nivel de temperatura y la diferencia de temperatura de los dos disipadores de calor.
- En las condiciones óptimas de funcionamiento, la temperatura de condensación está determinada por el balance de energía en el desrecalentador, y está limitada por el perfil de temperatura en el intercambiador de calor.

Los resultados presentados en este estudio son útiles para optimizar la operación cuando la bomba de calor produce simultáneamente Cf y ACS. Además, el estudio proporciona información para dimensionar el desrecalentador con el fin de maximizar la capacidad de ACS para una determinada demanda de Cf.

## AGRADECIMIENTOS

Fernando M. Tello-Oquendo y Daniela C. Vásquez-Núñez agradecen el apoyo financiero brindado por el programa CONVOCATORIA ABIERTA 2013-SEGUNDA FASE, otorgado por la SENESCYT de Ecuador (Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación) (Asignaciones No 2015-AR37665 y 2014-AR3R7463).

## 5 REFERENCIAS

- (1) European Commission, "Eurostat. Statistics Explained - Energy consumption in households," 2018. [Online]. Available: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy\\_consumption\\_in\\_households](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Energy_consumption_in_households). [Acceso 04 12 2018].
- (2) EHPA, "European Heat Pump Market and Statistics Report 2016," European Commission 7th framework program. Next Generation of Heat Pumps working with Natural fluids, Brussels-Belgium, 2016.
- (3) Xu T, Navarro-Peris E, Piscopiello S, Sawalha S, Corberán JM, Palm B. Large-capacity propane heat pumps for the production in residential buildings. En: *13th IIR Gustav Lorentzen Conference*; 2018 Jun 18-20; Valencia-España; 2018; paper 1382.
- (4) Fernández-Seara J, Pereiro A, Bastos S, Dopazo JA. 2012. Experimental evaluation of a geothermal heat pump for space heating and domestic hot water simultaneous production. *Renewable Energy*. 48:482-488.
- (5) Sebarchievici C, Sarbu I. 2015. Performance of an experimental ground-coupled heat pump system for heating, cooling and domestic hot-water operation. *Renewable Energy*. 76:148-159.
- (6) Blanco DL, Nagano K, Morimoto M. 2013. Experimental study on a monovalent inverter-driven water-to-water heat pump with a desuperheater for low energy houses. *Applied Thermal Engineering*. 50:826-836.
- (7) Stene J. 2005. Residential CO2 heat pump system for combined space heating and hot water heating. *International Journal of Refrigeration*. 28:1259-1265.
- (8) Klein SA, Alvarado FL. *EES-Engineering Equation Solver. Academic Professional Version 10.091. F-Chart Software*, Madison, WI., 2017.
- (9) Lemmon E, Huber M, Mc Linden M. NIST Standard Reference Database 23:Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-refprop. Version 9.0, Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, 2010.
- (10) Hasan AA, Goswami DY, Vijayaraghavan S. 2002. First and second law analysis of a new power and refrigeration thermodynamic cycle using a solar heat source. *Solar Energy*. 73 (5):385-393.

## INFLUENCIA DE LA ABSORTIVIDAD DE LAS SUPERFICIES EXTERIORES Y LA TRANSMISIVIDAD DE LOS CRISTALES SOBRE EL CONSUMO ENERGÉTICO DEL SISTEMA A/C Y LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub> EN UN AUTOBÚS ELÉCTRICO

Vásconez-Núñez, Daniela C.<sup>1</sup>; Tello-Oquendo, Fernando M.<sup>1</sup>; Gonzálvez-Maciá, José.<sup>2</sup>

1. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
2. Instituto Universitario de Investigación en Ingeniería Energética (IUIIE), Universitat Politècnica de València, Camino de Vera, s/n, Valencia, España.  
Autor de correspondencia: [davas197@gmail.com](mailto:davas197@gmail.com)

### RESUMEN

La energía del sol contribuye en gran medida a la carga de refrigeración de un vehículo. La energía absorbida por las superficies del vehículo y la energía transmitida por las ventanas elevan la temperatura interior de la cabina de un vehículo. Estas ganancias térmicas provocan un impacto negativo en el confort térmico del conductor y de sus pasajeros, así como, en el uso intensivo de sistemas de aire acondicionado y, por lo tanto, el consumo de combustible. Este artículo presenta el estudio de la influencia de la absorptividad ( $\alpha_1 = 0.21$ ,  $\alpha_2=0.75$ ,  $\alpha_3=0.92$ ) de las superficies de la cabina y la transmisividad ( $\tau_1=0.81$ ,  $\tau_2=0.52$ ,  $\tau_3=0.34$ ) de los vidrios de un vehículo sobre el consumo del sistema A/C y las emisiones de CO<sub>2</sub> que este provoca al recorrer un trayecto entre dos ciudades. Para este estudio se utilizó una metodología para el cálculo del consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema A/C de vehículos cuando éstos recorren un trayecto determinado. La metodología se basa en un modelo que considera varios parámetros de entrada como la radiación solar, la temperatura ambiente, número de pasajeros, condiciones de ventilación de la cabina, la velocidad del vehículo que afectan directamente al consumo del sistema A/C. Los resultados muestran que al utilizar cristales reflectivos ( $\tau_3=0.34$ ) y superficies exteriores claras (blanco) en comparación con un cristal simple ( $\tau_1=0.81$ ), el consumo de energía del sistema A/C incrementa en 54% y las emisiones de CO<sub>2</sub> en 31.7 Kg.

Palabras clave: Sistema de climatización; consumo energético; emisiones de CO<sub>2</sub>; absorptividad; transmisividad.

### ABSTRACT

The solar energy contributes greatly to the cooling load of a vehicle. The energy absorbed by the vehicle surfaces and the energy transmitted through the windows raise the interior temperature of the vehicle cabin. These thermal gains cause a negative impact on the thermal comfort of the driver and his passengers, as well as the intensive use of air conditioning systems and, therefore, the fuel consumption. This paper presents the study of the influence of the absorptivity ( $\alpha_1 = 0.21$ ,  $\alpha_2 = 0.75$ ,  $\alpha_3 = 0.92$ ) of the cabin surfaces and the transmissivity ( $\tau_1 = 0.81$ ,  $\tau_2 = 0.52$ ,  $\tau_3 = 0.34$ ) of the glasses of a vehicle on the consumption of the A/C system and the CO<sub>2</sub> emissions that this causes when traveling a route between two cities. For this study a methodology was used to calculate the energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions of the A/C system of vehicles when they travel a certain journey. The methodology is based on a model that considers several input parameters such as solar radiation, ambient temperature, number of passengers, cabin ventilation conditions, vehicle speed that directly affect the consumption of the A/C system. The results show that using reflective crystals ( $\tau_3 = 0.34$ ) and clear exterior surfaces (white) compared to a simple crystal ( $\tau_1 = 0.81$ ), the A/C system energy consumption increases by 54% and the CO<sub>2</sub> emissions by 31.7 Kg.

Keywords: Air-conditioning system; energy consumption; CO<sub>2</sub> emissions; absorptivity; transmissivity.

## 1 INTRODUCCIÓN

El transporte es responsable del 24% de las emisiones directas de CO<sub>2</sub> por la combustión de combustible. Los vehículos de carretera (automóviles, camiones, autobuses y vehículos de dos y tres ruedas) representan casi las tres cuartas partes de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte [1], dicho consumo está en aumento debido al crecimiento económico y de la población [2].

La energía del sol contribuye en gran medida a la variación de la carga de refrigeración de un vehículo, la radiación solar tiene dos grandes impactos térmicos en un vehículo, el efecto de calentamiento directo a través de las ventanas y un efecto indirecto de la energía absorbida por las superficies exteriores, incluido el techo y las puertas. La energía que se transmite a la cabina también es absorbida y reflejada por todo lo que se encuentre en su interior, incluidos los tapizados, los materiales del tablero y los ocupantes. La energía absorbida por las superficies y transmitida por las ventanas del vehículo, incrementa la temperatura interior de la cabina, así como el consumo del sistema de aire acondicionado A/C.

El uso del sistema de aire acondicionado A/C reduce la autonomía de las baterías e incrementa las emisiones de CO<sub>2</sub> en un vehículo. El sistema A/C se considera la carga auxiliar principal de un vehículo cuando está funcionando[3], su principal función es satisfacer la demanda de refrigeración para mantener el interior de la cabina de un vehículo a una temperatura deseada. En general, los sistemas de A/C causan una disminución promedio del 30-40% en el rango de conducción, dependiendo del tamaño del sistema A/C y del ciclo de conducción de los EV ([4],[5]). Se han realizado varios estudios experimentales que demuestran que entre el 50% y el 75% de la energía térmica proviene de la energía solar, que se transmite por el acristalamiento y se absorbe por las superficies (paredes)[6]. Estudios realizados por Shete et al, [7] y Zhang et al [8] demostraron que la temperatura interior de un vehículo estacionado bajo la influencia de la radiación solar puede llegar a los 90°C. Así, como también, Waleed et al, [9] demostró que un vehículo estacionado en el exterior bajo la incidencia de la radiación solar, el flujo de calor que entra por las ventanas y superficies de la cabina incrementan la temperatura interior del aire hasta 80°C de media y Dadour [10] demostró que los niveles de temperatura en la cabina del vehículo pueden superar en 20 °C la temperatura ambiente exterior. Otros autores realizaron diferentes estudios sobre el impacto de la energía solar en la temperatura interior de la cabina y la demanda de refrigeración. Mezhart et al, [11] concluyó que: (i) para un automóvil estacionado frente al sol, la temperatura del aire y los materiales internos pueden alcanzar los 100 °C aproximadamente, (ii) utilizar acristalamiento reflectante y un color claro en las superficies del vehículo disminuye considerablemente la temperatura del aire interior de la cabina. Soulios et al. [12] mostró que el acristalamiento reflectante reduce la temperatura del aire de la cabina en 12.5 °C, además cuando se combina con superficies opacas reflectantes solares, la reducción de la temperatura del aire de la cabina puede alcanzar los 23.8 °C en un vehículo estacionado. Lenvinso et al. [13], comparó experimentalmente dos vehículos compactos (negro y plateado), comprobó que la capacidad de aire acondicionado requerida para enfriar el aire de la cabina en el automóvil plateado a 25 °C en 30 minutos es 13% menor que la requerida en el automóvil negro.

En los últimos años la tendencia en el estilo moderno de los automóviles es utilizar cada vez más grandes áreas de vidrio, debido a que áreas más grandes proporcionan mejor visión al conductor, sin embargo, aumentan la transmisión directa de la energía solar a través de los vidrios, incrementando la demanda térmica y el consumo energético del compresor. Este artículo presenta el estudio de la influencia de la absorptividad ( $\alpha_1 = 0.21$ ,  $\alpha_2=0.75$ ,  $\alpha_3=0.92$ ) de las superficies de la cabina y la transmisividad ( $\tau_1=0.81$ ,  $\tau_2=,0.52$ ,  $\tau_3= 0.34$ ) de los vidrios de un vehículo sobre el consumo del sistema A/C y las emisiones de CO<sub>2</sub> que este provoca al recorrer un trayecto entre dos ciudades. Para este estudio se utilizó una metodología para el cálculo del consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema A/C de vehículos cuando éstos recorren un trayecto determinado.

## 2 METODOLOGÍA

En este estudio se ha utilizado la metodología utilizada para el cálculo del consumo energético y las emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema A/C desarrollada por Vásconez D. et al [14]. La metodología, se divide en tres submodelos como se muestra en la Figura 1.

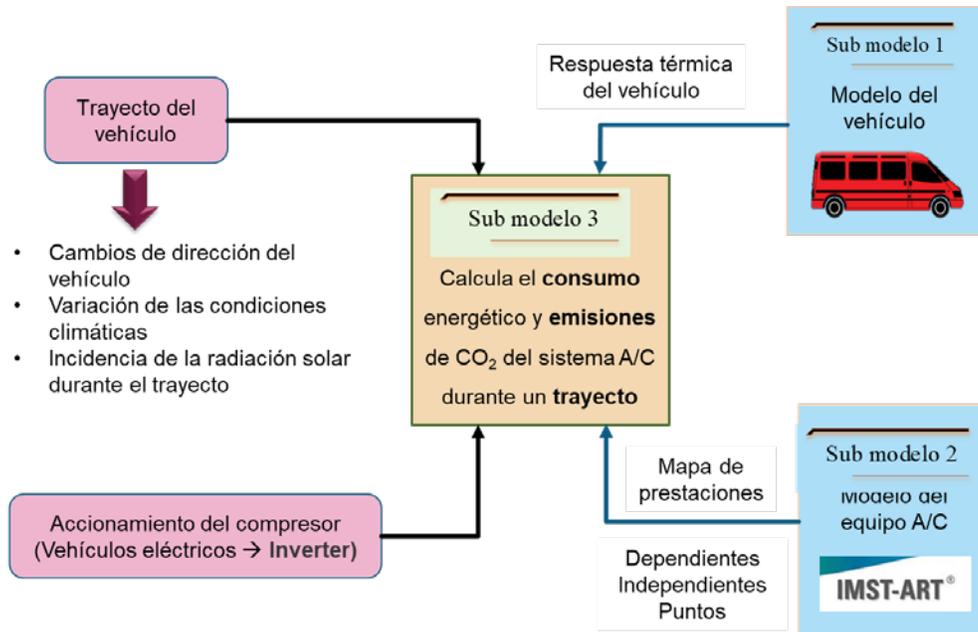


Figura 1. Esquema general del modelo de cálculo consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema A/C de vehículos.

Se definen los parámetros de entrada para el cálculo del consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema A/C de un vehículo, los cuales son:

- Características constructivas y geométricas del vehículo. Se define cada área de cada una de las superficies del vehículo, en este caso se ha dividido en seis superficies (opacas y transparentes) como se observa en la Figura 2.

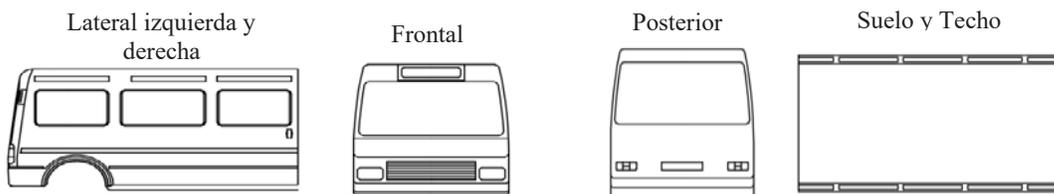


Figura 2. Superficies del vehículo

- Número de pasajeros (Carga por ocupación).
- Trayecto del vehículo: Es necesario definir el lugar geográfico en donde se desplaza el vehículo, es decir, la ciudad de inicio del trayecto, la ciudad de destino, así como el mes, día y hora de inicio del recorrido.

- Condiciones de confort térmico: La temperatura de confort puede variar entre 16 a 27 °C y una humedad relativa del 30-70% [15].

## 2.1 Submodelo 1

El Submodelo 1 corresponde al modelo térmico dinámico de la cabina de un vehículo desarrollado en Trnsys [16]. El modelo estima la variación de la temperatura interior de la cabina, al variar las condiciones climatológicas exteriores. Además, calcula la demanda de refrigeración para mantener el interior de la cabina a una temperatura seteada, el modelo considera:

- La variación de la temperatura ambiente exterior y la radiación solar que incide sobre las superficies a lo largo de un trayecto determinado. Para estimar la temperatura y la radiación solar que inciden sobre las superficies de la cabina del vehículo durante un trayecto, se utilizó un archivo de datos meteorológicos TMY2 (Typical Meteorological Year) de la ciudad de origen y de destino, se calculó la posición relativa del vehículo a lo largo del trayecto.
- Los cambios de dirección que el vehículo toma a lo largo del trayecto en función de los cambios de orientación de la carretera desde la ciudad de origen hasta la ciudad de destino. El modelo utiliza las coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) para determinar la dirección del vehículo y la posición relativa a lo largo del trayecto entre el lugar de origen y destino. Se han escogido las coordenadas UTM, que toma el vehículo cuando este tiene cambios significativos de dirección, de tal forma que se divide el trayecto en varios tramos de dirección constante. Las coordenadas UTM de los puntos de cambio de dirección del vehículo se introducen en el modelo para calcular la dirección ( $\alpha$ ) del vehículo, la distancia recorrida y el tiempo que tarda en recorrer cada tramo a una velocidad determinada.
- La posición relativa a lo largo del trayecto.

La demanda frigorífica se calcula mediante la Ecuación 1. En este caso, se debe a tres ganancias principales,  $\dot{Q}_{sup}$  que es la ganancia total por conducción, convección y radiación desde las superficies interiores y exteriores de la cabina del vehículo hacia el nodo interior, las ganancias por infiltraciones ( $\dot{Q}_{inf}$ ) y ganancias internas debido a los pasajeros que se encuentran en el interior de la cabina ( $\dot{Q}_{g,c,i}$ ). El modelo calcula la demanda frigorífica para cada instante de tiempo. La energía que debe satisfacer ( $Q_{c,d}$ ) el sistema al final del trayecto se calcula con la Ecuación (2), siendo  $t_i$  el tiempo de inicio del recorrido y  $t_f$  el tiempo final de recorrido.

$$\dot{Q}_{c,demanda} = \dot{Q}_{sup} + \dot{Q}_{inf} + \dot{Q}_{g,c,i} \quad (1)$$

$$Q_{c,d}(kWh) = \int_{t_i}^{t_f} \dot{Q}_{c,demanda} \quad (2)$$

## 2.2 Submodelo 2

El submodelo 2 consiste en un modelo del sistema de aire acondicionado desarrollado en el software IMST-ART [17]. Este software permite simular cualquier ciclo de compresión de vapor con diferentes refrigerantes, además, evalúa de manera precisa el rendimiento de los componentes del sistema de manera individual. El sistema consta de cuatro componentes, compresor, condensador, válvula de expansión y el evaporador.

El modelo proporciona los mapas de prestaciones del equipo a diferentes condiciones de trabajo (temperaturas, caudales y humedad de los focos frío y caliente, así como el régimen de giro del compresor) a diferentes rangos de operación.

### 2.3 Submodelo 3

Integra los mapas de prestaciones del equipo de aire acondicionado (generados por el submodelo 2) con el modelo térmico de la cabina. Este submodelo calcula la capacidad frigorífica, el consumo y el COP del sistema A/C para cada instante a lo largo del trayecto, con el compresor accionado eléctricamente (inverter), en el caso de vehículos eléctricos. El submodelo 3 primero calcula la velocidad a la que debe girar el compresor para satisfacer la demanda térmica. Conocida la velocidad del compresor, el modelo utiliza los parámetros de entrada provenientes del submodelo 1 (temperatura interior de la cabina, humedad relativa, temperatura ambiente) para calcular la capacidad de refrigeración, el COP del sistema y el consumo del compresor ( $\dot{E}$ ). El consumo energético a lo largo del trayecto se calcula con la Ecuación (3)

$$E(\text{kWh}) = \int_{t_i}^{t_f} \dot{E} \quad (3)$$

Un compresor con accionamiento eléctrico considera las pérdidas de energía en el inversor, el convertidor y las baterías, las cuales son cargadas por medio del equipo de suministro para vehículos eléctricos (ESVE). A partir del consumo energético del compresor, se calcula la energía eléctrica total consumida ( $E_{tot}$ ) mediante la Ecuación (4), donde  $\eta_{bat}$  es el rendimiento de la batería,  $\eta_{conv}$  es el rendimiento del convertidor y  $\eta_{inv}$  es el rendimiento del inversor.

$$E_{tot}(\text{kWh}) = \frac{E}{\eta_{ESVE} * \eta_{bat} * \eta_{conv} * \eta_{inv}} \quad (4)$$

En un vehículo eléctrico las emisiones de  $\text{CO}_2$  dependen de la cantidad de energía aportada por las energías renovables a la combinación de generación de electricidad en cada país (energía solar, eólica, hidráulica, cogeneración, etc.) y se calcula con la Ecuación (5). El factor de conversión para transformar los kWh a  $\text{CO}_2$  se utilizará el calculado por la Comisión nacional de los mercados y la competencia – España [18] cuyo valor es 0.43 kg de  $\text{CO}_2$  por cada kWh. Si la generación de electricidad es 100% renovable las emisiones de  $\text{CO}_2$  son cero

$$\text{CO}_2(\text{kg}) = \frac{E_{tot}(\text{kWh})}{\frac{\text{Kg de CO}_2}{\text{kWh}}} \quad (5)$$

Para analizar el funcionamiento del sistema se calcula el COP del recorrido, que se obtiene utilizando la Ecuación (6).

$$\overline{\text{COP}} = \frac{Q_{c,d}(\text{kWh})}{E(\text{kWh})} \quad (6)$$

### 3 RESULTADOS

En este estudio se analiza la variación del consumo del sistema A/C y las emisiones de CO<sub>2</sub> de un autobús a lo largo del trayecto Valencia – Madrid. Para ello, se afectará las características térmicas de la envolvente del vehículo, variando la absorptividad de las superficies exteriores y la transmisividad de los cristales del autobús, como se detalla en la tabla 1 y 2 respectivamente:

Tabla 1: Valores de absorptividad de las superficies de la carrocería

Color	Absortividad
Blanco lacado - $\alpha_1$	0.21
Gris claro - $\alpha_2$	0.75
Negro lacado - $\alpha_3$	0.92

Tabla 2: Valores de Transmisividad de los cristales

Color	T <sub>vis</sub>	T <sub>sol</sub>	U (W/m <sup>2</sup> k)
Simple - $\tau_1$	0.901	0.81	5.6
Reflectivo I - $\tau_2$	0.73	0.52	1.5
Reflectivo II - $\tau_3$	0.7	0.34	0.8

En el estudio se considera un autobús eléctrico de 50 pasajeros que realiza un trayecto Valencia – Madrid (ver Figura 3). En el submodelo 1 se introdujeron las características constructivas y de composición del autobús, tomando en cuenta las siguientes consideraciones:

- Trayecto: Valencia – Madrid
- Inicio de trayecto: 12h00
- Velocidad constante del autobús: 90 km
- Temperatura de confort: 22 °C
- No existe apertura de puertas durante el trayecto
- Carga por ocupación: 50 pasajeros

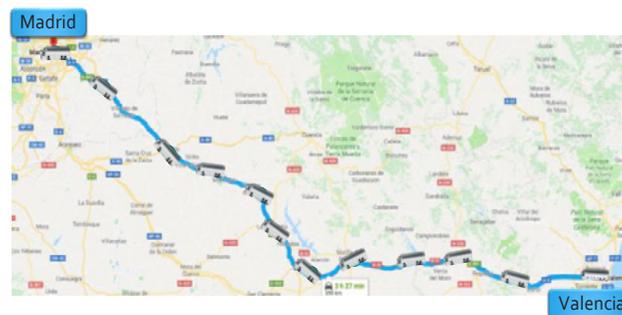


Figura 3. Recorrido Valencia - Madrid

En la Figura 4 se observa la variación de la temperatura y la radiación que inciden sobre el autobús en función de la posición relativa que éste toma durante el trayecto Valencia – Madrid. En este estudio se realizaron 9 simulaciones, variando cada valor de absorptividad de las superficies con cada valor de transmisividad de los cristales del autobús ( $\alpha_1$ -  $\tau_1$ ,  $\alpha_1$ -  $\tau_2$ ,  $\alpha_1$ -  $\tau_3$ ,  $\alpha_2$ -  $\tau_1$ ,  $\alpha_2$ -  $\tau_2$ ,  $\alpha_2$ -  $\tau_3$ ,  $\alpha_3$ -  $\tau_1$ ,  $\alpha_3$ -  $\tau_2$ ,  $\alpha_3$ -  $\tau_3$ ). En la Figura 4 se observa la variación de la demanda frigorífica, el consumo y la velocidad del compresor para mantener el interior de la cabina en 22 °C con cada caso de estudio.

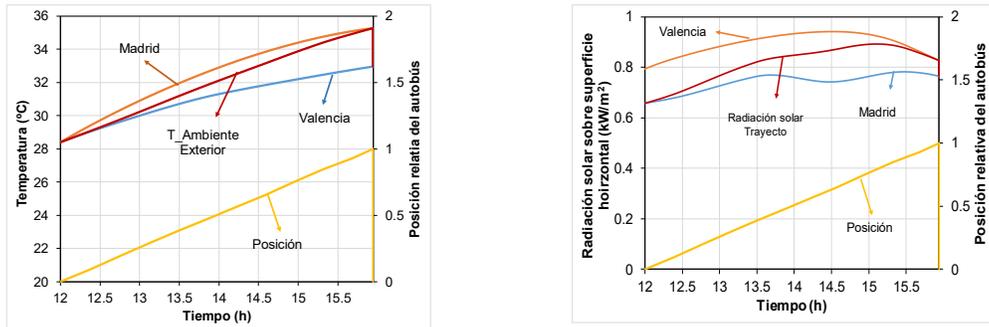


Figura 4. a) Variación de la temperatura ambiente durante el trayecto Valencia -Madrid. b) Variación de la radiación solar durante el trayecto Valencia -Madrid.

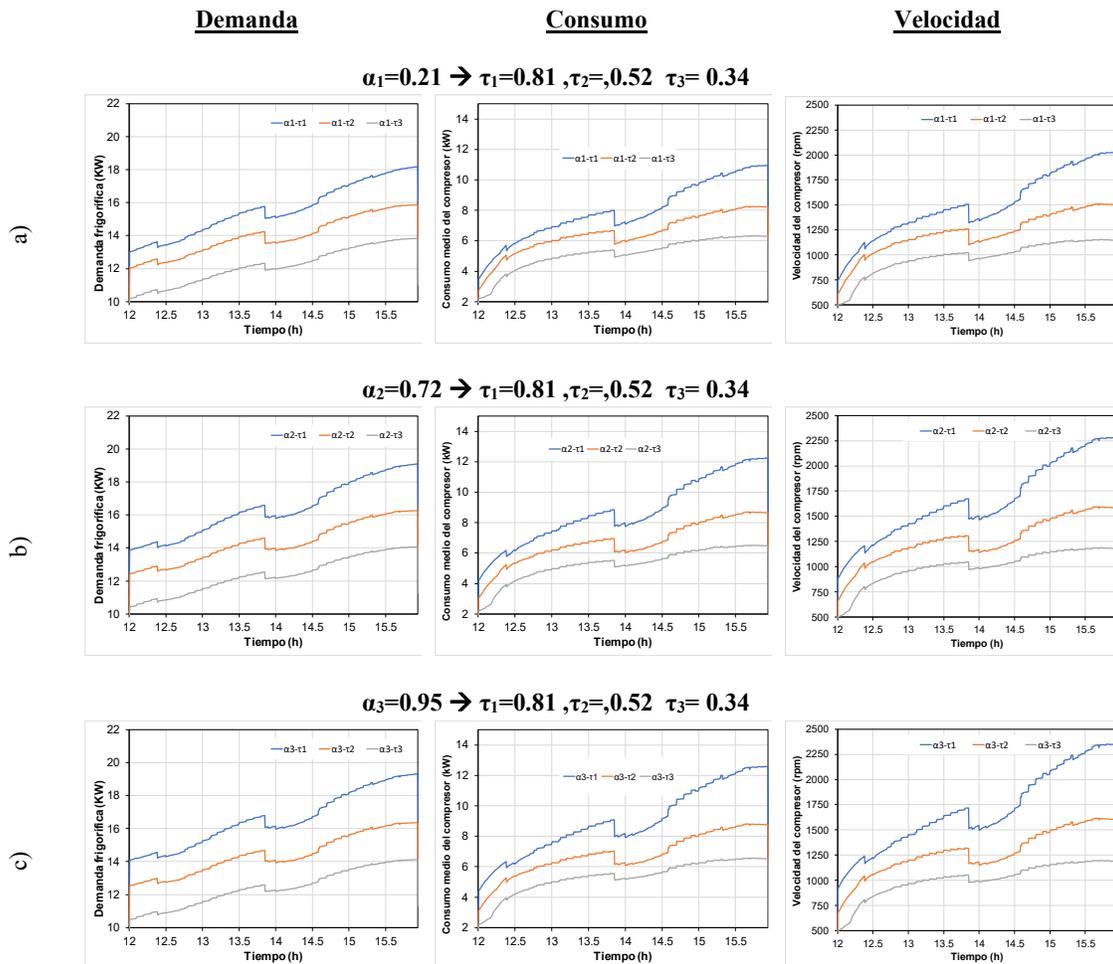


Figura 5. Influencia de la absorptividad de las superficies y la transmisividad de los cristales de un autobús en la demanda energética, consumo energético y velocidad del compresor, durante el trayecto Valencia -Madrid.

En la Figura 5 se observa la evolución de la demanda frigorífica, el consumo energético del sistema A/C y la velocidad a la que gira el compresor al incrementar el valor de la transmisividad de los cristales del autobús de 0.34 a 0.81 a lo largo del trayecto. Además, se observa que hay un incremento directamente proporcional con la demanda frigorífica y el consumo del sistema A/C al variar la absorptividad de las superficies exteriores al cambiar de un color blanco a negro.

Para mantener el interior del autobús en condiciones de confort térmico, el compresor debe girar a mayor velocidad a lo largo del trayecto, como se observa en la Figura 5. Esto sucede porque la demanda térmica incrementa debido a la variación de las condiciones ambientales exteriores (temperatura y radiación solar) a lo largo del trayecto (ver Figura 4). Por ejemplo, para  $\alpha_1=0.21$  y  $\tau_1=0.81$ , la velocidad del compresor varía desde 750 rpm, al inicio del trayecto, hasta 2000 rpm al final del trayecto.

Con respecto a la influencia de la transmisividad de los cristales del autobús, la demanda energética aumenta al incrementar la transmisividad de los cristales, en consecuencia, tanto la velocidad del compresor y el consumo energético del sistema A/C se ven incrementados. Por otro lado, con respecto a la influencia de la absorptividad de las superficies exteriores, tanto la demanda energética, como la velocidad del compresor y el consumo energético del sistema A/C también aumentan al incrementar la absorptividad.

La energía total consumida por el sistema A/C durante el trayecto Valencia - Madrid se calcula utilizando la ecuación (2), en donde se consideraron las eficiencias de cada uno de los componentes que conforman el tren de energía. Se consideró una eficiencia del inversor del 99% [19], del convertidor DC/DC del 98%, la del ESEV del 98% [20] y la batería con una eficiencia de 82% ([21], [22]).

La Tabla 3 muestra la energía que debe satisfacer sistema  $Q_{c,d}$ (kWh), la energía consumida por el compresor  $E$ (kWh), la energía total que se debe suministrar al vehículo para el funcionamiento del sistema A/C  $E_{tot}$ (kWh), los kg de CO<sub>2</sub> producidos por el sistema al recorrer el trayecto Valencia - Madrid. Además, se calculó un COP ponderado para observar el funcionamiento del sistema A/C.

Tabla 3: Parámetros de funcionamiento el sistema A/C durante el trayecto Valencia-Madrid

		$Q_{c,d}(kWh)$	$E(kWh)$	$E_{tot}(kWh)$	$CO_2(kg)$	SCOP
$\alpha_1=0.21$	$\tau_1=0.81$	61.5	31.3	38.7	89.9	1.97
	$\tau_2=0.52$	55.3	25.5	31.5	73.3	2.17
	$\tau_3=0.34$	48.0	20.2	25.0	58.2	2.38
$\alpha_2=0.75$	$\tau_1=0.81$	64.6	34.4	42.6	99.1	1.88
	$\tau_2=0.52$	56.6	26.5	32.7	76.1	2.14
	$\tau_3=0.34$	48.8	20.7	25.7	59.7	2.35
$\alpha_3=0.92$	$\tau_1=0.81$	65.4	35.3	43.6	101.5	1.85
	$\tau_2=0.52$	56.9	26.7	33.1	76.9	2.13
	$\tau_3=0.34$	49.0	20.9	25.8	60.0	2.34

La Tabla 3 muestra que la mejor combinación de propiedades térmicas de las superficies del vehículo y de los cristales, para obtener un menor consumo energético y emisiones de CO<sub>2</sub>, es con una absorptividad de  $\alpha_1=0.21$  y una transmisividad de  $\tau_3=0.34$ , obteniendo un consumo energético total de 25 kWh y 58.2 Kg de CO<sub>2</sub>. Estos resultados se obtienen con un autobús blanco ( $\alpha_1=0.21$ ) que utiliza cristales reflectivos ( $\tau_3=0.34$ ). Tomando como base estas condiciones, se compara con un autobús que utiliza cristales simples ( $\tau_1=0.81$ ), resultando en un incremento del consumo energético del 54% y un incremento de 31.7 Kg de CO<sub>2</sub>. Por otro lado, se compara con un autobús de color negro ( $\alpha_3=0.92$ ), resultando en un incremento del consumo energético del 2% y un incremento de 1.8 Kg de CO<sub>2</sub>, esto se debe a que las superficies de color claro reflejan más luz solar que las superficies de color oscuro. Estos resultados muestran que la transmisividad de los cristales es más influyente que la absorptividad de las superficies (color) en el incremento del consumo energético del sistema A/C y las emisiones de CO<sub>2</sub>.

Además, la Tabla 3 muestra que el equipo A/C presenta un mejor funcionamiento con una absorptividad de  $\alpha_1=0.21$  y una transmisividad de  $\tau_3=0.34$  al obtener un SCOP de 2.38. Todos estos resultados se ilustran en la Figura 6.

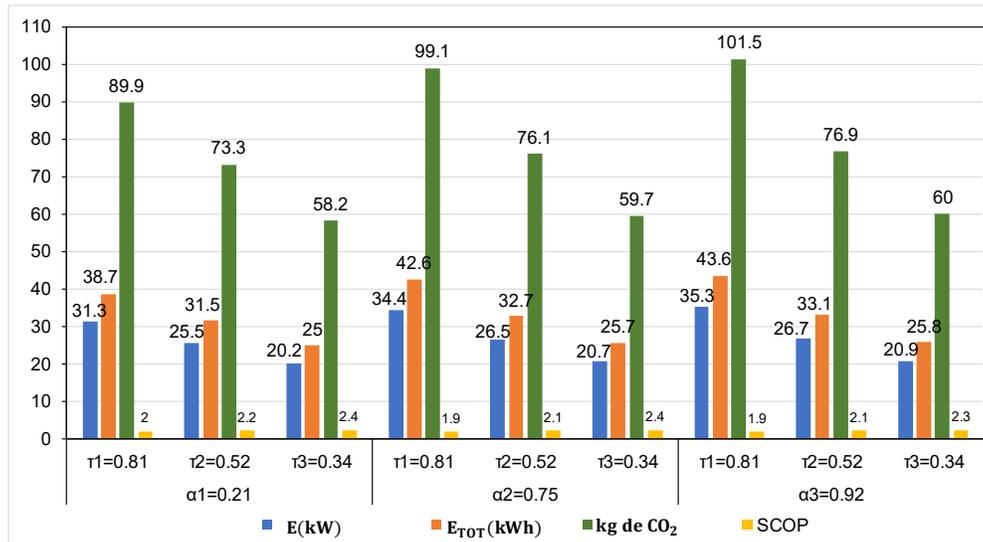


Figura 6. Energía consumida, las emisiones producidas, el coeficiente de funcionamiento COP por el sistema A/C

#### 4 CONCLUSIONES

Este artículo presenta el efecto de la absorptividad de las superficies y la transmisividad de los cristales sobre el consumo energético del sistema A/C y las emisiones de  $CO_2$  de un autobús de 52 pasajeros durante el trayecto Valencia-Madrid. Del estudio se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las superficies del autobús de color claro reflejan más radiación solar que las superficies de color oscuro. Las superficies exteriores del autobús absorben la energía solar, y por medio de un proceso de conducción calientan las superficies internas. Éstas alcanzan una cierta temperatura y por medio de convección y radiación calientan el aire interior de la cabina del autobús.
- La mejor combinación de propiedades térmicas en las superficies del vehículo y en los cristales es con una absorptividad de  $\alpha_1=0.21$  y una transmisividad de  $\tau_3=0.34$ . En un autobús blanco ( $\alpha_1=0.21$ ), al utilizar cristales reflectivos ( $\tau_3=0.34$ ) en comparación con un cristal simple ( $\tau_1=0.81$ ), hay un incremento del consumo energético del 54% y un incremento de 31.7 Kg de  $CO_2$ .
- La transmisividad de los cristales del autobús es más influyente que la absorptividad de las superficies del autobús en el incremento del consumo energético del sistema A/C y las emisiones de  $CO_2$ . Para una absorptividad de 0,92 con una transmisividad de  $\tau=0.34$ , el consumo total del sistema A/C varía en un 2%.
- Utilizar un color claro en las superficies exteriores del autobús, vidrios reflectantes reduce el consumo energético del sistema A/C, mejora la autonomía de las baterías y reduce las emisiones de  $CO_2$ .

## AGRADECIMIENTOS

Daniela C. Vásconez-Núñez y Fernando M. Tello-Oquendo agradecen el apoyo financiero brindado por el programa CONVOCATORIA ABIERTA 2013-SEGUNDA FASE, otorgado por la SENESCYT de Ecuador (Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación) (Asignaciones No 2015-AR37665 y 2014-AR3R7463).

## 5 REFERENCIAS

- (1) IEA, International Energy Agency, *Global CO2 emissions by sector, 2016*. (Online). Available: <https://www.iea.org/statistics/co2emissions/>.
- (2) Huang Y, Surawski NC, Organ B, Zhou JL., Tang OHH, Chan FC. 2019. Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles. *Sci. Total Environ.* 659:275–282.
- (3) Khayyam H, Kouzani A Z, Hu EJ, Nahavandi S. 2011. Coordinated energy management of vehicle air conditioning system. *MNF 2009 Spec.* 31:750–764
- (4) Lee J T, Kwon SK, Lim YS, Chon MS, Kim DS. 2013. Effect of Air-Conditioning on Driving Range of Electric Vehicle for Various Driving Modes. *SAE Tech. Pap-01–00*, 2013.
- (5) Farrington R, Barber G, Hendricks T, Marion W, Markel T, McGuffin R, Rugh J. 2001. Integrated Modeling to Predict Occupant Thermal Comfort, in *American Trucking Association Conference*
- (6) Rugh JP, Hendricks T, Koram K. Effect of Solar Reflective Glazing on Ford Explorer Climate Control, Fuel Economy, and Emissions. 2010. *SAE Tech.* 1: 724
- (7) Shete K. 2015. Influence of Automotive Air Conditioning load on Fuel Economy of IC Engine Vehicles. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 6:8 1367–1372.
- (8) Zhang W, Liu J. 2016. Investigation on the Temporal Surface Thermal Conditions for Thermal Comfort Researches Inside A Vehicle Cabin Under Summer Season Climate. 4:1:10.
- (9) ABD-FADEEL W, ALI HASSANEIN S. 2013. Temperature variations , inside a parked car in hot and dry climates. *International Journal of Automobile Engineering.* 3:1:75-80.
- (10) Dadour IR, Almanjahie I, Fowkes ND, Keady G, and Vijayan K. 2011. Temperature variations in a parked vehicle. *Forensic Sci. Int.*, 207: 1:3: 205–211.
- (11) Mezrhab A, Bouzidi M. 2006. Computation of thermal comfort inside a passenger car compartment. *Appl. Therm. Eng.* 26:14:15:1697:1704.
- (12) Soulios V, Loonen RCGM, Metavitsiadis V, Hensen JLM. 2018. Computational performance analysis of overheating mitigation measures in parked vehicles. *Appl. Energy.* 231:635–644.
- (13) Levinson R, Pan H, Ban-Weiss G, Rosado P, Paolini R, Akbari H. Potential benefits of solar reflective car shells: Cooler cabins, fuel savings and emission reductions. *Appl. Energy.* 88 :12: 4343:4357.
- (14) Daniela C. Vásconez-Núñez. 2019. Desarrollo de un modelo para el cálculo del consumo de climatización en vehículos de pasajeros urbanos, Universitat Politècnica de València,
- (15) R. De Dear, G. Brager, and D. Cooper, ASHRAE RP- 884 Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference, *Ashrae*, no. March, 1997.
- (16) TRNSYS v. 16.1 A Transient System Simulation Program (2007). Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin.
- (17) IMST-ART.2010 Simulation Tool to Assist the Selection, Design and Optimization of Refrigeration Equipment and Components. Instituto de Ingeniería Energética, Universitat Politècnica de València, Valencia. Online: <http://www.imst-art.com>.
- (18) CNMC. (2017). Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia, Acuerdo sobre los resultados del sistema de garantía de origen y etiquetado de la electricidad relativos a la energía producida en el año 2017. España
- (19) Sun P, Lai JS, Qian H, *et al.* 2010. Efficiency evaluation of a 55kW soft-switching module based

- inverter for high temperature hybrid electric vehicle drives application. 2010. *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC*. 474–479.
- (20) Karlsson D, Kushnir S. (2013). Systems Perspectives on Electromobility, in *How energy efficient is electrified transport?.*, Bruselas. 45:59.
- (21) Tie S. F, Tan CW. 2012. A review of power and energy management strategies in electric vehicles, *ICIAS 2012. 4th Int. Conf. Intell. Adv. Syst. A Conf. World Eng. Sci. Technol. Congr. - Conf. Proc.* 1: 412–417.
- (22) Campanari S, Manzolini G, Garcia de la Iglesia F. 2009. Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations, *J. Power Sources*. 186:2:464–477.

## **COMPORTAMIENTO DE LA CONDUCTIVIDAD TERMICA Y RESISTENCIA MECÁNICA DEL MORTERO ADICIONADO FIBRAS VEGETALES DE CABUYA.**

Ordoñez, Marco <sup>1</sup>; Pozo, Edwin <sup>2</sup>; Aquino, Miguel <sup>3</sup>

1. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
2. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
3. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politecnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

...

Autor de correspondencia: marco.ordonez@esPOCH.edu.ec

### **RESUMEN**

El estudio analiza la influencia sobre las propiedades mecánicas y térmicas de los morteros de cemento al agregar fibras de filamento negra.

En representación de normas de construcción utilizadas en Ecuador, se determinó la combinación correcta para la matriz cementicia, que se necesitará de referencia al momento de sumar las distintas concentraciones de fibra.

Los tamaños para las fibras se consideraron de 15mm y la distribución querida interiormente de la matriz cementicia fue de segmento aleatoria. Para las distintas configuraciones se agregaron cuatro fracciones volumétricas nominales de filamento: 0.25; 0.50; 0.75; y 1.0 %. Los especímenes fabricados fueron sometidos a ensayos de conductividad térmica, resistencia a flexión y compresión. Los resultados obtenidos mostraron que el mortero reforzado con una porción volumétrica de filamento de fibra de 0.50 % exhibió la fluidez precisa de un utillaje apto para recubrimientos, limitando así la cantidad adecuada para que puede adherirse al material. Como resultado se determina que la resistencia a la compresión y a la flexión del material compuesto es mayor con respecto a la matriz cementicia 9% y 11% precisamente, se determina asimismo que la conductividad térmica en comparación con la matriz cementicia mejoraron 13 y 18 % respectivamente. Palabras clave: Conductividad térmica, Mortero, Fibras.

### **ABSTRACT**

The study analyses the influence on the mechanical and thermal properties of cement mortars by adding black filament fibers.

On behalf of construction standards used in Ecuador, the correct combination for the cement matrix was determined, which will be required as a reference at the time of adding up the different concentrations of fiber.

The sizes for the fibers were considered 15mm and the desired distribution inside the cement matrix was random segment. For the different configurations four nominal volumetric fractions of filament were added: 0.25; 0.50; 0.75; 1.0%. Manufactured specimens were tested for thermal conductivity, bending resistance and compression. The results showed that the mortar reinforced with a volumetric part of 0.50% fiber filament exhibited the precise fluidity of a coating-friendly tooling, thus limiting the appropriate amount for which it can adhere to the material. As a result, it is determined that the compression and bending resistance of the composite material is higher than the cement matrix 9% and 11% precisely, it is also determined that the thermal conductivity compared to the cement matrix improved 13 and 18 % respectively. Keywords: Thermal Conductivity, Mortar, Fibers.

Keywords: Thermal conductivity, Mortar, Fibers.

## 1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la utilización de fibras fue para reforzar materiales (Vidaud, 2015), la paja se usaba como refuerzo en los adobes de arcilla para reducir la tensión por el secado y controlar el agrietamiento (Gutiérrez Jiménez, Oteiza San José, Monjo Carrió, & Rey González, 2008). En la era moderna el asbesto comenzó a ser utilizado con mayor frecuencia en muchos países. La construcción usó a gran escala las fibras minerales de asbesto en una matriz de cemento (Mari, 1990). Sin embargo, debido a la detección de algunos daños a la salud como la asbestosis al fabricar productos de asbesto-cemento, su aplicación se redujo considerablemente. Por esta razón, se buscó sustituir el asbesto por fibras de otros materiales no nocivos para la salud, los cuales resultaron ser una alternativa viable (Akers & Studinka, 1989).

Con anterioridad se han realizado estudios en México, Singapur y Brasil utilizando fibras vegetales bajo condiciones regulares, existen también estudios donde se analiza el deterioro del concreto con fibras vegetales expuesto a medios alcalinos y a ciclos de humedecimiento y secado (“FEA,” n.d.; Paramasivam, Nathan, & Das Gupta, 1984; Ramakrishna, Sundararajan, & Kothandaraman, 2010)

En Ecuador la producción de cerámicas para revestimientos cumple con las normas establecidas, aunque los métodos de producción son réplicas de productos y estándares extranjeros, de tal manera que no ha existido algún tipo de investigación en el área específica sobre fibras de cabuya; sin embargo existen estudios referenciales que indican la inclusión de materiales como plástico, determinándose su viabilidad financiera y ambiental (Aguirre, 2013) Se han estudiado características con diferentes configuraciones de materiales compuestos con la fibra de cabuya como material disperso con los diferentes diámetros de fibras existentes en el medio, aprovechando sus características de resistencia y durabilidad, instituciones tales como la ACI, ASTM, de origen Americano, han desarrollado programas de investigación en sus respectivos países empleando en todos los casos, materia prima propia de sus regiones. Lo cual hace que aquellas normas internacionales para el diseño de concretos y morteros reforzados o no reforzados no se apliquen para materiales propios dentro del país (Dávila et al., 2011).

Como potenciales fuentes de materia prima, el estudio se enfoca hacia las fibras vegetales de la cabuya, debido a que son especies propagadas en gran escala en la provincia de Chimborazo, y que no han sido utilizadas para ningún proceso que les agreguen valor para su adecuado consumo en la industria de la construcción; de tal manera que es necesario por medio del presente estudio, realizar la caracterización de estas especies, con el fin de integrarlas como materias primas, y así determinar su impacto en el sector de la construcción y a nivel social y económico.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Materiales

Se emplearon como refuerzo fibra de cabuya negra, adquiridas en la localidad, las muestras se obtuvieron a partir de los bultos.

Como matriz del material compuesto se empleó mortero de cemento compuesto de arena proveniente de cantera y de cemento HIDRAULICO tipo PORTLAND.

### 2.2 Métodos

La investigación expuesta es de tipo exploratoria, debido a que el tema estudiado acerca de un material compuesto con fibras naturales a base de fibras de cabuya, ha sido poco analizado en el país, pero con el sustento técnico de los ensayos que se realizaron se logró determinar la influencia que tiene sobre las propiedades mecánicas (Borri & Bucci, 2013; Con &

Colectividad, 2015; De, De Sistemas, Fernando, Arteaga, & Armendariz, 2008; Gutiérrez Jiménez et al., 2008; Las et al., 2014; Velasco Roldán, Goyos Pérez, Delgado García, & Amores, 2016).

### 2.2.1 Dosificación del mortero.

Las dosis de material para la preparación del mortero vienen especificadas en base a la Norma (INEN 488,2009).

### 2.2.2 Elaboración de las probetas de material compuesto.

Al no disponer de datos previos sobre la mezcla de fibras de cabuya y morteros de cemento en los cuales basarse, se realiza un barrido preliminar de proporciones cemento/arena manteniendo constante las proporciones de los componentes de la matriz cementicia y se varía la concentración de las fibras de cabuya. Esta exploración sirve para determinar la trabajabilidad de la muestra.

Posterior al análisis de las experiencias más cercanas con fibras vegetales como refuerzo de materiales constructivos, se puede observar que existe un espectro muy amplio de porcentajes de refuerzo que van desde el 0,5 % al 16 % inclusive varios ensayos coinciden en que el uso de fibras en una proporción de 0.5 % en peso es la más adecuada, tanto para tensión como para compresión, independientemente de la edad de la probeta a la hora de hacer el ensayo.

### 2.2.3 Ensayo de fluidez en morteros.

Por medio de este ensayo se determina si el contenido de agua que se encuentra en la mezcla es suficiente para proporcionar fluidez en el mortero, para esto se utilizó la Norma (INEN 2502,2009) y se emplea la relación mostrada en la Ecuación 1.

$$Flujo = \frac{(\emptyset prom - \emptyset base)}{\emptyset base} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

*Flujo*: Fluidez del mortero [%].

$\emptyset prom$  : Diámetro de la muestra saturada [cm].

$\emptyset base$  : Diámetro de la base [cm].

### 2.2.4 Resistencia a flexión y compresión de morteros

Se estudiará la resistencia de las probetas tanto a flexión como a compresión bajo la Norma (INEN 198,2009), estableciendo los métodos para determinar la resistencia a flexión y a la compresión de morteros de cemento hidráulico.

## 2.3 Flexión

Consiste en aplicar una carga con una velocidad de 5 kPa/s en el centro de la probeta que se coloca de forma biapoyada con una luz de 100 mm. La resistencia a flexión se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$R_f = \frac{6M}{b^3} = 1,5 \frac{P_f}{b^3} \quad (2)$$

Donde:

$R_f$  : Resistencia a la flexión [MPa].

$M$  : Momento flector (módulo de rotura) [Nmm].

$b$  : Arista de la sección cuadrada del prisma [mm].

$P_f$  : Carga a la rotura a la flexión [N].

$l$  : Distancia entre los apoyos [mm].

Como  $l = 100\text{mm}$  y  $b = 40\text{mm}$  la ecuación anterior se simplifica a:

$$R_f = 0,0023437P_f \quad (3)$$

## 2.4 Compresión

En el ensayo de compresión se utiliza la máquina universal con una velocidad de carga de 240 kPa/s sobre una superficie de 4 x 4 cm<sup>2</sup> correspondiente a uno de los lados de las probetas resultantes de la rotura del ensayo de flexión. La resistencia a la compresión se determina por medio de la siguiente ecuación:

$$R_c = \frac{P_c}{b^2} \quad (4)$$

Donde:

$R_c$  : Resistencia a la compresión [MPa].

$P_c$  : Carga de rotura a la compresión [N].

$b$  : Arista de la sección cuadrada del prisma [mm].

Como  $b = 40\text{mm}$  la ecuación anterior se simplifica a:

$$R_f = 0,0023437P_f \quad (5)$$

## 2.5 Conductividad térmica.

la conductividad se ejecuta según lo indicado en la norma (ASTM: C177, 1992), se prepararon diez muestras de mortero con las concentraciones de fibra de cabuya indicadas en la tabla, las dimensiones de los especímenes deben ser de 300 mm x 300 mm x 50 mm. La conductividad térmica se denota por la siguiente expresión:

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) \quad (6)$$

Donde:

$\frac{\Delta Q}{\Delta t}$  : Calor transmitido por unidad de tiempo.

$k(\lambda)$  : Conductividad térmica

$A$ : Área de la superficie de contacto.

$(T_1 - T_2)$ : Diferencia de temperatura entre el foco caliente y el foco frío.

$\Delta x$ : Espesor del material.

## 3. RESULTADOS

### 3.1 Dosificación del mortero.

Para la dosificación del mortero para esta investigación se determina la combinación óptima a partir del ensayo de fluidez siendo la indicada la dosis 2 de la **Tabla 1**, misma que sirve como base para la elaboración del material compuesto.

**Tabla 1.** Dosificación del mortero.

	Cemento	Arena	Relación A/c
<b>Dosis 1</b>	1	2,75	0,485
<b>Dosis 2</b>	1	2	0,65

### 3.2 Elaboración de las probetas de material compuesto.

Las muestras se construyeron en seis moldes prismáticos en acero con dimensiones 40 x 40 x 160 mm a los cuales se les aplicó un agente desencofrante a los moldes para facilitar el

desprendimiento cuando se encuentren endurecidos. Una vez elaborada las mezclas de mortero con las dosificaciones mencionadas en la Tabla 1, se llenan los moldes en dos capas, cada capa se compactada 32 veces en 4 rondas y en cada ronda se compacta con 8 golpes en dirección perpendicular a la anterior. Se deben completar 4 rondas de apisonado del mortero en un prisma antes de pasar al siguiente.

### 3.3 Ensayo de fluidez en morteros

La fluidez del mortero endurecido a los 28 días se determina en la Tabla 2, donde la muestra M3 presenta el flujo en el rango permisible del mortero para revestimientos.

**Tabla 2.** Fluidez de materiales compuestos de mortero - cemento en función de la fracción volumétrica de fibra de 28 días de curado.

DETERMINACIÓN FLUIDEZ (FLUJO)				
$(\phi_{prom}-\phi_{base}) * 100 / \phi_{base}$				
MUESTRA	AGUA (g.)	$\phi$ (mortero) (cm.)	$\phi$ (base) (cm.)	FLUJO (%)
M1	325	21,7	10	116,5
		21,6	10	
		21,7	10	
		21,6	10	
		20,6	10	
M2	325	20,2	10	103
		20,2	10	
		20,2	10	
		19,8	10	
		19,3	10	
M3	325	19,7	10	96,5
		19,8	10	
		18	10	
		18,3	10	
		18,1	10	
M4	325	18,2	10	81,5
		17,2	10	
		17	10	
		16,9	10	
		16,8	10	
M5	325	17	10	69,75
		16,9	10	
		16,8	10	
		16,8	10	
		16,8	10	

### 3.4 Resistencia a flexión y compresión de morteros

#### 3.4.1 Flexión

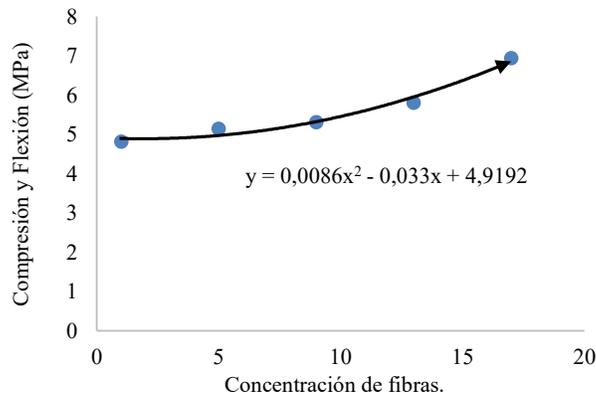
Se incrementó respecto al de la matriz cementicia para todos los materiales compuestos de mortero - cabuya, como se muestra en la Figura. 1. Para los materiales fabricados con fibra de cabuya de 15 mm en todas las fracciones volumétricas analizadas, el módulo a la flexión sufrió un incremento comprendido entre el 6 y 16%.

**Tabla 3.** Flexión de materiales compuestos de mortero - cemento en función de la fracción volumétrica de fibra de 28 días de curado.

FLEXIÓN 28D SECO			
	KN	TON	Rf Mpa
M1	2,1070	0,2149	0,2094
			4,8128

	2,4110	0,2459		
	2,5610	0,2612		
	2,0000	0,2039		
	2,2210	0,2265		
M2	2,3130	0,2359	0,2236	5,1386
	1,9460	0,1984		
	2,1640	0,2207		
	2,5310	0,2581		
M3	2,6160	0,2668	0,2310	5,3097
	2,0510	0,2091		
	2,0000	0,2039		
	2,5370	0,2587		
M4	2,4230	0,2471	0,2523	5,7995
	2,6130	0,2665		
	2,4120	0,2460		
	2,9170	0,2975		
M5	3,2900	0,3355	0,3017	6,9339
	2,8590	0,2915		
	3,0000	0,3059		

**Figura. 1** Flexión de materiales compuestos de mortero - cemento en función de la fracción volumétrica de fibra de 28 días de curado.



Los resultados del ensayo de flexión permitieron verificar el aumento en la rigidez de los materiales compuestos obtenidos en relación a la matriz cementicia, apreciando la marcada influencia de la fibra en estas propiedades mecánicas.

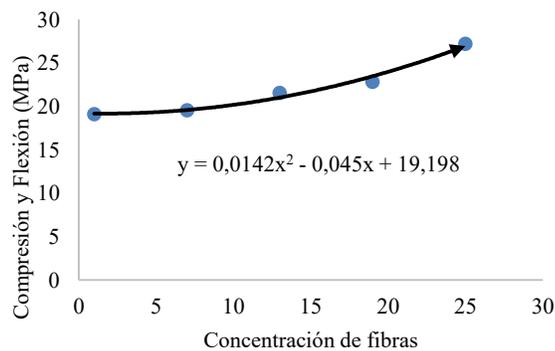
### 3.4.2 Compresión

Los resultados del ensayo a compresión se incrementó respecto al de la matriz cementicia para todos los materiales compuestos de mortero - cabuya, como se muestra en la Figura. 2**Figura. 1**. Para los materiales fabricados con fibra de cabuya de 15 mm en todas las fracciones volumétricas analizadas, la compresión sufrió un incremento comprendido entre el 2 y 29%.

**Tabla 4.** Compresión de materiales compuestos de mortero - cemento en función de la fracción volumétrica de fibra de 28 días de curado.

COMPRESION 28D SECO				
	TON	KN	Rc Mpa	
	3,1090	30,4888		
	3,1210	30,6064		
M1	2,8580	28,0273	3,1155	19,0954
	3,0040	29,4591		
	3,0230	29,6454		
	3,1220	30,6162		
	3,2250	31,6263		
	3,0890	30,2926		
M2	3,1210	30,6064	3,1900	19,5520
	3,1370	30,7633		
	3,1680	31,0674		
	3,1550	30,9399		
	3,5650	34,9606		
	3,0720	30,1259		
M3	3,6640	35,9314	3,5115	21,5225
	3,2950	32,3128		
	3,5610	34,9214		
	3,4580	33,9113		
	3,7910	37,1769		
	3,7100	36,3825		
M4	3,2950	32,3128	3,7215	22,8097
	3,8210	37,4711		
	3,6540	35,8334		
	3,6520	35,8138		
	4,51	44,21		
	4,27	41,83		
M5	4,43	43,46	4,44	27,18
	4,26	41,82		
	4,37	42,83		
	4,36	42,78		

**Figura. 2** Compresión de materiales compuestos de mortero - cemento en función de la fracción volumétrica de fibra de 28 días de curado.



Los resultados del ensayo de compresión permitieron verificar el aumento en la rigidez de los materiales compuestos obtenidos en relación a la matriz cementicia, pudiéndose apreciar la marcada influencia de la fibra en estas propiedades mecánicas.

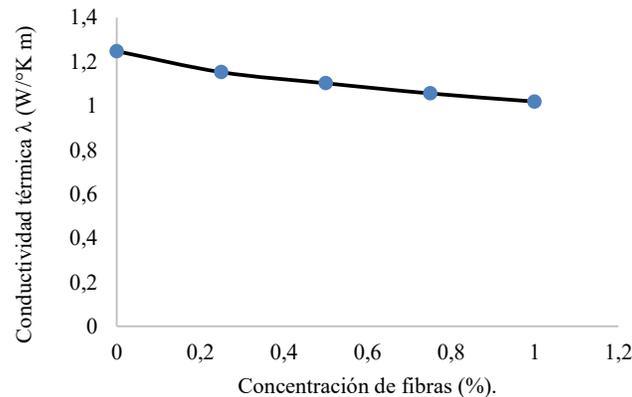
### 3.5 Conductividad térmica.

Incrementó respecto al de la matriz cementicia para todos los materiales compuestos de mortero - cabuya, como se muestra en la Figura. 3. Para los materiales fabricados con fibra de cabuya de 15 mm en todas las fracciones volumétricas analizadas, el módulo a la flexión sufrió un incremento comprendido entre el 8 y 22%.

**Tabla 5.** Conductividad térmica de materiales compuestos de mortero - cemento en función de la fracción volumétrica de fibra de 28 días de curado.

CONCENTRACIÓN	$\lambda$ (W/°K m)
0	1,247
0,25	1,152
0,5	1,102
0,75	1,056
1	1,019

**Figura. 3** Conductividad térmica de materiales compuestos de mortero - cemento en función de la fracción volumétrica de fibra de 28 días de curado.



Los resultados del ensayo de conductividad térmica de los materiales compuestos obtenidos en relación a la matriz cementicia, pudiéndose apreciar la marcada influencia de la fibra en estas propiedades térmicas.

## 4. CONCLUSIONES

La concentración de fibra aceptable para la matriz cementicia fue de 0,50 %, desde el punto de vista de la fluidez al agregar una cantidad mayor de fibra disminuye el flujo y la mezcla no sería manejable.

La dosificación óptima para fabricar la matriz cementicia de mortero es 1:2 con una relación de agua/cemento de 0.65, obteniendo una resistencia a los 28 días de 31,9 kN.

El esfuerzo máximo a la compresión y flexión, incrementaron 9 y 11% para los materiales compuestos reforzados con fibra corta de cabuya con respecto a las correspondientes propiedades de la matriz cementicia.

La conductividad térmica, disminuyó el 13% para los materiales compuestos reforzados con fibra corta de cabuya con respecto a las correspondientes propiedades de la matriz cementicia, disminuyendo así la conducción del calor.

## 5. REFERENCIAS

Aguirre, D. F. (2013). El plástico reciclado como elemento constructor de la vivienda, 3–127. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/520/1/TESIS.pdf>

Akers, S. A. S., & Studinka, J. B. (1989). Ageing behaviour of cellulose fibre cement composites in natural weathering and accelerated tests. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 11(2), 93–97. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(89\)90119-X](https://doi.org/10.1016/0262-5075(89)90119-X)

Borri, A., & Bucci, V. Pietro. (2013). University of Calabria Address, 2011–2013. Con, V., & Colectividad, L. A. (2015). Vicerrectorado De Investigación. Retrieved from <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12213/1/T-ESPEL-MAS-0024.pdf>

Dávila, J., Galeas, S., Guerrero, V., Pontón, P., Rosas, N., Sotomayor, V., & Valdivieso, C. (2011). *Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales E Industriales*.

De, F., De Sistemas, I., Fernando, L., Arteaga, A., & Armendariz, I. X. (2008). Escuela Politécnica Nacional. Retrieved from <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/727/1/CD-1669%282008-09-15-11-00-15%29.pdf>

FEA. (n.d.), (4).

Gutiérrez Jiménez, J. P., Oteiza San José, I., Monjo Carrió, J., & Rey González, J. R. (2008). Estudio del comportamiento mecánico de los muros no portantes de fábrica de ladrillo, en fachadas. In *II Jornadas de Investigación en Construcción (Instituto de Ciencias de la Construcción “Eduardo Torroja”* (pp. 1315–1324). Retrieved from <http://hdl.handle.net/10261/6296>

LMari, E. A. (1990). Situación actual y perspectivas del uso de fibras de vidrio para el refuerzo de materiales cementicios, 29, 331–337.

Paramasivam, P., Nathan, G. K., & Das Gupta, N. C. (1984). Coconut fibre reinforced corrugated slabs. *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 6(1), 19–27. [https://doi.org/10.1016/0262-5075\(84\)90056-3](https://doi.org/10.1016/0262-5075(84)90056-3)

Ramakrishna, G., Sundararajan, T., & Kothandaraman, S. (2010). Evaluation of Durability of Natural Fibre Reinforced Cement Mortar Composite- a New Approach, 5(6), 44–51.

Velasco Roldán, L., Goyos Pérez, L., Delgado García, R., & Amores, L. F. (2016). Instalación para medición de conductividad térmica en composites basados en residuos de biomasa. *Enfoque UTE*, 7(2), 69–81. Retrieved from

<http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/index.php/revista/article/view/96%0Ahttp://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/index.php/revista/article/download/96/101>

Vidaud, E. (2015). Una aproximación a los concretos reforzados con fibras, 30–35.

## **CARACTERIZACIÓN DEL ECODRIVING MEDIANTE PRUEBAS DINAMOMÉTRICAS Y DE RUTA EN LA CIUDAD DE QUITO**

### **CHARACTERIZATION OF ECO DRIVING THROUGH DYNAMOMETRIC AND ROUTE TESTS IN THE CITY OF QUITO**

Leguísamo, Julio <sup>1</sup>; Rocha, Juan <sup>1</sup>; Llanes, Edilberto <sup>1</sup>; Dávila, Johan <sup>1</sup>

1. Departamento de Ingeniería Automotriz, Universidad SEK, Quito, Ecuador

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

#### **RESUMEN**

En este artículo se caracteriza los resultados del consumo de combustible y los factores de emisión de gases contaminantes en la ciudad de Quito al aplicar una técnica de manejo ecodriving. En un vehículo de inyección indirecta a gasolina Chevrolet Aveo family, mediante pruebas en dinamómetro y pruebas de ruta aplicando una conducción normal y una conducción ecológica. Se realizó las pruebas en un dinamómetro de chasis del ciclo Japonés Modo 10-15 y se seleccionó una ruta con tráfico validada por el Centro de transferencia tecnológica para la capacitación e investigación de control de emisiones vehiculares. Los resultados obtenidos revelan que al aplicar un modo de conducción eficiente en un vehículo a gasolina en la ciudad de Quito se reduce el consumo de combustible y el factor de emisión de NO<sub>x</sub>, HC y CO.

Palabras clave: conducción ecológica, ecodriving, ahorro combustible, emisiones contaminantes

#### **ABSTRACT**

This article characterizes the results of fuel consumption and the emission factors of polluting gases in the city of Quito when applying an ecodriving management technique. In a vehicle of indirect injection to gasoline Chevrolet Aveo family, by means of dynamometer tests and road tests applying normal driving and ecological driving. The tests were carried out on a chassis dynamometer of the Japanese Mode 10-15 cycle and a route with traffic validated by the Technology Transfer Center was selected for training and research on vehicle emission control. The results obtained reveal that by applying an efficient driving mode in a gasoline vehicle in the city of Quito, fuel consumption and the emission factor of NO<sub>x</sub>, HC and CO are reduced.

Keywords: eco-driving, ecodriving, fuel economy, polluting emissions

## **1 INTRODUCCIÓN**

Existe una relación directa entre energía, cambio climático y salud mundial. Es así que, el excesivo consumo de fuentes fósiles ha contribuido significativamente al calentamiento global y enfermedades respiratorias (1). A nivel mundial, el sector del transporte es el segundo de mayor consumo de energía después del sector industrial y representa el 30 % del total de la energía suministrada a todo el mundo. En los últimos 30 años el sector del transporte ha experimentado un crecimiento constante y se cree que actualmente es responsable de casi el 60 % de la demanda total del petróleo del mundo, con tendencia a ser el sector con una demanda creciente de energía más fuerte en el futuro (2).

En la actualidad para reducir la demanda de combustible y las emisiones contaminante en vehículos se han desarrollado algunas estrategias como: motores más eficientes, biocombustibles, mejoras aerodinámicas y reducción de peso con nuevos materiales (3). Sin embargo existe otro método conocido como ecodriving o manejo ecológico, que se basa en la manera de conducir un vehículo basada en el control por parte del conductor de la velocidad, la marcha, el freno, la aceleración y desaceleración. (4), las ventajas que se obtiene con este estilo de conducción son: reducción de consumo de combustible, reducción de emisiones contaminantes, aumento de la seguridad y reducción de mantenimiento correctivo. (5).

Varias investigaciones han evaluado los beneficios del ecodriving a través de pruebas estáticas en dinamómetro de chasis, pruebas de ruta o mediante una combinación de ambos. (6). Barth y Boriboonsomsin (7) en su estudio aplicó los consejos eco-driving, obteniéndose un ahorro de combustible en pruebas en ruta del 13 % y en pruebas dinámicas es de 37 %; mientras que la reducción de CO<sub>2</sub> fue de 12 % en ruta y 35 % en estática. Mensing, Bideaux, Trigui, Ribet, y Jeanneret (2014) mostraron la existencia de una diferencia entre un ciclo económico y un ciclo ecológico, una reducción de un consumo de combustible de 0,2 L/100 km, una reducción de 5,1 % de CO<sub>2</sub> y 45,5 % de NO<sub>x</sub>. Estudio realizado por Ho, Wong, y Chang (8) después de realizar de 30 a 45 sesiones de entrenamiento los conductores de prueba redujeron las emisiones de carbono y ahorro de combustible a más del 10 % con un modelo tendencial exponencial.

En las pruebas en dinamómetro y en ruta se puede determinar las concentraciones de emisiones contaminantes y consumo de combustible real durante un ciclo de conducción, siguiendo los procedimientos estandarizados (9) y se puede determinar en el ciclo de conducción los factores de emisión de gases contaminantes (10). La presente investigación se realiza en la ciudad de Quito ubicada a una altura media de 2 810 metros sobre el nivel del mar, latitud S0°13'47.46" y longitud O78°31'29.82". Debido a la altura la combustión se realiza con un 27 % menos de oxígeno que a nivel del mar; bajo estas condiciones, es menos eficiente y, en consecuencia, emite más contaminantes (11). Por lo anteriormente expuesto, el estudio tuvo como objetivo determinar si al aplicar una técnica de conducción ecodriving en Quito se reduce el consumo de combustible y emisiones contaminantes.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Modelo Matemático

En la investigación se busca determinar si la conducción eficiente en la ciudad de Quito con respecto a una condición normal, reduce el consumo de combustible y los factores de emisión de gases contaminantes de NO, HC, CO y CO<sub>2</sub>, mediante prueba en ruta y en dinamómetro. Razón por la cual se establece el modelo matemático a emplearse para determinar las variables dependientes e independientes del experimento. Para ello se utiliza las ecuaciones de factores de emisión que se expresan en gramos por kilómetro (g/km) (12). Donde  $F_{CO}$  corresponde a factor de emisión de CO,  $R_{CO}$  razón de % de CO con respecto a la concentración de CO<sub>2</sub>,  $R_{HC}$  razón de % de HC con respecto a la concentración de CO<sub>2</sub>,  $R_{NO}$  razón de % de NOx con respecto a la concentración de CO<sub>2</sub>,  $MW_{CO}$  peso molecular del CO,  $MW_{HC}$  peso molecular de HC,  $MW_{NO}$  peso molecular de NO y  $MW_{comb}$  peso molecular del combustible.

$$F_{CO} = \frac{R_{CO}}{R_{CO}+3R_{HC}+1} * \frac{MW_{CO}}{MW_{comb}} \quad (1)$$

$$F_{HC} = \frac{R_{HC}}{R_{CO}+3R_{HC}+1} * \frac{MW_{HC}}{MW_{comb}} \quad (2)$$

$$F_{NO} = \frac{R_{NO}}{R_{CO}+3R_{HC}+1} * \frac{MW_{NO}}{MW_{comb}} \quad (3)$$

Mediante la experimentación se obtendrá la concentración volumétrica de los gases contaminantes expresada en porcentaje (%) y las partículas por millón (ppm). Se considera como base principal del combustible al octano  $C_8H_{18}$  (equivalente  $CH_{2.25}$ ) y se procede a determinar el peso molecular del combustible.

$$MW_{CO} = \frac{12gC}{molC} * \left( \frac{1molC}{mol comb} \right) + \frac{1gH}{molH} * \left( \frac{y * molH}{mol comb} \right) = 14,25 \frac{g comb}{mol comb} = 0,01425 \frac{kg comb}{mol comb} \quad (4)$$

Como variables independientes se consideran la densidad del combustible  $\delta F$  ( $kg/m^3$ ) con un valor de  $748 kg/m^3$  a  $15^\circ C$  y el consumo de combustible por distancia recorrida en la ruta de prueba. El factor de emisión en gramos de cada contaminante por kilómetro recorrido se obtiene a partir de la 5:

$$F'_{CO} = F_{CO} * 6\rho_{comb} * CC \quad (5)$$

De donde se obtienen los factores de emisión en gramos de contaminante por kilómetro recorrido (13).

$$gCO = \left( \frac{28 \frac{\%CO}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left( 3 \frac{\%HC}{\%CO_2} \right) + 1} * \frac{6\rho_{comb} * CC}{0,01425} \right) * d \quad (6)$$

$$gHC = \left( \frac{42 \frac{\%HC}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left( 3 \frac{\%HC}{\%CO_2} \right) + 1} * \frac{6\rho_{comb} * CC}{0,01425} \right) * d \quad (7)$$

$$gNO = \left( \frac{30 \frac{\%NO}{\%CO_2}}{\frac{\%CO}{\%CO_2} + \left( 3 \frac{\%HC}{\%CO_2} \right) + 1} * \frac{6\rho_{comb} * CC}{0,01425} \right) * d \quad (8)$$

## 2.2 Auto de pruebas

En las investigaciones experimentales se empleó un vehículo chevrolet aveo family de 4 cilindros de 1.498 cc a gasolina, de inyección indirecta en el múltiple de admisión, normalmente aspirado, y equipado con un catalizador de tres vías convencional; se u selección está dada a partir de que los reportes estadísticos de ventas (14) lo referencian como el vehículo más vendido en la ciudad, siendo el de mayor utilización en el servicio de taxi. Las especificaciones técnicas del vehículo se detallan en la tabla 1.

Tabla 1: Características técnicas vehículo

Especificaciones Técnicas	
Relación de compresión	9.5:1
Diámetro x carrera	76.5 mm x 81.5 mm
Potencia	83/5600 hp/rpm
Torque	127/3000 nm/rpm
Válvulas	8 SOHC
Motor- tracción	delantera
Transmisión	manual 5 velocidades
Tanque de combustible	45 l

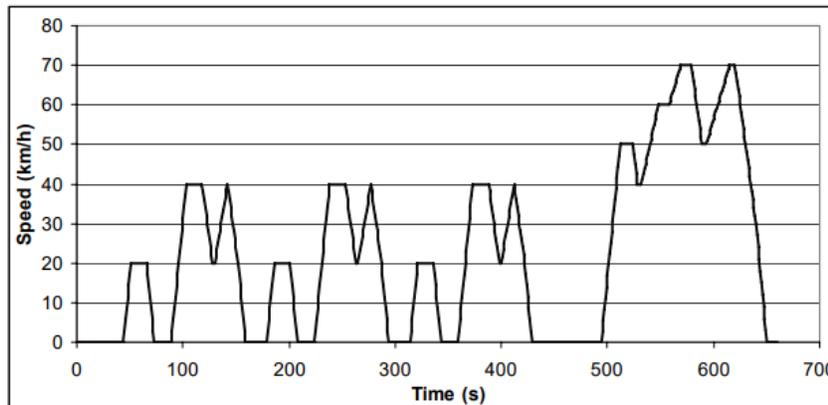
Elaborado por: Autor

### 2.3 Ecodriving

Denominada también conducción eficiente, consiste en una forma especial de conducir los vehículos, con el objetivo fundamental de reducir consumo de combustible y emisiones contaminante (15)(16). Las instrucciones de conducción ecológica son: los cambios de marcha debe hacerse tan pronto como sea posible por lo general entre 2 000 y 2 500 rpm., circular en marchas largas y a bajas revoluciones, usar la primera marcha sólo para poner en movimiento el vehículo, mantener la velocidad de marcha, evitar acelerones y frenazos, decelerar con el freno motor, detener el auto utilizando sólo el freno, no utilizar el punto muerto cuando se frena, aprovechar la inercia del coche siempre que sea posible, en las paradas no escalar todas las marchas sino mantener la marcha puesta hasta pisar embrague y detenerse.

### 2.4 Pruebas dinamométricas

Se utilizó el dinamómetro de chasis MAHA LPS 300 el que permite simular un perfil de velocidad en función del tiempo para realizar pruebas dinámicas en vehículos a diésel y gasolina. El mismo permite cargar diferentes ciclos de ensayo de las distintas legislaciones o ciclos auto diseñados, para poder determinar exactamente las cantidades de sustancias nocivas expulsadas por un vehículo, ya que no se toma en consideración el tráfico; además permite realizar comparativa entre diferentes ciclos de conducción. La investigación se desarrolló durante una simulación del ciclo de ensayo modo 10-15 (aplicando conducción normal como primera variable y como segunda variable aplicando la conducción ecodriving) de la legislación japonesa en el banco de pruebas, que simula el comportamiento de marcha característico en Tokyo, donde el ciclo conduce a velocidades más bajas que el americano y el europeo provocado por la densidad de tráfico similar a la zona geográfica de estudio Quito-Ecuador( 9) (10). Este ciclo se lo realiza cinco veces a temperatura normal de funcionamiento, con una longitud de 4165.27 km, duración de 660 segundos, velocidad media de 22.7 km/h y una velocidad máxima de 70 km/h (17). El diagrama del ciclo se puede observar en la figura 1.



Figura, 1: Ciclo de conducción Japón Modo 10-15 ensayo para turismo y vehículos industriales ligeros

La medida de la concentración de volumen de los gases de escape se realizó con un analizador de gases MAHA GT5, estos parámetros permiten obtener los factores de emisión de los gases; para determinar la diferencia que se produce en las distintas pruebas, los datos técnicos del equipo se indican en la tabla 2.

Tabla 2: Datos técnicos del analizador MAHA GT5

Gases Analizables	CO (Vol %)	CO <sub>2</sub> (Vol %)	HC (ppm)	O <sub>2</sub> (Vol %)
Rango de medición	0 – 15.00	0 – 20.0	0 – 2000 (Hexano) 0 – 4000 (Propano)	0 – 25.00
Precisión de medida	0.06	0.5	12	0.01
Resolución de medida	valores 0.001	0.01	0.1	0.01
Principio de medida	Infrarrojo	Infrarrojo	Infrarrojo	Electro-químico

La medida de la cantidad de combustible consumida se la realiza con un tanque de presión de combustible externo Liqui Moly con una capacidad de 5 litros, que se puede presurizar hasta 80 psi; mediante el cual se abastece de combustible a presión al vehículo, permitiendo obtener la cantidad de combustible consumida en el ciclo. El tanque de presión de combustible que consta de una bomba manual con la que se presuriza el sistema a 50 psi o 344.74 kPa para garantizar el flujo constante de combustible; su presión es revisada en cada prueba

Para la realización de las pruebas se sigue el protocolo que se describe en los siguientes nueve puntos: Verificar que el sistema de escape del vehículo no tenga perforaciones ni fugas, Verificar que la presión de los neumáticos sea la recomendada por el fabricante del vehículo, anclar el vehículo a los soportes del dinamómetro, instalar y asegurar el equipo para la medición de gases MAHA MGT5, encender el vehículo y calentar el motor hasta que alcance la temperatura de operación normal que corresponde a 95 °C, revisar que accesorios del vehículo estén desactivados, instalar el ventilador del dinamómetro; iniciar y seguir el ciclo indicado en el dinamómetro, grabar los datos obtenidos en el computador y repetir el procedimiento para cada prueba

## 2.4 Pruebas en ruta

Se utilizó un analizador de gases ONBOARD para determinar las concentraciones de gases de NO, HC, CO y CO<sub>2</sub>, marca GLOBAL AXION R/S TM, las especificaciones técnicas se detallan en la tabla 3. Para medir la cantidad de combustible se utilizó el mismo equipo que en la prueba de dinamómetro.

Tabla 3: Datos técnicos del analizador de gases ONBOARD Global Axion

Detalle	Valor
Principio de medición (HC,CO,CO <sub>2</sub> )	Espectrometrá de infrarrojo NDIR
Principio de medición (O <sub>2</sub> ,NOx)	Detección electroquímica
Tensión de Alimentación	12-24 V DC/5-8 A
Índice de Flujo	5 l/min
O <sub>2</sub> Rango de medición/Precisión/Resolución	0,00-25,00%/+-0,1%abs,Or+/3%rel/0.01
CO Rango de medición/Precisión/Resolución	0,00-10,00% / +- 0,02% abs. Or +/3% rel/0.01 Vol.%
NOx Rango de medición/Precisión/Resolución	0-4000 (ppm)/ +- 25ppm abs. Or +/4% rel/1ppm
CO <sub>2</sub> Rango de medición/Precisión/Resolución	0,00-16,00% / +- 0,3% abs. Or +/3% rel/0,01 Vol.%
HC Rango de medición/Precisión/Resolución	0 – 4000ppm / +- 8ppm abs. Or +/3 %rel/ 1ppm

Fuente: Enterprise, G.M. The world's first Micro PEMS

La prueba de ruta seleccionada se desarrolló por el Centro de transferencia tecnológica para la capacitación e investigación de control de emisiones vehiculares de la ciudad de Quito de la Escuela Politécnica Nacional, desarrollado en base a la geografía de la ciudad, tráfico y infraestructura vial como se observa en la figura 2. La ruta recorre 8.1k m urbanos y 9.9 k m suburbano, la variación de altura de 2 399 m hasta 2 870 m(18).

Para la realización de las pruebas se sigue el protocolo que se describe en los siguientes nueve puntos: (1) verificar que el sistema de escape del vehículo no tenga perforaciones ni fugas, (2) Verificar que la presión de los neumáticos sea la recomendada por el fabricante del vehículo, (3) Instalar y asegurar los equipos para la medición de gases ONBOARD y para la medición de consumo de combustible, (4) Encender el vehículo y calentar el motor hasta que alcance la temperatura de operación normal que corresponde a 95 °C, (6) Revisar que accesorios del vehículo estén desactivados, (7) Verificar el correcto funcionamiento de los equipos, (8) Iniciar en la ruta

seleccionada, (9) Grabar los datos obtenidos en el computador, y (10) Repetir el procedimiento para cada prueba con conducción normal y con conducción eficiente.



Figura 2: Ruta de prueba

Antes de proceder a la experimentación, se realiza un mantenimiento preventivo y una revisión del correcto estado del sistema mecánico y de inyección electrónica de combustible, asegurándose la idoneidad del vehículo para realizar las pruebas. 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 realizaron cinco pruebas de cada tipo de conducción, para determinar si entre los grupos experimentales existe diferencia significativa. Se realizó el control de rangos para determinar si los datos obtenidos en la experimentación son fiables debido a que pueden presentarse desviaciones con respecto al objetivo específico y se pueden manifestar en forma de datos inexactos provocando una excesiva variabilidad respecto a los valores deseables (19).

### 3 RESULTADOS

Una vez realizadas todas las pruebas requeridas, se procesan los datos obtenidos, logrando los siguientes resultados debidamente ajustados. En la Tabla 4, se presentan los datos de las pruebas dinámicas realizadas en el Laboratorio del CCICEV y las pruebas en ruta con una técnica de conducción normal y una aplicando una técnica de conducción eficiente (ecodriving) con respecto al consumo de combustible.

Tabla 4: Consumo de combustible

Prueba	DINAMOMETRO		RUTA	
	Conducción Normal Consumo (l/km)	Conducción Ecodriving Consumo (l/km)	Conducción Normal Consumo (l/km)	Conducción Ecodriving Consumo (l/km)
1	0,55	0,45	0,130	0,122
2	0,56	0,45	0,144	0,114
3	0,54	0,44	0,133	0,116
4	0,53	0,42	0,145	0,117
5	0,54	0,42	0,148	0,117
<b>Promedio</b>	<b>0,544</b>	<b>0,436</b>	<b>0,139</b>	<b>0,117</b>

En el análisis de resultados se debe considerar que la altura influye directamente en la combustión debido a que se reduce la cantidad de oxígeno en la mezcla y bajo estas condiciones, es menos eficiente y de esta manera se influye en las emisiones y el consumo de combustible (20). La Figura 4 indica, que el consumo de combustible en la prueba en dinámometro al aplicar el modo de conducción ecológica se reduce 19.85% con respecto a la conducción normal. Mientras que en la prueba en ruta al aplicar ecodriving hay una reducción del 15,82% con respecto a la condición normal. Barth y Boriboonsomsin (2009) en su estudio aplicó los consejos eco-driving, obteniéndose un ahorro de combustible en pruebas en ruta del 13 % y en pruebas dinámicas es de 37 % , en el cual también se obtienen una mayor reducción de combustible en las pruebas dinámicas.

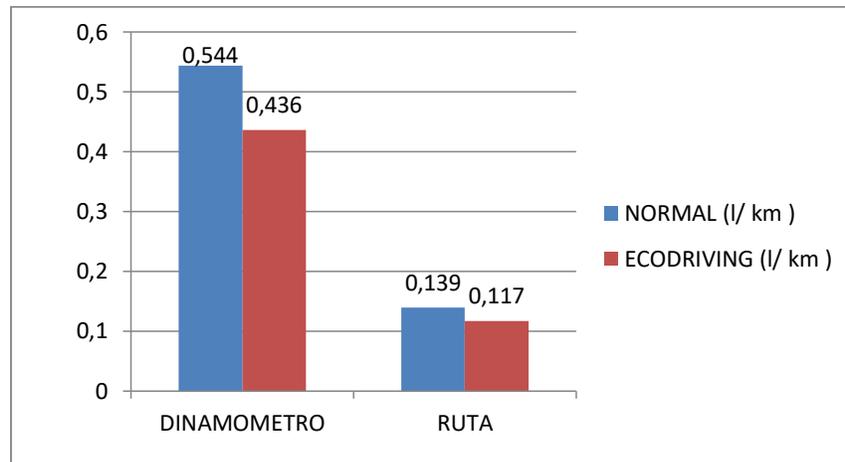


Figura 3: Consumo de combustible en pruebas en dinámometro y ruta

Mientras que en la Tabla 5, se presentan los resultados de las pruebas dinamométricas y en ruta, con una conducción normal y con técnica de conducción ecológica con respecto a las concentraciones de gases emitidas en porcentaje.

Tabla 5: Factores de Emisión

DINAMOMETRO						RUTA					
Conducción Normal			Conducción Ecológica			Conducción Normal			Conducción Ecológica		
FCO (g/km)	FHC (g/km)	FNO <sub>x</sub> (g/km)	FCO (g/km)	FHC (g/km)	FNO <sub>x</sub> (g/km)	FCO (g/km)	FHC (g/km)	FNO <sub>x</sub> (g/km)	FCO (g/km)	FHC (g/km)	FNO <sub>x</sub> (g/km)
2,23	0,09	0,43	2,71	0,067	0,385	7,05	0,09	0,96	5	0,10	0,74
2,30	0,07	0,41	2,61	0,068	0,384	8,28	0,12	1,07	5,69	0,13	0,73
2,22	0,07	0,47	2,69	0,064	0,401	7,34	0,09	1,06	5,13	0,16	0,89
2,79	0,05	0,40	2,84	0,069	0,403	8,57	0,15	1,06	5,42	0,17	0,91
2,48	0,07	0,43	2,63	0,062	0,396	7,05	0,13	1,02	5,10	0,12	0,85
<b>2,40</b>	<b>0,07</b>	<b>0,43</b>	<b>2,70</b>	<b>0,06</b>	<b>0,39</b>	<b>7,98</b>	<b>0,12</b>	<b>1,03</b>	<b>5,30</b>	<b>0,13</b>	<b>0,82</b>

Los resultados referentes al factor de emisión de CO se pueden observar en la Figura 4 en la cual se aprecia que existe diferencia significativa entre las pruebas realizadas en dinámometro y en ruta. En las cuales se observa una menor emisión en las pruebas en dinámometro y se determinó que en la prueba en ecodriving aumenta la emisión de CO 12.16% con respecto a la condición normal. En la prueba en

ruta se observa una reducción del 33.60% del factor de emisión de CO al aplicar conducción ecológica con respecto a la conducción normal. Este resultado coincide con el desarrollado (21) donde concluye que la conducción ecológica en modelación de ciclos de conducción, no necesariamente produce reducción de CO, debido a diferentes ambientes de prueba, tipo de vehículo, la hora del día y zona geográfica.

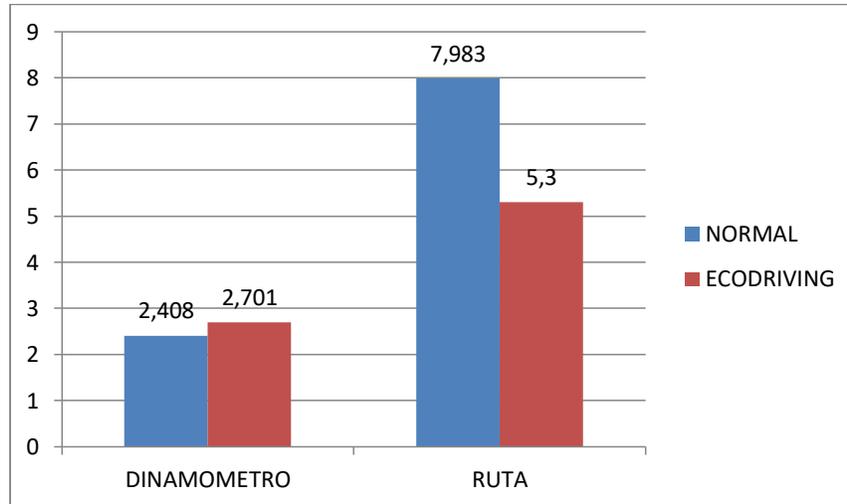


Figura 4: Factor de Emisión de CO

En la Figura 5 se observa una diferencia significativa en las pruebas en ruta y dinámicas, donde en la prueba en ruta se observa un incremento al aplicar conducción ecológica del 13.48% ; y en la prueba en dinámómetro se reduce el 11.95% al aplicar conducción eficiente. Con respecto a los resultados (22) donde se obtiene una reducción de los HC del 7.4 % en una simulación en un vehículo liviano a una altura de 169 msnm aplicando el ecodriving en dinámómetro. La diferencia de dichos resultados puede estar dada por las condiciones de altura a la cual se realizaron los estudios.

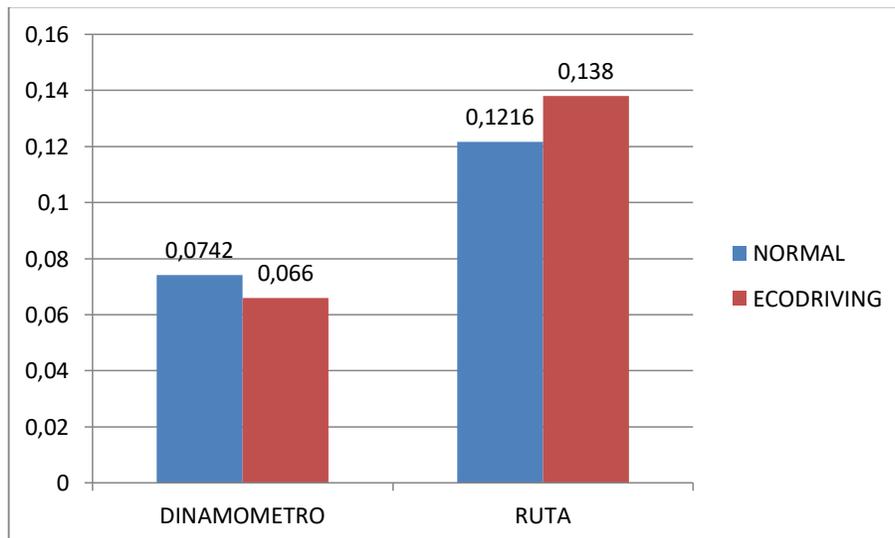


Figura 5: Factor de Emisión de HC

Se aprecia una diferencia en los factores de emisión concentración de NOx (figura 6) en la prueba estática se reduce 9.34% al aplicar la conducción ecológica con respecto a la conducción normal. La prueba en ruta indica una reducción del 20.38% al aplicar ecodriving. La tendencia a la reducción de

estos gases se determina por la reducción del punto encendido debido a revoluciones más bajas y estables lo que conduce a menores presiones, temperaturas y una velocidad de combustión más lenta. Estos resultados son corroborados con los de obtenidos por (23), donde se determinó que al aplicar ecodriving se reduce la emisión en un 17.03 %.

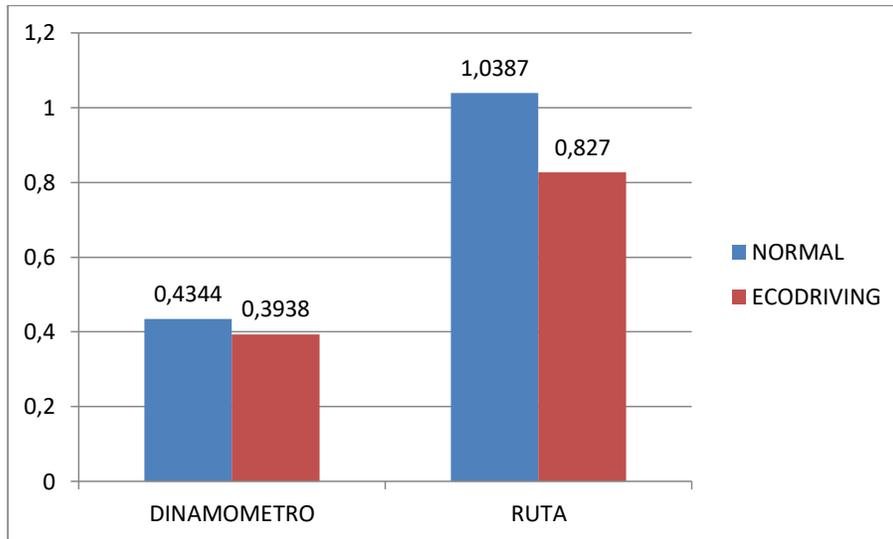


Figura 6: Factor de Emisión de NOx

#### 4 CONCLUSIONES

De acuerdo con el estudio presentado y los resultados obtenidos sobre distintos aspectos del trabajo, se indican los efectos significativos que produce la técnica de manejo ecológico ; con respecto al consumo de combustible y reducción de emisiones (CO, HC y NOx), destacándose los siguientes resultados: 1) La reducción del consumo de combustible al aplicar ecodriving en pruebas en dinámometro de chasis y en pruebas en ruta es posible y se obtiene un incremento de autonomía por galón de combustible. 2) Los factores de emisión de CO en la prueba dinamométrica y de HC en la prueba de ruta aumentan con respecto a la conducción normal. 3) La aplicación de técnicas de conducción eficiente reduce la cantidad de HC y NOx en pruebas dinamométricas y de CO y NOx en pruebas de ruta, emitidos por kilómetro con una reducción importante a pesar de que la altura influye directamente en la combustión. 4) Al aplicar conducción ecológica en la ciudad de Quito se mejora la eficiencia de un vehículo y se puede obtener beneficios energéticos, ambientales y económicos.

#### 5 REFERENCIAS

1. *Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia)*. H. J. Andrade-Castañeda, C. C. Arteaga-Céspedes, and M. A. Segura-Madrigal. 2017. *Corpoica Cienc. y Tecnol. Agropecu.*, vol. 18, no. 1, pp. 103–112, 2017.
2. *A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector*. A. S. Atabani, A., Badruddin, E., Mekhilef, I., & Silitonga, S. 2011. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4586–4610, 2011.
3. *Eco-driving: ahorro de energía basado en el comportamiento del conductor*. Magaña, V. C. 2014. Carlos III de Madrid. Retrieved from <http://earchivo.uc3m.es/handle/10016/19981>
4. *Eco-driving for transit: An effective strategy to conserve fuel and emissions*. Yanzhi, X., & Hanyan, L., Haobing, L., Rodgers, M., & Guensler, R. 2017. *Applied Energy*, (194), 784–797. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.101>
5. *Effects of Eco-Drive Education on the Reduction of Fuel Consumption and CO2 Emissions*.

- Baric, D., Zovak, G., Periša, M. 2013.** *Promet – Traffic&Transportation*, 25(3), 265–272.
6. *A critical review and assessment of Eco-Driving policy & technology: Benefits & limitations.* **Alam, M. & McNabola, A. 2014.** *Transport Policy*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2014.05.016>
  7. *Energy and Emissions Impacts of a Freeway-based Dynamic Eco-driving System* **Barth, M., & Boriboonsomsin, K. 2009.** *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 400–410.
  8. *What Can Eco-driving Do for Sustainable Road Transport? Perspectives from a City (Singapore) Eco-driving Programme.* **Ho, S., Wong, Y., & Chang, V. 2015.** *Sustainable Cities and Society*, 14, 82–88.
  9. *Variability in Light-Duty Gasoline Vehicle Emission Factors from Trip-Based Real-World Measurements.* **Liu, H., & Frey, B. 2015.** *Environ. Sci. Technol.*, vol. 49, no. 20, pp. 12525–12534, 2015.
  10. *Multivariate analysis between driving condition and vehicle emission for light duty gasoline vehicles during rush hours.* **Qu, X., Li, L., Chen, M., Lu, K., Jin, T. & Xu, 2015.** *Atmos. Environ.*, vol. 110, pp. 103–110, 2015.
  11. *Informe Calidad del aire -2016 distrito Metropolitano de Quito.* **Secretaría de Ambiente. 2017.** Quito.
  12. *Remote sensing of mobile source air pollutant emissions: Variability and Uncertainty in On-Road Emissions Estimates of Carbon Monoxide and Hydrocarbons for School and Transit Buse.* **Frey, D. y C., Eichenberger, C. 1997.**
  13. *Fuel-Based On-Road Motor Vehicle Emissions Inventory for the Denver Metropolitan Area.* **Pokharel, D., Bishop, S. & Stedman, G. 2001.** Department of Chemistry and Biochemistry, Denver, p. 11, 2001.
  14. *ANUARIO 2017.* **AEADE. 2018.** Quito
  15. *Using on-board Logging Devices to Study the Longer-term Impact of an Eco-driving Course.* **L. I. Beusen, B., Broekx, S., Denys, T., Beckx, C., Degraeuwe, B. & Gijbers. 2009.** *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 14, no. 7, pp. 514–520.
  16. *What Can Eco-driving Do for Sustainable Road Transport? Perspectives from a City (Singapore) Eco-driving Programme.* **V. W. C. Ho, V., Wong, S., & Chang, Y. 2015.** *Sustain. Cities Soc.*, vol. 14, pp. 82–88, 2015.
  17. *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions.* **Barlow, T., Latham, S. MacCrae, I. & Boulter, P. 2009.** Wokingham
  18. *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.* **F. Quichimbla, F., and J. Solís, J. 2017.** Escuela Politécnica Nacional.
  19. *Interaprendizaje de Probabilidades y Estadística Inferencial con Excel Winstast y Graph.* **Suarez, M. (2012).** (Primera). Ibarra.
  20. *Identificación Del Modo De Trabajo De Un Motor GDI Al Variar La Altura Mediante Una Prueba Estática a Ralentí y 2500 Rpm.* **Leguisamo, J., Llanes, E., Noroña, M., & Puente, E. 2018.** *INNOVA Research Journal*, 3(7), 61–70.
  21. *The relationship between fuel economy and safety outcomes.* **N. Haworth, N & Symmons, M. 2001.** Monash University Accident Research Centre.
  22. *Eco-driving: An Economic or Ecologic Driving Style?.* **Mensing, B., Bideaux, F., Trigui, E., Ribet, J., & Jeanneret. 2014.** *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.*, no. 38, pp. 110–121.
  23. *Eco-driving simulation: Evaluation of eco-driving within a network using traffic simulation.* **Kobayashi, I., Tsubota, Y. & H. Kawashima. 2007.** URBAN TRANSPORT.

## ANÁLISIS TERMODINÁMICO POR COMPONENTES DE UN PROTOTIPO DIDÁCTICO CASO PRÁCTICO: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN DOMÉSTICA

E. Calderón Freire<sup>(1)</sup>, A. Tenicota García<sup>(2)</sup>, J. Moyano Arévalo<sup>(3)</sup>, C. Gallegos Londoño<sup>(4)</sup>, G. Moreano Sánchez.<sup>(5)</sup>

- (1) Grupo de Investigación de Mantenimiento, Facultad de Mecánica, ESPOCH, Riobamba Ecuador
- (2) Grupo de Investigación de Mantenimiento, Facultad de Mecánica, ESPOCH, Riobamba Ecuador
- (3) Carrera de Mantenimiento, Facultad de Mecánica, ESPOCH, Riobamba Ecuador
- (4) Carrera de Mantenimiento, Facultad de Mecánica, ESPOCH Riobamba Ecuador
- (5) GIMAN, Facultad de Mecánica, ESPOCH Riobamba Ecuador

Autor de correspondencia: edisson.caderon@epoch.edu.ec

### RESUMEN

La refrigeración se sirve de la acumulación de energía térmica que puede ser monitorizada en cada uno de los componentes de un sistema de refrigeración. Para el rediseño de los sistemas de refrigeración se debe encontrar un punto referencial térmico en el cual se pueda proyectar acciones que desde un prototipo se pueda generar una solución enrumbada a la eficiencia energética. La investigación tuvo como objetivo identificar el equilibrio térmico como punto de referencia mediante el análisis termodinámico en cinco experimentos. El análisis termodinámico fue desarrollado en el marco del desarrollo del prototipo y el monitoreo minucioso de las variables temperatura vs tiempo localizadas en puntos estratégicos de cinco experimentos en cada componente del sistema de refrigeración. Al identificar el punto referencial térmico y secuencial se pudo presentar mejores alternativas de diseño de cada componente de un prototipo de refrigeración doméstica diseñado y elaborado para fines didácticos dentro de la facultad de mecánica de la ESPOCH.

**Palabras clave:** análisis termodinámico, sistema de refrigeración, refrigeración doméstica, prototipo didáctico.

### ABSTRACT

The cooling uses the accumulation of thermal energy that can be monitored in each of the components of a cooling system. For the redesign of the refrigeration systems, a thermal reference point must be found in which actions can be projected that from a prototype a solution based on energy efficiency can be generated. The research aimed to identify thermal equilibrium as a reference point by thermodynamic analysis in five experiments. The thermodynamic analysis was developed within the framework of the prototype development and the detailed monitoring of the temperature vs. time variables located at strategic points of five experiments in each component of the refrigeration system. By identifying the thermal and sequential reference point, better design alternatives for each component of a prototype of domestic refrigeration designed and developed for teaching purposes within the ESPOCH Faculty of Mechanics could be presented.

**Keywords:** thermodynamic analysis, refrigeration system, domestic refrigeration, didactic prototype.

## 1 INTRODUCCIÓN

“La refrigeración tanto doméstica como industrial, mantiene valores estimados de presión de vapor, volumen líquido o de vapor, y entalpia, mismos que ayudan a calcular los valores en el efecto de refrigeración” [1], así como los efectos del cambio de fase en las sustancias utilizadas para el proceso de refrigeración [2], muy común en casos de edificios o zonas industriales.

Al describir los componentes en los sistemas de refrigeración doméstico e industrial, se refiere en primera instancia al condensador, el cual que intercambia calor en dos ciclos [3]. En el mismo sentido el evaporador con la misma función de intercambiar el calor, produce la transferencia de energía térmica desde un medio a ser enfriado hacia un refrigerante [4].

Según los estudios especializados en la termodinámica en varios ámbitos [5], los efectos de un condensador sobre su efectividad y rendimiento en el proceso de refrigeración, son mejorados con el aumento de los ángulos de incidencia del refrigerante mediante análisis computacional de la dinámica de los fluidos (CFD) [6]; y con ello el control del aumento o disminución de la temperatura de una manera práctica y segura.

De igual forma el sistema de refrigeración puede aumentar su capacidad con la maximización de la volatilidad del refrigerante que utiliza, ya que no está condicionado por la presión de descarga del condensador por cuanto “la refrigeración tiene como función la acumulación de energía térmica” [7]. Sin embargo, el sector industrial en los últimos años se ve obligado a minimizar costos por concepto de energía es por esta razón que los sistemas de refrigeración industrial han sufrido una serie de variaciones en sus diseños acompañado de grandes inversiones [6].

“Tanto en sectores industriales como domésticos los sistemas de refrigeración son propensos a las emisiones de gases de invernadero nocivos para el medio ambiente” [8]; en ese sentido la utilización de un condensador enfriado por aire [9], se ha convertido en una opción muy recomendable, principalmente en casos domésticos, con ello la eficiencia energética y cuidado del medio ambiente se puede manejar.

“En refrigeradores domésticos no se ha desechado al condensador, aunque utilicen gran cantidad de energía, pero es necesaria para la reducción de la fluctuación de la temperatura, es decir reducir la temperatura a valores neutrales” [10]. Sin embargo “para optimizar los sistemas de refrigeración en general se debe contar con un número óptimo de ventiladores en el condensador para que la temperatura sea ambiente y de esta manera reducir la energía utilizada” [11].

Varias investigaciones especializadas en sistemas de refrigeración [12] apuntan a que los condensadores tanto en sistemas industrial como domésticos han sido partícipes de avances tecnológicos, en ese marco es mencionada “la refrigeración mixta, como una alternativa eficiente de ahorro energético, caracterizada por el cambio del refrigerante y no del sistema en sí” [13].

Al referirse como alternativa eficiente se refiere en mayor escala a la estabilidad de temperatura. Sin embargo en casos domésticos no se podría “implementar sistemas de condensadores operativos con compresores como en casos industriales con fines de mejora de la eficiencia” [14] y como problema evidente [15]; el desconocimiento de un equilibrio térmico del sistema de refrigeración de modo que alcance una temperatura adecuada y común a cada componente [16], ya que al lograr lo mencionado en un tiempo conocido se podría tomar como referencia fehaciente para el diseño óptimo de un prototipo con fines didácticos [17].

Por tal virtud el presente artículo tiene por objetivo la identificación de un equilibrio térmico mediante el análisis termodinámico de cada componente de un prototipo de refrigeración doméstica diseñado y elaborado para fines didácticos [18], relacionado varios conceptos de la transferencia de calor [19], dentro de la carrera de Mantenimiento Industrial.

Para mencionado análisis se considera un estudio empírico descriptivo basado en medidas de temperatura tomadas a cuatro componentes en 5 experimentos diferentes, durante intervalos de tiempo similares en todos los casos [20]. La determinación del tiempo de funcionamiento del prototipo de refrigeración en el que la temperatura se estabiliza será considerada como punto de referencia para mejorar el diseño de los sistemas de refrigeración [21] y cada vez aportar con las alternativas de eficiencia energética que aporten al cuidado medioambiental [22] [23].

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación contempló dos (2) episodios: en primera instancia se elaboró el prototipo de sistema de refrigeración con la descripción y caracterización de sus componentes, y en segunda instancia fueron monitoreados cada uno de los experimentos, en ese sentido el análisis del comportamiento termodinámico.

Para la descripción y caracterización del prototipo de sistema de refrigeración se consideró un ejemplo muy propio del sector doméstico, con cuatro típicos componentes (condensador, válvula de expansión, compresor y evaporador) con una disposición cerrada y con puntos de medición de temperatura localizados (ver figura 1).

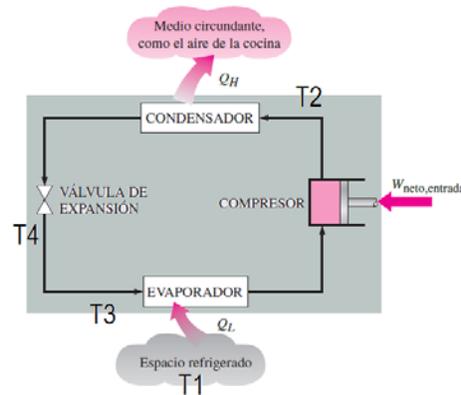


Figura 1: Diagrama de localización de los componentes del sistema de refrigeración

El prototipo del sistema de refrigeración elaborado por estudiantes de la carrera de Mantenimiento Industrial de la Facultad de Mecánica posee una compuerta de 300mm \* 120mm, con un motor para el compresor de 1/2 HP, la profundidad del evaporador es de 250mm, con una sola válvula de expansión o estrangulamiento. A continuación, se presentan las ilustraciones



Figura 2: Evaporador y compartimiento de refrigeración



Figura 3: Compuerta del Evaporador



Figura 4 Prototipo de Refrigeración Doméstica

Para el monitoreo del funcionamiento en el caso de cinco experimentos por cada componente fue utilizado cuatro termocuplas tipo K de rango  $-50$  a  $180^{\circ}\text{C}$  con recubrimiento de teflón de  $1,5\text{m}$  y de error  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ , con un punto crítico de medición de temperatura de tal modo que se exhibieron los resultados de temperaturas en función del tiempo de cada uno de los 5 experimentos, de modo que se identificó la estabilización en el cual ya es prudente el análisis de la energía que se consume para tomarlo en cuenta para el rediseño del sistema. Las tendencias fueron identificadas mediante la estadística descriptiva de modo que se puntualizó un lapso en común, el cual se tomó como referencia.

### 3 RESULTADOS

En la presentación de resultados las tendencias fueron enmarcadas en un rango definido de valores registrados de temperatura vs tiempo, entonces para el caso del espacio refrigerado del evaporador, misma que se caracteriza como espacio propenso a variaciones iniciales de valores de temperatura. En ese marco se identifica a los experimentos 3 y 4, como aquellos casos que requieren de mejor hermeticidad del sistema, que de seguro influye en un mejor diseño de los sellos de compuerta y encaje de la misma. Sin embargo, como se muestra en la figura 5 se puede identificar la estabilidad térmica en el caso del prototipo a un rango de  $-1$  a  $-6^{\circ}\text{C}$  luego de haber transcurrido 20 minutos.

Cuando se monitoreo el ingreso del condensador fue evidente un incremento de temperatura con tendencia exponencial de manera que se identificó la estabilidad térmica desde los 18 minutos a un rango muy definido de  $33$  a  $35^{\circ}\text{C}$ , ver figura 6. Los resultados mostrados pueden inferir a que el material de la parrilla podría mejorarse con la intención que se disipe el calor generado de mejor manera.

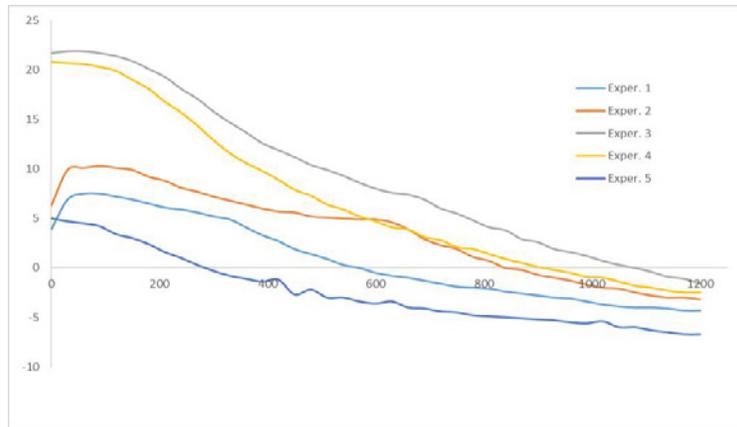


Figura 5: Datos medidos de 5 experimentos en espacio refrigerado del evaporador (Temperatura 1)

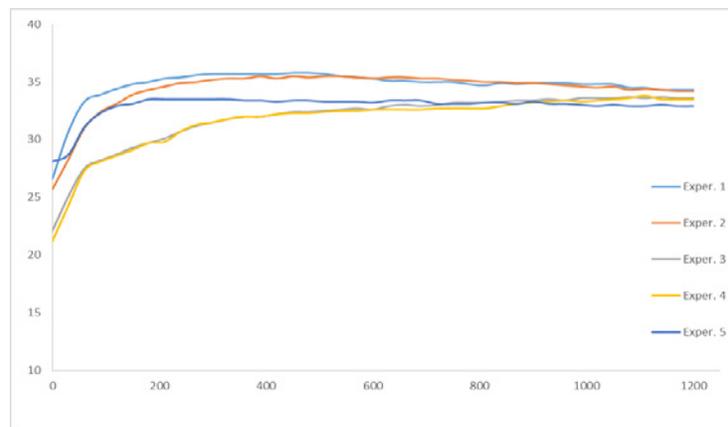


Figura 6: Datos medidos de 5 experimentos en el ingreso del condensador (Temperatura 2)

Para el caso del experimento de monitoreo en el ingreso del evaporador la tendencia se regularizó después de que hayan transcurrido los 20 minutos en un rango entre 12 a 13 °C, mostrando que los casos del 3 y 4 experimento infieren a poco aislamiento térmico, ver figura 7.

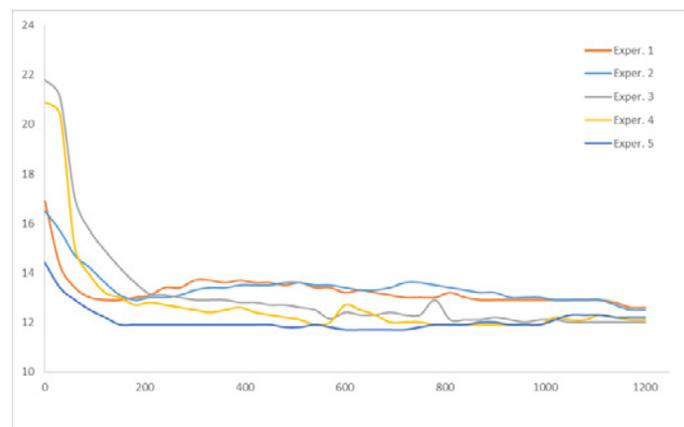


Figura 7: Datos medidos de 5 experimentos en el ingreso del evaporador (Temperatura 3)

Finalmente, para la válvula de estrategia lo más seguro con la intención de corregir errores mostrados con el experimento 2, se podría dimensionar la válvula de expansión en función del espacio proporcionado con una mejor ubicación, aunque cabe destacar que el rango de temperatura en equilibrio fue logrado a los 17 minutos a un corto rango de temperatura de entre 28 a 30 °C, ver figura 8.

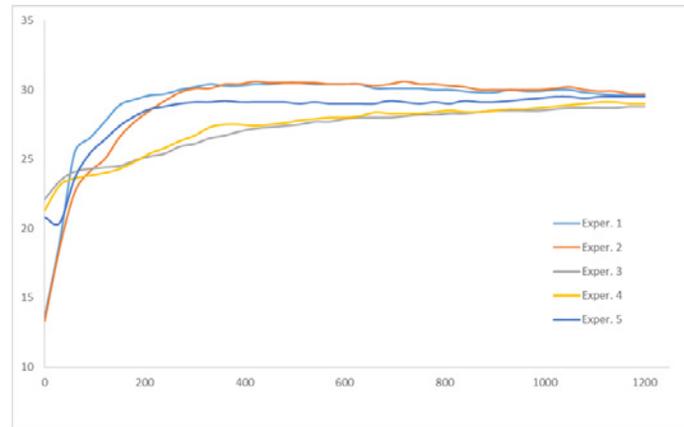


Figura 8: Datos medidos de 5 experimentos en la salida de la válvula de expansión (Temperatura 4)

Mediante los experimentos antes realizados se puede definir las temperaturas de estabilización en la siguiente tabla 1, donde se describe las temperaturas de estabilización.

Tabla 1: Estabilización de temperaturas

	Temperatura 1 (°C)	Temperatura 2 (°C)	Temperatura 3 (°C)	Temperatura 4 (°C)
	-4.3	34.3	12.6	29.6
	-3.2	34.2	12.5	29.7
	-1.6	33.6	12.0	28.8
	-6.7	33.5	12.1	29.0
	-2.5	32.9	12.2	29.5
Promedio	-3.6	33.7	12.3	29.5

Elaborado por: Autor  
Fuente: origen de los datos

## 4 CONCLUSIONES

El presente trabajo ofrece un prototipo didáctico, para que los estudiantes de la carrera de Mantenimiento Industrial puedan realizar sus experiencias analizando las propiedades termodinámicas que ocurren en un ciclo de refrigeración convencional, con la posibilidad de efectuar variantes en tiempo real y calcular el consumo de energía. Los aspectos fundamentales de este estudio de caso se reflejan en la gran diferencia de temperaturas que existe entre la zona fría (interior del evaporador) y la zona caliente (alrededores de los tubos del condensador).

Las temperaturas mencionadas ( $T_1$  y  $T_2$ ), son parámetros que sirven para estimar el coeficiente de desempeño del refrigerador, y tomando en cuenta el enunciado de la segunda ley de la Termodinámica de Clausius: “Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo sin que produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura.”[24], podemos calcular el COP y establecerlo en 7.22, suponiendo las consideraciones de una máquina ideal y pudiendo extraer calor de los productos en el interior del evaporador a una tasa 156,59 KJ/min.

Los parámetros termodinámicos de cualquier equipo pueden ser analizados mediante las expresiones matemáticas referenciadas en libros de texto, pero entender que puede pasar si no existe estabilidad en los sistemas o se está trabajando fuera de los límites óptimos de funcionamiento recae en un consumo energético ineficiente y probablemente podemos estropear los componentes de un equipo funcional.

## AGRADECIMIENTOS

Enorme agradecimiento a los estudiantes de la asignatura de Termodinámica de la carrera de Mantenimiento Industrial, que con su esfuerzo y dedicación colaboraron en la elaboración y ensamble del módulo prototipo didáctico de refrigeración doméstica.

## 5 REFERENCIAS

- [1] C. Aprea, A. Greco, A. Maiorino, C. Masselli, and A. Metallo, “HFO1234ze as Drop-in Replacement for R134a in Domestic Refrigerators: An Environmental Impact Analysis,” *Energy Procedia*, vol. 101, no. September, pp. 964–971, 2016.
- [2] G. Sonnenrein, A. Elsner, E. Baumhögger, A. Morbach, K. Fieback, and J. Vrabec, “Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers,” *Int. J. Refrig.*, vol. 51, pp. 154–160, 2015.
- [3] M. A. Velasco Bautista, “Estudio de un banco de pruebas de refrigeración y su aplicación en sistemas agroindustriales en la Carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato,” 2011.
- [4] M. Tosun, B. Doğan, M. M. Öztürk, and L. B. Erbay, “Integration of a mini-channel condenser into a household refrigerator with regard to accurate capillary tube length and refrigerant amount,” *Int. J. Refrig.*, vol. 98, pp. 428–435, 2019.
- [5] A. K. Thota Radhakrishnan, J. B. van Lier, and F. H. L. R. Clemens, “Rheological characterisation of concentrated domestic slurry,” *Water Res.*, vol. 141, pp. 235–250, 2018.
- [6] S. Bakhshipour, M. S. Valipour, and Y. Pahamli, “Analyse paramétrique de réfrigérateurs domestiques utilisant un échangeur de chaleur à matériau à changement de phase,” *Int. J. Refrig.*, vol. 83, pp. 1–13, 2017.
- [7] D. S. Niyaj and S. N. Sapali, “Performance Evaluation of a Domestic Refrigerator with a Thermal Storage Arrangement Using Propane as a Refrigerant,” *Energy Procedia*, vol. 109, no. November 2016, pp. 34–39, 2017.
- [8] R. Liddiard, B. Gowreesunker, C. Spataru, J. Tomei, and G. Huebner, “The vulnerability of refrigerated food to unstable power supplies,” *Energy Procedia*, vol. 123, pp. 196–203, 2017.
- [9] S. De Antonellis, C. M. Joppolo, C. Leone, P. Liberati, and S. Milani, “Indirect evaporative cooling systems: An experimental analysis in summer condition,” *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 467–474, 2017.
- [10] P. Liberati, S. De Antonellis, C. Leone, C. M. Joppolo, and Y. Bawa, “Indirect Evaporative cooling systems: Modelling and performance analysis,” *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 475–485, 2017.
- [11] A. Pirvaram, S. M. Sadrameli, and L. Abdolmaleki, “Energy management of a household refrigerator using eutectic environmental friendly PCMs in a cascaded condition,” *Energy*, vol. 181, pp. 321–330, 2019.
- [12] Y. Yin, D. Zhu, J. Sun, L. Xiuzhen, and T. Aimen, “Experimental Investigation of Evaporative Condensed Refrigerating System by Variation of Heat Transfer Tube Types,” *Procedia Eng.*, vol. 205, pp. 175–182, 2017.
- [13] M. Fiorentino and G. Starace, “Experimental Investigations on Evaporative Condensers Performance,” *Energy Procedia*, vol. 140, pp. 458–466, 2017.
- [14] M. Fiorentino and G. Starace, “Sensitivity Analysis of Evaporative Condensers Performance Using an Experimental Approach,” *Energy Procedia*, vol. 126, pp. 345–352, 2017.
- [15] L. Bardoulet, J. M. Corberán, and S. Martínez-Ballester, “How to achieve full liquid conditions at the capillary tube inlet of a household refrigerator,” *Int. J. Refrig.*, vol. 100, pp. 265–273, 2019.
- [16] W. long Cheng, M. Ding, X. dong Yuan, and B. C. Han, “Analysis of energy saving performance for household refrigerator with thermal storage of condenser and evaporator,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 132, pp. 180–188, 2017.
- [17] Z. Zhang, D. Huang, R. Zhao, and Y. Leng, “Effect of airflow field optimization around spiral wire-on-tube condenser on a frost-free refrigerator performance,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 114,

- pp. 785–792, 2017.
- [18] Y. a. Çengel, “Thermodynamics: An Engineering Approach,” *McGraw-Hill*, 2004.
  - [19] Y. Cengel, “Heat Transfer: A Practical Approach,” *J. Chem. Inf. Model.*, 2013.
  - [20] C. D. E. I. Mecánica, “Estudio de los parámetros de operación de un refrigerador doméstico que opera con refrigerantes R600a,” 2015.
  - [21] I. Dincer and Y. A. Cengel, “Energy, entropy and exergy concepts and their roles in thermal engineering,” *Entropy*, 2001.
  - [22] *Medio ambiente*. 2018.
  - [23] International Energy Agency, “World Energy Outlook: Executive Summary,” *Paris Int. Energy Agency*, 2013.
  - [24] Y. A. Çengel, M. A. Boles, and G. N. Cázares, *Termodinámica*, no. QC311 C4 1996. McGraw-Hill, 2006.

## **DISEÑO Y SELECCIÓN DE ELEMENTOS PRINCIPALES PARA LA ELABORACION DE UNA TRITURADORA DE NEUMÁTICOS**

### **DESIGN AND SELECTION OF MAIN ELEMENTS FOR THE PREPARATION OF A TIRE CRUSHER**

Moyano, Javier <sup>1\*</sup>; Naranjo, Eugenia <sup>2</sup>; Chuqui, Wellington <sup>3</sup>; Soria, Bryan <sup>4</sup>;  
Casa, Jhonny <sup>5</sup>

1. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería de Mantenimiento Industrial. Riobamba, Ecuador, javier.moyano@esPOCH.edu.ec.
2. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Industrial. Riobamba, Ecuador, eugenia.naranjo@esPOCH.edu.ec
3. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería de Mantenimiento Industrial. Riobamba, Ecuador, wellingtong.chuqui@esPOCH.edu.ec.
4. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería de Mantenimiento Industrial. Riobamba, Ecuador, bryan.soria@esPOCH.edu.ec
5. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería de Mantenimiento Industrial. Riobamba, Ecuador, jhonny.casa@esPOCH.edu.ec

\*Autor de correspondencia: javier.moyano@esPOCH.edu.ec.

### **RESUMEN**

En el presente trabajo de investigación se desarrolla con el objetivo de contribuir a la disminución de la contaminación ambiental causada por los neumáticos de automóviles desechados dentro de las distintas ciudades; según el ministerio de ambiente un aproximado de 2'400000 neumáticos se desechan en Ecuador y muchos de ellos terminan en los bordes de las carreteras, terrenos baldíos o cuerpos de agua. mediante la elaboración de una máquina de trituración se pretende contribuir con materia prima para la elaboración de otros materiales en los que pueda ser incluido el caucho triturado, (suelas de zapatos, rellenos de césped superficial, capa de elasticidad de superficies deportivas, pavimento de parques infantiles de seguridad, betunes modificados, aislamiento de edificaciones, ruedas macizas, entre otros).

En el desarrollo del trabajo se determina los requisitos necesarios para diseñar la maquina con una eficaz selección de elementos como motor, cadenas, poleas, engranajes y ejes, con datos que se encuentran en el medio como, por ejemplo; cual es la fuerza que se necesita para romper el caucho y cual va hacer la potencia que utilizaremos para realizar el trabajo con éxito.

Se considera neumáticos rin 13 -15 para la selección de elementos constitutivos de nuestra maquina; también se aplica cálculos previos que permitan la correcta utilización de los catálogos. Al obtener las mejores opciones para el diseño de la máquina y mediante el software SOLIDWORKS se observará el modelado de los distintos elementos, comprobando que nuestra maquina cumpla lo antes expuesto.

Palabras clave: Triturador, neumático, cadena, engrane

## ABSTRAC

In the present research work it is developed with the objective of contributing to the reduction of environmental pollution caused by discarded car tires within the different cities; According to the Ministry of Environment, approximately 2,400,000 tires are discarded in Ecuador and many of them end up at the edges of roads, vacant lots or bodies of water. by means of the elaboration of a crushing machine it is intended to contribute with raw material for the elaboration of other materials in which crushed rubber can be included, (soles of shoes, filled with superficial grass, elasticity layer of sports surfaces, park pavement children's safety, modified bitumen, building insulation, solid wheels, among others).

In the development of the work, the requirements necessary to design the machine are determined with an effective selection of elements such as motor, chains, pulleys, gears and shafts, with data that are in the middle, such as; What is the force that is needed to break the rubber and which will make the power that we will use to perform the job successfully.

Rim 13 -15 tires are considered for the selection of constituent elements of our machine; previous calculations that allow the correct use of the catalogs are also applied. When obtaining the best options for the design of the machine and using the SOLIDWORKS software, the modeling of the different elements will be observed, checking that our machine complies with the above.

Keywords: Crusher, tire, chain, gear

## 1. INTRODUCCION

La falta de acciones para llevar un correcto tratamiento de los residuos que dejan el uso de los neumáticos de caucho usados en los vehículos, debido a que por su excesivo desgaste resulta imposible reutilizarlos luego de un proceso de renovación de su superficie o reencauche, desembocan a una sobreacumulación de dichos componentes causantes en su mayoría de problemas ambientales, se genera por la falta de presupuesto destinada a la adquisición de maquinaria capaz de mejorar las condiciones para la disposición del caucho de las llantas a nivel de pequeños negocios o bodegas de vulcanización, lo cual resulta crítico que los neumáticos sea más adquiridos que reciclados a día de hoy, Sin embargo la concientización por mejorar las condiciones ambientales y el ingenio de personas con conciencia ambiental, han propuesto diferentes métodos y procesos para la disposición de las llantas de vehículos, la más reconocida en la actualidad es la trituración proceso que permite reciclar y aprovechar los distintos materiales de los cuales están compuestas terminando en GCR (granulado de caucho reciclado) este producto final es el adquirido como materia prima en la producción de suelas de zapatos, elaboración de suelos de seguridad, y en componentes para aplicaciones ingenieril como bujes de caucho y dilatadores.

La ejecución de este trabajo constituye la realización del diseño básico de un sistema de trituración de llantas desalambradas de vehículos pequeños, también la selección del sistema de transmisión más adecuada para lo cual se usará métodos y conocimientos de ingeniería, relacionadas a la selección de elementos de máquinas los cuales contemplan:

- Establecer los parámetros básicos y requerimientos para el triturador.
- Plantear el sistema de transmisión a adaptar al triturador.
- Realizar el modelado y simulación mediante el software SolidWorks para el triturador.

Según el ministerio de ambiente un aproximado de 2'400000 neumáticos se desechan en Ecuador cada año, pero hasta el momento no se ha puesto en marcha ningún plan, que pueda disminuir o

realizar una correcta reutilización de estos materiales. En España, el SIGNUS (Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados) recogió unas 162.599 toneladas de neumáticos en 2013, de los cuales 75.559 toneladas fueron recicladas o valorizadas materialmente convirtiéndose en triturado y granulado de caucho para diversas aplicaciones (campos de fútbol de césped artificial, losetas de seguridad para parques infantiles, mezclas asfálticas, objetos moldeados), (Alejandre, 2014).

Distintos investigadores plantean diversas formas de reutilización del caucho de neumáticos como es el caso de (Pelález Arroyave, Velásquez Restrepo, & Giraldo Vásquez, 2017), en el que participa las principales tendencias en la utilización del caucho reciclado, incluyendo aplicaciones actualmente comercializadas y otras derivadas tanto de estudios terminados como de líneas de investigación en desarrollo. Las aplicaciones con mayor potencial de volumen consumido son del sector infraestructura y construcciones civiles, especialmente asfaltos, concretos y materiales aislantes para construcción liviana”

(Guerrero, 2018), en su investigación realiza el diseño y elaboración de un bloque de hormigón prototipo utilizando partículas de caucho, para diferentes porcentajes de sustituciones por agregado fino, que posea similares características técnicas y económicas de un bloque de hormigón convencional, cumpliendo la norma NTE INEN 3066 2016-11.

La corrosión de los refuerzos de acero es una de las principales causas del deterioro prematuro de las estructuras de concreto armado; así mismo los daños que ocasiona esta degradación contribuyen a un incremento en los costos en el sector de la construcción por lo que se evalúa la trabajabilidad de la mezcla de las partículas de neumático, pero no modifican significativamente esta propiedad. Se comprobó que la densidad del concreto disminuye al aumentar la cantidad de partículas de neumático y mejora su resistencia.” (C. Flores, 2014)

Los métodos de aprovechamiento de los residuos de caucho se clasifican en procesos mecánicos, criomecánicos, termo-mecánicos (molienda, mezclado de alta velocidad), químico-mecánicos (desvulcanización, proceso criogénico de Trelleborg [TCR, por sus siglas en inglés], hinchamiento en benceno), químicos (con reactivos orgánicos e inorgánicos), térmicos (en digestores, en autoclaves, en medios alcalinos, en medios neutros, con acción de vapor de alta presión), biotecnológicos, procesos con microondas y con ultrasonido. En la mayoría de estos procesos es necesario triturar el caucho hasta reducirlo a gránulos de tamaño y forma regular, y de esa manera facilitar que los aditivos químicos y agentes de expansión reaccionen adecuadamente con la estructura vulcanizada, a la vez que se separan más eficientemente las fibras de acero, textiles y aditamentos metálicos que puedan estar presentes en el caucho que se procesa (Arroyave, Restrepo, & Vásquez, 2017)

El uso racional de la energía en los procesos industriales resulta de gran importancia y actualidad. Los procesos de trituración y molienda de materiales consumen enormes cantidades de energía. Se estima que, de toda energía generada en el mundo, de un 3 a un 4 %, se destina a las operaciones de reducción de tamaño, y solo en Estados Unidos a estas operaciones se dedica el 29,3% de toda la energía consumida en la minería. Estos elementos muestran que la mejora de la eficiencia energética de las operaciones de reducción de tamaño es de interés de un grupo importante de científicos e investigadores. (José Ramón Hechevarría & Proeza, 2015)

(Roberto Pérez Aparicio, Departamento de Desarrollo de Mercados y Nuevas Aplicaciones, 2018) da a conocer diferentes procesos y explica que es el NFVU (Los neumáticos al final de su vida útil llegan a las plantas de tratamiento, se someten a diferentes procesos:

Trituración. - Los neumáticos enteros, mediante una cinta transportadora, una pala o un pulpo se introducen en una trituradora que generalmente se compone de un conjunto formado por uno o dos rotores o ejes de cuchillas que giran en sentido contrario para cortar el neumático.

Dependiendo de las dimensiones de las cuchillas y de la criba que se coloque a la salida de la trituradora, se obtienen trozos de neumático de entre 20 y 400 mm.

Granulación. - En una primera etapa, el triturado de neumático puede reducirse a tamaños de hasta por debajo de 25 mm mediante diferentes tipos de molinos. Además, durante ese proceso se separan prácticamente la totalidad del acero y parte del textil

Las propiedades mecánicas de los cauchos son evaluadas de acuerdo con normas estándar internacionales. El comportamiento del material cuando es sometido a una fuerza de tensión se evalúa según los parámetros indicados en la norma ASTM D412. La norma ASTM D2240-05 describe el procedimiento para medir la dureza de estos materiales. En el caso de la resistencia al desgarre, los ensayos son llevados a cabo de acuerdo con la norma ASTM D624-00, La norma ASTM D395-14 detalla los procedimientos para evaluar una propiedad o deformación permanente por compresión; esta propiedad determina en un material la deformación permanente restante cuando una fuerza (que fue aplicada) es removida, la dirección de la fuerza es en compresión y es llevado a cabo a ciertas condiciones de temperatura” (Urrego Yepes & Cardona Vazquez, 2017)

Para obtener una visualización correcta tanto del proceso, materiales, y sistemas que se puede utilizar para realizar el trabajo de triturado de caucho se revisa distintas bibliografías en las que cabe recalcar que (Stalin, 2017), implementó una trituradora de caucho para la obtención de granulometría fina con diferentes tipos de cálculos para la construcción correcta, utilizo como base la norma ASTM D 4-22 de la materia a triturar. Además, por medio de ensayo de corte del material determino cuál es el torque necesario que necesita el motor.

También es de gran aporte el mencionar que (Pelizzoni, Fumagalli, Quarleri, & Raül, 2013) determina que el caucho posee una resistencia a la tracción entre 1 y 20 MPa, dependiendo de su grado de vulcanización. Este valor equivale a 2 Kgf/mm<sup>2</sup>, valor inferior en 35 veces al del acero componente de los alambres incluidos dentro de los NFU.

## **2. MATERIALES Y METODOS**

Para la realización del trabajo se desarrollan diferentes tipos de investigaciones y la aplicación de métodos para las distintas etapas de nuestro proyecto.

En una primera instancia se desarrolla una investigación exploratoria donde se verifica datos de artículos científicos, libros, revistas entre otras. Para la determinación de las propiedades mecánicas del caucho, o efectividad de los tipos de corte del material, así como también determinar los distintos cálculos para el diseño de la máquina.

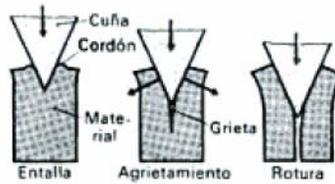
Para las distintas etapas se utiliza un método deductivo con la finalidad de aplicar cálculos que nos permitan diseñar y seleccionar la transmisión para realizar el proceso de triturado.

### **2.1 ANALISIS DEL PROCESO DE CORTE**

Al realizar el trabajo en primera instancia se determina un análisis del proceso de corte más adecuado. Los procesos de corte se realizan básicamente sobre metales, apareciendo ocasionalmente datos sobre otro tipo de materiales, por este motivo, en nuestro estudio preliminar se analiza diversos tipos de corte a fin de seleccionar el método más adecuado para caucho, dentro de los éstos procesos se destaca:

El corte por Seccionado consiste en separar las distintas partes de una pieza sin producir viruta. En la siguiente figura 1A se observa que el corte por seccionado tiene lugar por la acción de una

cuña que incide directamente sobre el material sometido a corte y en la 1 B, se indica el “ángulo de la cuña (b)” también denominado “ángulo de filo”.

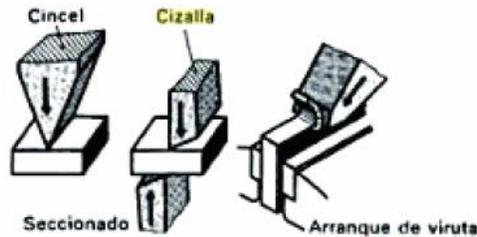


**Figura 1:** Seccionar y cortar por arranque de viruta.

**Fuente:** (Pelizzoni, 2013)

Se menciona también al corte por cizallado y se define como el corte en frío de un metal empleando un sistema de tijeras (cizalla); éste se realiza de manera Normal a la superficie.

En la Figura 2 vemos varios tipos de corte. El corte por cincel se corresponde con el “seccionado” de la Figura 1A; el corte por arranque de viruta es un corte por cuña y la operación de cizalla que es un corte tipo tijera.



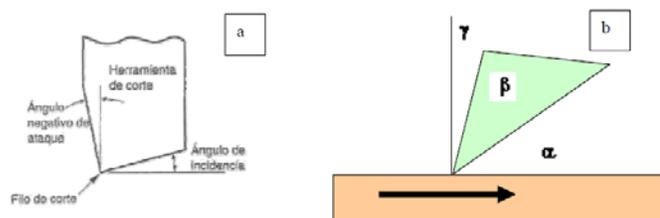
**Figura 2:** Cortes por cuña/cincel, cizalla y arranque de viruta.

**Fuente:** (Pelizzoni, 2013)

El corte por arranque de viruta en los metales ocurre cuando el filo de la herramienta ocasiona la deformación elástica de la parte de metal que se convertirá en viruta.

Durante este proceso de deformación se producen grandes tensiones y una vez que el material supera la tensión de fluencia, tiene lugar la separación de la capa debido a la deformación plástica. Consideramos que algo similar ocurrirá con el caucho.

En la Figura 3 (a) se muestra la geometría básica correspondiente a una herramienta de corte y en la 3 (b) se detallan los ángulos de la misma respecto al avance del material. De acuerdo a consideraciones técnicas, la suma de los ángulos de incidencia ( $\alpha$ ), el de filo ( $\beta$ ) y el de ataque ( $\gamma$ ) debe ser de  $90^\circ$ . (Pelizzoni, 2013)



**Figura 3:** (a) Geometría básica de herramienta de corte por cizalla.

(b) Detalle de los distintos ángulos. **Fuente:** (Pelizzoni, 2013)

## 2.2 ANÁLISIS DEL MATERIAL

Para determinar el tipo de corte es necesario analizar el caucho (copolímero estireno-butadieno), es un tipo de elastómero, es decir, posee la propiedad mecánica de poder sufrir mucha más deformación elástica bajo estrés que la mayoría de los materiales y aun así regresar a su tamaño previo sin deformación permanente. Por este motivo, presenta una buena resistencia a la abrasión y al impacto, y moderadas resistencias a la flexión y al desgarro. Su resistencia de rotura es de **0,176 Kg/mm<sup>2</sup>**. (Marisol, 2018)

Es así que los cálculos de esfuerzo que se presentan a continuación se realizan considerando un corte transversal por cizallado teniendo en cuenta, fundamentalmente, la zona que ofrece mayor resistencia, es decir, el mazo de alambres.

Para la construcción de la máquina trituradora de caucho, se toma como base la norma **ASTM D 4-22**. La cual manifiesta que se debe emplear tamices de numeración 4 a 16 para la obtención de granulometría, que comprende diámetros desde 1,18mm hasta 4,75 mm. Además, parámetros de diseño tales como: fuerza necesaria para el desgarro del caucho, dimensiones del pedazo que se ingresa, velocidad según recomendaciones de otros fabricantes, número y diseño de cuchillas.

Se analiza que los neumáticos usados son considerados desechos especiales y que de acuerdo a la normativa técnica ecuatoriana **INEN No. 2096** en el siguiente orden de prioridad: a) Reencauche, b) Reciclaje, y, c) Coprocesamiento. Los neumáticos de camión contienen una mayor proporción de caucho natural en relación al caucho sintético de los neumáticos de automóvil como se puede observar en la tabla 1.

**Tabla 1.** Composición de neumáticos de automóviles y camiones (En % de peso).

<i>Material</i>	<i>Automóviles(%)</i>	<i>Camiones(%)</i>
Caucho/ elastómeros	48	45
Negro de humo y sílice	22	22
Metal	15	25
Material textil	5	
Óxido de Zinc	1	2
Azufre	1	1
Aditivos	8	

Fuente : (Hylands & Shulman, 2003)

## 3. RESULTADOS

Se establece parámetros de funcionamiento de la máquina trituradora, entre ellos que está destinada para la trituración de neumáticos rin (13 - 15 pulgadas); Con este sistema se obtendrán partes de unos 5 a 7 cm aproximadamente para que luego continúen el proceso de trituración en otro tipo de maquinaria, para la obtención de GCR, los detalles del sistema como obtención, transporte, almacenamiento y demás maquinaria del proceso no serán tratadas en detalle en este proyecto.

Mediante el análisis de corte y la potencia que se necesita se define utilizar una la transmisión por cadena y por engrane ya que genera mayor potencia y más agarre además que esta transmisión no presenta deslizamiento, suprimiendo la pérdida de potencia por fricción al momento de realizar la trituración.

Para realizar una correcta selección de los elementos que componen nuestra maquina es necesario obtener la potencia de trabajo necesaria para triturar los neumáticos considerando una granulometría de  $60 \text{ mm}^2$  de área

### Cálculo de la potencia del motor

Datos:

$$\omega_1 = 10 - 15 \text{ rpm}$$

$$\tau_{\text{caucho}} = 0.176 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} \Rightarrow 1725490.19 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Fuerza de corte de la cizalla.

$$\tau = \frac{F}{A}$$

$$F = \tau * A$$

$$F = 0.176 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} * \left( \frac{\pi}{4} (160 \text{ mm}^2) \right)$$

$$F = 497.62 \text{ Kgf} = \mathbf{4879.985 \text{ N}}$$

### Calculo del volumen y del torque

#### Calculo del volumen según el triángulo de cizallas

$$V = \frac{b * A}{2} * l$$

$$V = \frac{10 \text{ cm} * 6 \text{ cm}}{2} * 90 \text{ cm}$$

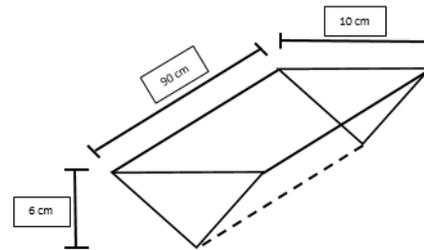
$$V = \mathbf{0.0027 \text{ m}^3}$$

#### Calculo del torque

$$T = \tau * V$$

$$T = 1725490.19 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} * (0.0027 \text{ m}^3)$$

$$T = \mathbf{4658.8 \text{ Nm}}$$



#### Calculo de la potencia del motor

$$P = T\omega$$

$$P = 4658.8 \text{ Nm} (1570 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2})$$

$$P = 7318.025 \text{ Watt} * \frac{1 \text{ Hp}}{746 \text{ Watt}} = 9.80 \text{ Hp}$$

$$P = \mathbf{9.80 \text{ Hp} \approx 10 \text{ Hp}}$$

Para realizar un correcto selecciona miento de motor se sugiere mediante catálogo el cálculo de la potencia de diseño misma que relaciona la potencia de trabajo con un factor de servicio, con la finalidad de garantizar el buen funcionamiento de nuestra máquina.

$$P_D = P_{\text{motor}} * FS$$

$$P_D = 10 \text{ hp} * 1.5$$

$$P_D = \mathbf{15 \text{ hp}}$$

Con la obtención de la potencia de diseño necesaria para la trituración se realiza el seleccionamiento de los elementos tanto de cadena como engranes y se obtiene los siguientes datos que se muestra a continuación.

**Tabla 2.** Resultados de la transmisión por cadenas

TRANSMISIÓN POR CADENAS						
Corte de la cizalla	Potencia del motor		Potencia del diseño	Selección de Cadena	N° de dientes (Piñón)	N° de dientes (rueda)
4879.985 N	10 HP		15 HP	1h=#180	28	56.756
Relación de transmisión	Diámetros de la rueda		Distancia entre centros	N° de eslabones	Longitud de la cadena	Distancia entre centros corregidos
2.027	20.0956"	40.6649"	50.7127"	88.3852	198.8667"	50.7125"
Angulo en contacto	Velocidad		Frecuencia máxima de la carga	Fuerza y factor de seguridad	Duración de la transmisión	
156.88°	0.400m/s		2.5682 seg -1	13.68	26242081.61 horas	

Fuente: Autores

**Tabla 3.** Resultados de la transmisión por engranajes.

TRANSMISIÓN POR ENGRANAJES						
Relación de la transmisión	Determinar el módulo	N° de dientes (Piñón)	N° de dientes (rueda)	Diámetro del piñón	Diámetro de la rueda	
2.027	2.5	18	36	1.77"	3.6"	
Diámetro exterior (Piñón-Rueda)	Diámetro del piñón y la rueda	Paso circular	Espesor de diente	Deddendum	Addendum	
1.9685"   3.78"	1.77"   3.6"	0.309"	0.15"	0.1230"	0.098"	
Altura del diente	Paso diametral	Ancho de diente	Diámetro base	Distancia entre centros	Línea de presión	
0.2214"	0.4"	30mm	1.66"   3.37"	2.68"	11.90"	
Relación de contacto	Velocidad	Fuerza total	Fuerza tangencial	Fuerza radial	Análisis a flexión	
1.61	0.0375 m/s	336931.7013 N	316612.2335 N	115237.4288 N	Piñón 48694.3767	Rueda 36520.7825
Análisis en contacto	Esfuerzos admisibles	Esfuerzo admisibles a la durabilidad	Factor de seguridad flexión (Piñón-rueda)	Picadura		
Piñón 13457.60	Rueda 13457.60	379.722 N/mm <sup>2</sup>	741.1764 N/mm <sup>2</sup>	Piñón 1.53	Rueda 1.03	1.55

Fuente: Autores

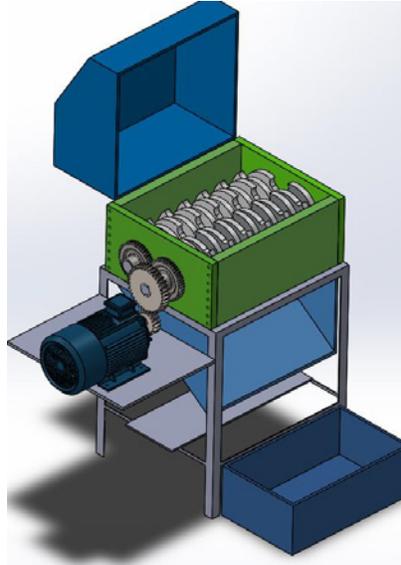
Con las fuerzas que se presentan en cada uno de las transmisiones se realiza los distintos cálculos para obtener el diámetro del eje que soporte las cargas, obteniendo como resultados.

**Tabla 4.** Resultados del diseño del eje.

DISEÑO DE EJES					
Torsión	Momento máximo	Diseño Estático	$\sigma_{eqa}$	$\sigma_{eqm}$	Sodemberg
31661,22Nm	431210,99	3,6 cm	92974750,51 Mpa	805184,10Mpa	4,2cm
Se´	K	Se	n		
379Mpa	0,2540	96,27 Mpa	1,49		

Fuente: Autores

Con los valores obtenidos se procedió a simular un prototipo de máquina trituradora mediante software SolidWorks como se observa a continuación:



**Figura 4.** Modelado de máquina trituradora.

**Fuente:** Autores

#### 4. CONCLUSIONES

El sistema en general cuenta con las características para triturar cualquier tipo de neumático, separar las fibras de acero y generar la mínima cantidad de partículas en el ambiente circundante y cumple los objetivos planteados, además de que se aportaron valores agregados y especificaciones concretas a la hora de realizar una futura construcción e implementación.

El sistema de trituración puede funcionar mediante una transmisión de engranes o también con un de transmisión por cadena. La diferencia se representará en los costos de implementación de los dos sistemas.

El equipo es de muy fácil mantenimiento, debido a su construcción y acople de sus elementos además nos permite realizar un montaje y desmontaje favorable para sus debida revisión y mantenimiento.

Las partes móviles del triturador requieren de una lubricación del tipo A y el tipo de mantenimiento a aplicar se dará según el contexto operacional en el cual entrará a operar.

El material reciclado de los neumáticos desechados, en este caso el caucho, puede usarse de manera confiable para mejorar las propiedades mecánicas de las mezclas asfálticas usándolo como agregado. La utilización de este reciclado traerá beneficios ambientales, ya que el residuo se valoriza y solucionará el problema de la mala disposición final de ellos, reduciendo así la contaminación

## 5. BIBLIOGRAFÍA

- Alejandre, J. G. (Septiembre de 2014). *Fundacion vida social*. Obtenido de <http://www.vidasostenible.org/informes/revolucion-en-reciclaje-de-neumaticos/>
- American Psychological Association. (2010). *Manual de Publicaciones de la American Psychological Association* (6 ed.). (M. G. Frías, Trad.) México, México: El Manual Moderno.
- Arroyave, G. J. (14 de febrero de 2017). *Aplicaciones de caucho reciclado: Una revisión de la Literatura*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91150559002>
- C. Flores, S. R. (diciembre de 2014). *Revista de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción*. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/4276/427639593005.pdf>
- Casas., N. K. (2015). *Scribd*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/293374074/Articulo-cientifico?fbclid=IwAR0vuHLA3M3sG-s-L9MdMXAzGTfGa6O9IATMzAyMxRKzz2CBco0Pue9xCLQ>
- Castelu, M. D. (18 de 7 de 2017). *Revista tecnologica*. Obtenido de [http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rtft/v13n19/v13n19\\_a02.pdf?fbclid=IwAR3W-6ZshjwNscBVCAjNjNdtK54p6ZC3d2jk\\_wTZ6wht7qR2K40KzOifGMc](http://www.revistasbolivianas.org.bo/pdf/rtft/v13n19/v13n19_a02.pdf?fbclid=IwAR3W-6ZshjwNscBVCAjNjNdtK54p6ZC3d2jk_wTZ6wht7qR2K40KzOifGMc)
- ChimborazoAzogue, L. E. (2017). Obtenido de [http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7150/2/ART%C3%8DCULO.pdf?fbclid=IwAR2s\\_kH3f-EDGZ1YGb8Rq8psBzz3f-ZXQvZPEYqEMo6JSHcplQemDT0zM2U](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7150/2/ART%C3%8DCULO.pdf?fbclid=IwAR2s_kH3f-EDGZ1YGb8Rq8psBzz3f-ZXQvZPEYqEMo6JSHcplQemDT0zM2U)
- Coello-Velázquez, A. L., & Castellanos- Pérez, L. O. (13 de Septiembre de 2017). *Minería y Geología*. Obtenido de [file:///C:/Users/Acer/Downloads/art%C3%ADculo\\_redalyc\\_223553249001.pdf](file:///C:/Users/Acer/Downloads/art%C3%ADculo_redalyc_223553249001.pdf)
- Coello-Velázquez, A. L., Hechavarría-Pérez, J. R., & Castellanos-Pérez, L. (Diciembre de 2017). *Modelación matemática de la fragmentación en*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223553249001>
- E. Vaquera Gonzalez, S. V. (2018). *Revista Ciencia, Ingeniería y Desarrollo Tec LerD*. Obtenido de <http://revistacid.itslerdo.edu.mx/coninci2018/CID-035%20R.pdf>
- FINA, M. T. (s.f.). *Repositorio digital de la universidad tecnica del norte*. Obtenido de <C:/Users/LUIS ANDRES/Desktop/ARTÍCULO.pdf>
- Gabriel Jaime Peláez Arroyave, S. M. (14 de Febrero de 2017). *Aplicaciones de caucho reciclado: una revision de literatura*. Obtenido de *Ciencia e ingeniería Neogranadina*, vol. 27: [http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v27n2/0124-8170-cein-27-02-00027.pdf?fbclid=IwAR0D-cGxLKY5rpc\\_nF39S\\_itgrlLN9xHWeFTOYek0E7UfNGbhbsTeEgXYY](http://www.scielo.org.co/pdf/cein/v27n2/0124-8170-cein-27-02-00027.pdf?fbclid=IwAR0D-cGxLKY5rpc_nF39S_itgrlLN9xHWeFTOYek0E7UfNGbhbsTeEgXYY)
- Gabriel Jaime Peláez Arroyave, S. M. (diciembre de 2017). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Obtenido de [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-81702017000200027&lang=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-81702017000200027&lang=es)
- Guerrero, E. J. (agosto de 2018). *Estudiante de Ingeniería Civil - Universidad Politécnica Salesiana*. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16054/1/UPS-ST003778.pdf>
- José Ramón Hechavarría-Pérez, A. L.-V.-P.-A. (31 de julio de 2015). *Redalyc*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=49642141012&fbclid=IwAR0ilmME7QY27JHE40FwLuPy1Bfyhnn2S5ZQhH1VQjS0VoaA0ekzxWzSF8g>
- José Ramón Hechevarría, & Proeza, F. D. (31 de Julio de 2015). *DYNA*. Obtenido de *DYNA*: [file:///C:/Users/Acer/Downloads/art%C3%ADculo\\_redalyc\\_49642141012.pdf](file:///C:/Users/Acer/Downloads/art%C3%ADculo_redalyc_49642141012.pdf)
- MSc., M. F. (2017). MÁQUINA TRITURADORA DE CAUCHO PARA LA OBTENCIÓN DE GRANULOMETRÍA FINA.
- Mueses Flores Stalin Fabricio, I. V. (2017). *Repositorio Digital Universidad Tecnica del Norte*. Obtenido de [http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7150/2/ART%C3%8DCULO.pdf?fbclid=IwAR0D-cGxLKY5rpc\\_nF39S\\_itgrlLN9xHWeFTOYek0E7UfNGbhbsTeEgXYY](http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7150/2/ART%C3%8DCULO.pdf?fbclid=IwAR0D-cGxLKY5rpc_nF39S_itgrlLN9xHWeFTOYek0E7UfNGbhbsTeEgXYY)

- lid=IwAR2s\_kH3f-EDGZ1YGb8Rq8psBzz3f-ZXQvZPEYqEMo6JSHcplQemDT0zM2U
- Nisbeth, R. G. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. Mexico: A Subsidiary of The McGraw-Hill Companies, Inc.
- Peláez., G. J., & Giraldo., D. H. (28 de Septiembre de 2017). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Obtenido de Ciencia e Ingeniería Neogranadina: [file:///C:/Users/Acer/Downloads/Dialnet-AplicacionesDeCauchoReciclado-5836967%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Acer/Downloads/Dialnet-AplicacionesDeCauchoReciclado-5836967%20(1).pdf)
- Pelizzoni, J. L., Fumagalli, S. A., Quarleri, R. B., & Raúl, E. (2013). *AVANCES DE DISEÑO DE PROTOTIPO DE EQUIPO DE LA EXPLOTACIÓN MINERA*. Obtenido de [http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini\\_2013/trabajos/COA22\\_TC.pdf?fbclid=IwAR2wIc wz0CdxmWGg1BYBbDRyOaGIObd74M4UUiL8DslT-G8YYI-DicRlrc](http://www.edutecne.utn.edu.ar/coini_2013/trabajos/COA22_TC.pdf?fbclid=IwAR2wIc wz0CdxmWGg1BYBbDRyOaGIObd74M4UUiL8DslT-G8YYI-DicRlrc)
- Roberto Pérez Aparicio, L. S. (Enero de 2018). *Departamento de Desarrollo de Mercados y Nuevas Aplicaciones*. Obtenido de [https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/04/reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.pdf?fbclid=IwAR2\\_8HdKDcyAG6-3OXPgTYWv97yutABFvQW2Ht1Pnn8m90Ix9HPycpp8CNw](https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/04/reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.pdf?fbclid=IwAR2_8HdKDcyAG6-3OXPgTYWv97yutABFvQW2Ht1Pnn8m90Ix9HPycpp8CNw)
- Roberto Pérez Aparicio, L. S. (enero de 2018). *Revista de plasticos modernos*. Obtenido de <https://www.signus.es/wp-content/uploads/2018/04/reciclado-de-neumaticos-transformacion-de-un-residuo-en-un-recurso.pdf>
- Urrego Yepes, W., & Cardona Vazquez, N. (2 de Julio de 2017). *Redalyc*. Obtenido de Redalyc: <http://www.redalyc.org/jatsRepo/4962/496254902003/496254902003.pdf>

**VALIDACIÓN DE METODOLOGÍAS EMPLEADAS EN SIMULACIONES CAE  
UTILIZADAS PARA EL DESARROLLO DEL PROTOTIPO SHELL ECO-MARATHON DE  
LA UNIVERSIDAD DEL AZUAY**

Robert Rockwood<sup>1</sup>, Felipe Muñoz<sup>2</sup>, Francisco Torres<sup>3</sup>, Gabriel Delgado<sup>4</sup>.

1. Centro de Investigación y desarrollo en ingeniería automototr ERGON, Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador
2. Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador
3. Centro de Investigación y desarrollo en ingeniería automototr ERGON, Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador
4. Universidad del Azuay. Cuenca, Ecuador

Autor de correspondencia: rockwood@uazuay.edu.ec

**RESUMEN.**

En el presente estudio se analiza el desempeño estructural del prototipo manufacturado por el equipo de la universidad del Azuay, que participó en la competencia Shell Eco-marathon en el año 2019; se presentan los resultados obtenidos a través de simulaciones computacionales CAE y luego los obtenidos al instrumentar algunos puntos de interés con galgas extensiométricas, los resultados muestran que existen condiciones de operación que no han sido caracterizados correctamente durante el estudio CAE, como: cargas generadas durante el ingreso y salida del piloto al habitáculo, por otro lado se logró entender el nivel de correlación que existe entre las técnicas de instrumentación para la medición, adquisición y presentación de los valores de esfuerzos y deformaciones que se están generando en la barra de pruebas, y posteriormente en el chasis del prototipo. La instrumentación se realizó considerando las recomendaciones realizadas por los fabricantes de galgas extensométricas Omega Engineering, HBM y la norma ASTM E251-1999 (2014), “Métodos de prueba estándar para las características de rendimiento de galgas extensométricas de resistencia unidas a componentes metálicos”.

**Palabras clave:** Diseño mecánico, ingeniería asistida por computador, instrumentación con galgas extensiométricas.

**ABSTRACT**

This study analyzes the structural performance of the prototype manufactured by the team of the University of Azuay, which participated in the Shell Eco-marathon competition in 2019; The results obtained through CAE computational simulations are presented and then those obtained by implementing some points of interest with strain gauges, the results show that there are operating conditions that have not been correctly characterized during the CAE study, such as: loads generated during the entry and exit of the pilot to the passenger compartment, on the other hand it was possible to understand the level of correlation that exists between the instrumentation techniques for the measurement, acquisition and presentation of the stress and deformation values that are being generated in the test bar, and later in the prototype chassis. The instrumentation was carried out considering the recommendations made by the manufacturers of strain gauges Omega Engineering, HBM and ASTM E251-1999 (2014), “Standard test methods for performance characteristics of strain gauges bonded to metal components”

**Keywords:** Mechanical design, computer-aided engineering, instrumentation with strain gauges.

## 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, dentro del proceso de diseño de elementos mecánicos se viene utilizando herramientas computacionales de diseño asistido por ordenador (CAD) y de Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE), las cuales mejoran significativamente la productividad del proceso de diseño; así también han demostrado su idoneidad al simular con precisión la respuesta de elementos mecánicos de acuerdo a las condiciones de operación programadas en cada uno de los análisis. Así fabricantes y personas que se encuentran vinculados en el campo del diseño han acortado los tiempos de estudio y han logrado concepciones geométricas diferentes, nuevas aplicaciones de materiales, reducir espesores de elementos, reducir peso y un sinnúmero de mejoras.

Sin embargo, para lograr la expectativa de diseño es indispensable caracterizar correctamente las cargas, las propiedades de los apoyos, las propiedades de los materiales, discretizar adecuadamente el entorno, utilizar correctamente las técnicas con las que se estructuran los diferentes análisis CAE, etc. Caso contrario la propuesta esbozada en los programas no cumplirán con la expectativa de diseño. El presente proyecto de investigación nos permitirá conocer la correlación entre el pronóstico de desempeño y la respuesta física del bastidor del vehículo prototipo denominado “*morlaco*”, el cual participó en la competencia “*Shell eco-marathon Américas, 2019*”, representando al equipo de la Universidad del Azuay. Para ello se compararán los resultados de las simulaciones CAE y de los resultados obtenidos a partir del análisis de la deformación de galgas extensiométricas instaladas en puntos de interés del bastidor. La comparación de estos escenarios permitirá comprender de mejor manera aspectos relevantes al llevar a cabo una simulación computacional. Al revisar experiencias previas, vale la pena analizar el caso de estudio presentado por V. Deulgaonkar, A. Mantani [1] quienes convalidaron el diseño CAE de una plataforma montante para el sector del transporte, analizando las deformaciones en la estructura, establecen que la correlación entre el método CAE y el experimental es estrecho, mencionan que el uso de galgas extensiométricas en puntos críticos de la estructura les permitió comprender el comportamiento de la misma con el uso de cargas específicas a lo largo de la plataforma. En la publicación presentada por William B. Riley Y Albert R. George [2] convalidan un análisis torsional del chasis de un prototipo Fórmula SAE utilizando una herramienta CAE y un método experimental, en los experimentos y en los análisis CAE que desarrollan y así establecen tanto la deformación, como el esfuerzo torsional, con diferencias de un máximo de 51% en la deformación y un 30% en el esfuerzo torsional; exponen que estas diferencias se deben a las derivas de las galgas extensiométricas y los puntos donde son colocados los relojes de carátula, como conclusiones establecen que es importante conocer los factores que influyen en el vehículo en carretera, la importancia de la rigidez de la suspensión y su influencia para el diseño del bastidor incluyendo su propia rigidez, además mencionan que el uso de un modelado matemático, junto con análisis mediante herramientas CAE y un modelo experimental son indispensables para entender las rutas de carga y con ello mejorar el diseño del bastidor y las contribuciones de la suspensión en la estabilidad del mismo. En la publicación presentada por Kouichi MIYAGAWA; Yoshiyuki MARUYAMA; Masataka NASADA; Paolo DI CARLO; Giancarlo CONTI; Valerio CIBRARIO [3] realizan pruebas para la obtención de esfuerzos y deformaciones en la estructura de un vehículo, las pruebas que realizan son basadas en la normativa existente donde toman en cuenta el peso del piloto y su acompañante, la cantidad de combustible, velocidades de prueba, presión de inflado de los neumáticos y radio de giro del vehículo, se realiza un análisis con una herramienta CAE para establecer los puntos de interés donde se colocarán las galgas extensiométricas, mencionan que la correlación entre los valores obtenidos de manera estática y dinámica son cercanos a los calculados, la experimentación se lo realiza en un vehículo con todos sus componentes, como conclusión por parte de los autores establecen que el punto

crítico de la estructura es en los soportes de la suspensión y que los métodos utilizados son los correctos para la obtención de la información requerida

Es así, que actualmente se vienen utilizando las galgas extensiométricas, junto con los sistemas de adquisición y procesamiento de datos y señales, para evaluar el desempeño estructural de componentes mecánicos en pruebas físicas, y monitoreo en línea, con precisión estable de acuerdo a la naturaleza de los componentes estudiados y las características funcionales.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS.

Para realizar la convalidación del prototipo del SHELL ECO-MARATHON de la Universidad de Azuay se ha tomado como plataforma de estudio el chasis diseñado por los estudiantes de Ingeniería Mecánica Automotriz que es propulsado por un motor de gasolina, el cual fue diseñado utilizando herramientas CAE y actualmente se encuentra construido. Para la convalidación del diseño se optó por:

- Seleccionar las galgas extensiométricas.
- Validar el proceso de estimación de esfuerzos a través de una prueba preliminar.
- Estudio y caracterización del diseño del bastidor construido por el equipo de estudiantes de la Universidad del Azuay.
- Análisis de resultados CAE en las zonas de interés.
- Evaluación de prestaciones del bastidor a partir de la medición con galgas extensiométricas.
- Descripción y análisis de pruebas físicas.

### 2.1 SELECCIÓN DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS E INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS.

El uso de las galgas extensiométricas en el estudio del comportamiento de elementos mecánicos es muy utilizado en distintos ámbitos de la Ingeniería por lo que es necesario comprender su funcionamiento.

#### 2.1.1 GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

Las Galgas extensiométricas, como menciona en su publicación Alzate, Montes, Silva [4] es un sensor basado en el efecto piezorresistivo de metales y semiconductores, lo que indica que un esfuerzo que sea aplicado a un elemento en el que se encuentre adherido, deforma a la galga por lo que producirá una variación en su resistencia eléctrica, ver figura 1.

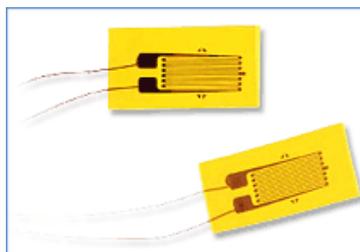


Figura 1. Galga extensiométrica.[5]

Como menciona en su página oficial en la sección de transductores OMEGA ENGINEERING [5] las

galgas extensiométricas deben de trabajar dentro de la zona de deformación plástica ya que si sobrepasa su límite, la galga puede presentar valores erróneos de medición y daño del elemento de medición, ver **figura 2**.

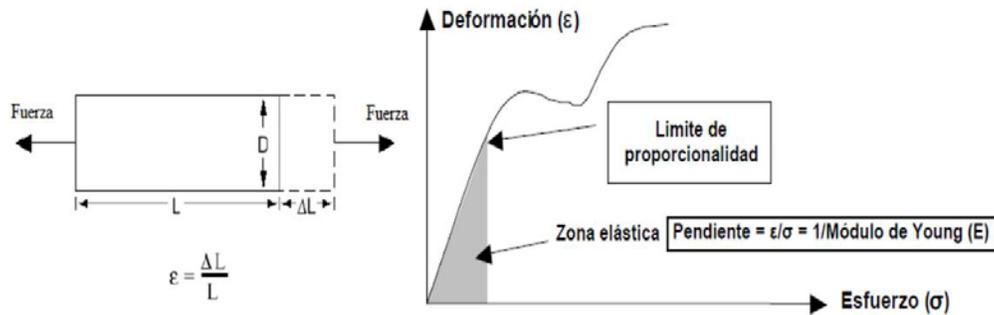


Figura 2. Funcionamiento de la galga es dentro de la zona elástica. [6]

Como se expone en el texto presentado por OMEGA ENGINEERING [7] las magnitudes de medidas de las galgas extensiométricas son tan pequeñas que estas se les cuantifica en micro deformaciones ( $\mu\epsilon$ ) por lo que la variación del voltaje que se obtendrá debido a la deformación del elemento es pequeña, para realizar la medición de la galga extensiométrica y obtener las deformaciones ( $\epsilon$ ) producidas se debe de cumplir la siguiente condición expresada en la ecuación (1) donde se requiere el cambio del valor de la resistencia ( $\Delta R$ ), el valor de la resistencia de la galga ( $R$ ) y el valor del factor de la galga ( $GF$ ):

$$\epsilon = \frac{R}{\Delta R} * GF \quad (1)$$

Para someter un elemento a una deformación longitudinal se debe de aplicar una fuerza, Mott, Robert [8] indica que el esfuerzo axial es la resistencia interna ofrecida por una unidad de área del material del cual está hecho un miembro a la acción de una carga externa aplicada, en el libro de Shigley, J [9] se presenta la ecuación del esfuerzo axial ( $\sigma$ ) que está relacionado con la carga ( $P$ ), la geometría de la sección transversal ( $A$ ), (ecuación 2)

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (2)$$

El cambio de longitud obtenido al aplicar una fuerza a una pieza unidimensional que no sobrepase el límite de la zona elástica está dado por la Ley de Hooke por lo que se obtiene la relación entre el esfuerzo con el módulo de elasticidad ( $E$ ) o también llamado módulo de Young y la deformación unitaria ( $\epsilon$ ), ver ecuación 3.

$$\sigma = \frac{P}{A} = E * \epsilon \quad (3)$$

Para determinar el esfuerzo a través de una galga extensiométrica se debe de realizar la correlación entre el valor de voltaje obtenido en base a una carga aplicada sobre el material y transformarla, en deformación.

### 2.1.2 SELECCIÓN DE GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.

En el mercado existe un sin número de tipos de galgas extensiométricas para diversas aplicaciones, como menciona Hoffman, K [10], las más comunes se pueden clasificar en base al material constructivo del elemento sensible y según su geometría.

Según el tipo de material de la base sensible como expone en una presentación web Loaiza, Luis [11] existen galgas de hilo metálico o de película metálica, por otra parte las galgas extensiométricas según su forma en base a la tesis presentada por Sandoval, Claudio [12] se clasifican en galgas uniaxiales, biaxiales y de tipo roseta, ver **figura 3**.

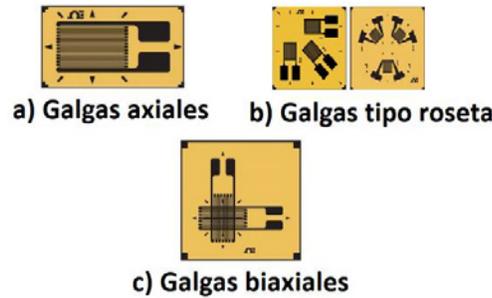


Figura 3. Tipos de Galgas extensiométricas en base a su geometría. [13]

Los parámetros de selección de las galgas, en base a la página oficial de HBM [14] recomienda seguir los siguientes pasos:

- Definir en que se utilizarán las galgas.
- Su geometría.
- Tipo de construcción de la galga.
- Tipo de conexionado.
- Adaptación a la incidencia de la temperatura.
- Largo de la rejilla de medición.
- Resistencia de la galga.

Las galgas seleccionadas para realizar las pruebas de convalidación son de la casa OMEGA, la selección se basa en el estudio los esfuerzos que se realizó, uno de los parámetros importantes es el tipo de material el cual se encuentra fabricado el chasis, además se eligió las galgas en base a la disponibilidad en el mercado, las galgas que se adquirieron son uniaxiales, las mismas fueron seleccionadas a través del catálogo oficial de OMEGA ENGEENERING [15] en donde se pueden ver las características dimensionales y demás parámetros, ver **figura 4**.

Se muestra en su tamaño real: 11,4 mm  No se muestran los conductores	SGD-7/350-LY11	350	6,50 3,10 11,40 5,10 (0,256) (0,122) (0,449) (0,201) Patrón lineal de pequeño tamaño de 120 Ω	15	Conductores planos	ST
	SGD-7/350-LY13	350		20	Conductores planos	AL
	SGD-7/350-LY41	350		15	Zapatillas soldadas	ST
	SGD-7/350-LY43	350		20	Zapatillas soldadas	AL

Figura 4. Características de galgas uniaxiales. [16]

Por ello las galgas seleccionadas son de la serie: SGD-7/350-LY13

### 2.1.3 ADQUISICIÓN DE DATOS EMITIDOS POR LAS GALGAS EXTENSOMÉTRICAS.

Para las pruebas de convalidación se requiere realizar una instrumentación al chasis, la adquisición de datos como mencionan en su tesis Guailacela, Guachún, Muñoz [17] se requiere de un sensor que transforme el fenómeno en una señal eléctrica para poder cuantificarla, además se requiere adquirir los datos que se encuentran siendo emitidos por el sensor y transformarlo para la su almacenamiento en la PC, ver **figura 5**, además los mismos deben ser entendibles para el ser humano y así comprender el estado funcional del sistema.

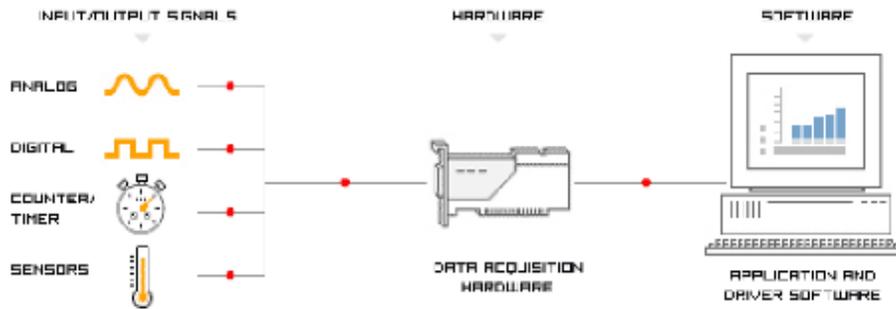


Figura 5. Etapas de procesamiento de señales. [17]

Para la adquisición de datos según como se menciona en la página web oficial de la National Instruments [18] se puede utilizar una interface (tarjeta) que permita el acondicionamiento de las señales que recaba la galga extensiométrica y procesarla para enviar los datos requeridos hacia una PC, para este estudio se utilizó una tarjeta denominada MyDaq (National Instruments®), para obtener el valor de voltaje emitido por las galgas extensométricas se utilizó el programa LabView, en la página web de la National Instruments [19] expresa que este software de aplicación proporciona flujos de trabajo basados en configuración para probar, monitorear, controlar y analizar sistemas físicos medidos, ver **figura 6**.

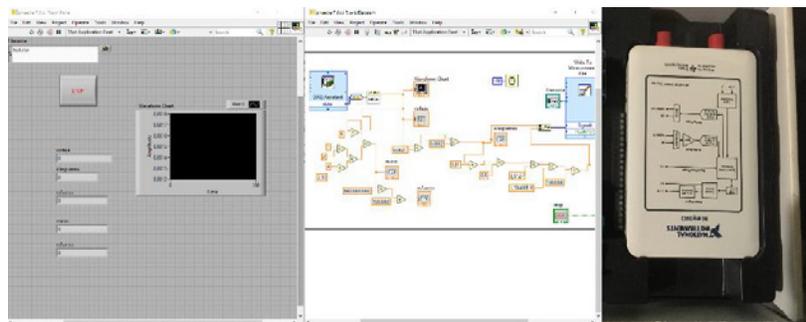


Figura 6. Software para presentación de datos en la pantalla de la PC y tarjeta de adquisición de datos

Para cualquier tipo de medición de elementos de precisión como menciona en su publicación Mayné, Jordi [20] requiere de una tensión de excitación estable, por lo que se utiliza un puente de Wheatstone, la constitución del puente está formado por un grupo de cuatro elementos conectados mediante ramales los cuales son excitados mediante una voltaje externo, la característica principales del Puente de Wheatstone es que cuando el puente se encuentra balanceado el valor del voltaje de salida en las terminales c-d (G) es igual a cero, ver **figura 7**,

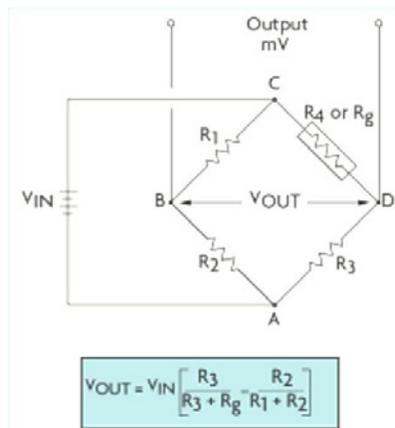


Figura 7. Puente de Wheatstone. [5]

Las galgas extensiométricas pueden estar colocadas en una, en dos o en todas las ramificaciones del puente, así es posible establecer diferentes configuraciones, en su tesis Idrovo & Quintanilla [13] exponen las configuraciones de  $\frac{1}{4}$  de puente,  $\frac{1}{2}$  puente y puente completo, en la publicación del libro de Forero, Alejandro [21] menciona que si se tiene un mayor número de galgas la medición es mucho más sensible. Para realizar las mediciones de salida del puente en la tesis que presenta Alonso, Anna [22] se menciona que la salida idealmente sea cero, pero esto no se cumple debido a las tolerancias de las resistencias y el comportamiento térmico, por lo que se debe de realizar el equilibrio del puente, existen algunos métodos como menciona en la publicación de NATIONAL INSTRUMENTS [23] esta puesta a cero se la puede realizar mediante software o hardware.

## 2.2 PRUEBA EXPERIMENTAL PARA CONVALIDAR LA METODOLOGÍA.

Para realizar la convalidación del prototipo es necesario realizar las pruebas en el bastidor utilizando las galgas extensiométricas en puntos seleccionados en un análisis previo mediante metodología CAE, antes de realizar las pruebas en el prototipo se realiza un ensayo para convalidar el método que se utilizará en las pruebas de evaluación del prototipo. Se utilizó un perfil cuadrado de aluminio 6005 T6 de 25,4x750x1.8 mm, el método de preparación y pegado de las galgas se la realiza utilizando el procedimiento presentado por HBM [24], los materiales utilizados son:

- Alcohol etílico
- Galgas extensiométricas SGD-7/350-LY13
- Terminales BTP-5
- Acetona
- Lija de grano 260 y 360
- Adhesivo conformado por cianocrilato a base de metilo

Además del procedimiento recomendado por parte de HBM se revisaron las recomendaciones establecidas en la norma ASTM E251-1999 (2014) [25] para las pruebas en galgas extensiométricas, la normativa establece el procedimiento estandarizado para la obtención de las características de galgas extensiométricas, la norma recomienda que el ambiente en donde se realicen las pruebas debe mantener una temperatura ambiente de 23° C y una humedad relativa de 50 %, la prueba que se realizó, fue someter al perfil a un proceso de flexión con distintas cargas para así obtener los valores de variación de voltaje, las pruebas para obtener los valores de esfuerzo se utilizaron pesas de 1, 2, 3 y 4 kg, además se utilizó un reloj de carátula con el cual se midió la deformación en el lugar en donde se colocó la masa, como se mencionó se utiliza el software de LabView y la forma de conexión del Puente de Wheatstone de  $\frac{1}{2}$  puente lo que indica que se colocó dos galgas activas una se colocó a compresión y la otra a flexión, ver **figura 8**.



Figura 8. Pruebas de flexión en el perfil.

Para transformar la variación de voltaje debida a la deformación de la galga, en deformación lineal se utilizó la ecuación 4 HBM [26]

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{2}\right) \left(\frac{4*V_0}{k*V_s}\right) \tag{4}$$

### 2.2.1 RESULTADOS OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE FLEXIÓN EN LA BARRA DE PRUEBAS.

Los valores de esfuerzo y deformación obtenidos en los ensayos se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Valores de esfuerzo y deformación obtenidos.

	Esfuerzo Medido	Deflexión Medida
	Esfuerzo [MPa]	Deflexión [mm]
0 [kg]	0	0
1 [kg]	6,370	-1,59
2 [kg]	14,710	-3,17
3 [kg]	20,910	-4,76
4 [kg]	25,320	-6,35

Para validar el ensayo, se calculó la deflexión en la barra a partir de la ecuación (5), y el esfuerzo flexionante a partir de la ecuación (6) y adicionalmente se llevó a cabo la simulación CAE, los resultados se muestran en las tablas 2 y 3. Para el cálculo de la deformación se relaciona el peso de la carga (P), la longitud de la barra de ensayos (L), el módulo de elasticidad (E) y el segundo momento de área transversal (I).

$$y = \frac{P*L^3}{3*E*I} \tag{5}$$

Para obtener el esfuerzo flexionante se relaciona el momento (M) ejercido por la carga en la distancia establecida, el segundo momento de área transversal (I) inercia del centro de masa (Ix) y la distancia del centroide a la fibra más lejana (y).

$$\sigma = \frac{M*y}{I_x} \quad (6)$$

Los resultados de las pruebas, valores calculados y simulaciones CAE se presentan a continuación en la Tabla 2, Tabla 3 y Tabla 4.

Tabla 2. Comparación de resultados de esfuerzo flexionante.

	Esfuerzo Medido	Esfuerzo Calculado	Esfuerzo simulación CAE	
	Esfuerzo [MPa]	Esfuerzo [MPa]	Esfuerzo [MPa] min.	Esfuerzo [MPa] max.
0 [kg]	0	0	0	0
1 [kg]	6,370	5,890	4,570	7,6212
2 [kg]	14,710	11,780	8,440	14,072
3 [kg]	20,910	17,669	12,310	20,25
4 [kg]	25,320	23,559	16,160	26,97

Tabla 3. Comparación de resultados de deflexión

	Deflexión calculada	Deflexión medida	Deflexión en simulación CAE	
	Deflexión [mm]	Deflexión [mm]	Deflexión [mm] min.	Deflexión [mm] max.
0 [kg]	0	0	0	0
1 [kg]	-1,26022	-1,59	-1,2479	-1,4039
2 [kg]	-2,52044	-3,17	-2,3479	2,6413
3 [kg]	-3,78066	-4,76	-3,447	-3,878
4 [kg]	-5,04088	-6,35	-4,577	-5,116

Tabla 4. Estimación del error relativo porcentual al comparar el esfuerzo medido, en relación al esfuerzo obtenido en la simulación CAE.

	Esfuerzo Medido	Esfuerzo simulación CAE	Error %
	Esfuerzo [MPa]	Esfuerzo [MPa]	Promedio de rango
0 [kg]	0	0	0
1 [kg]	6,370	6,096	4,31
2 [kg]	14,710	11,256	23,48
3 [kg]	20,910	16,280	22,14
4 [kg]	25,320	21,580	14,77

### 2.2.2 DEFINICIÓN DE ZONAS DE ESTUDIO EN EL BASTIDOR DEL PROTOTIPO “SHELL ECO-MARATHON”

El chasis del prototipo fue diseñado en base a tres casos de carga: análisis estático, análisis cuasi estático durante aceleración, y análisis cuasi estático durante frenado. El modelo se concibió en base a la utilización de algoritmos de optimización topológica estructural enfocados a disminuir el peso y mantener la rigidez estructural. La **figura 9**, muestra el dominio computacional discretizado del espécimen de estudio, la **figura 10**, muestra junto al modelo discretizado las restricciones y cargas aplicadas, para la aplicación de la carga que ejerce el piloto, se utilizó la ecuación 7 basado en el estudio realizado por Chandler [27], a través de la cual se distribuye a lo largo del chasis el peso del piloto.

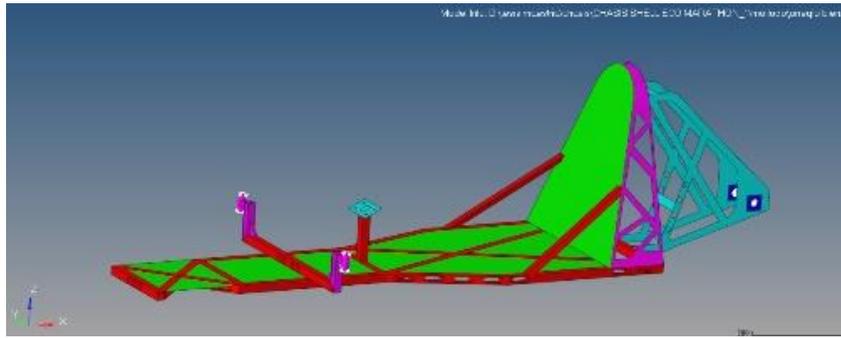


Figura 9. Dominio computacional discretizado

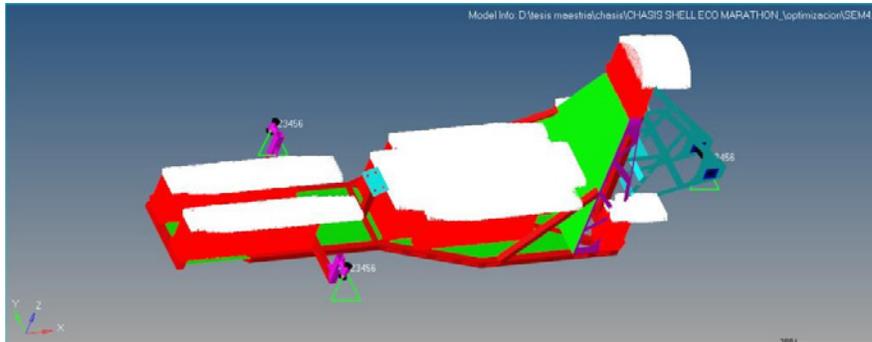


Figura 10. Distribución del peso del piloto sobre el bastidor.

$$Y = -767,67x^2 + 1405,50x - 95,66 \quad (7)$$

El dominio computacional se compone de un total de 539100 elementos los cuales se encuentran combinados entre elementos tipo QUADS y TRIAS (elementos tipo cascarón -2D-).

Del estudio del diseño CAE se determinaron las zonas de mayor concentración de esfuerzos, las cuales son: soporte inferior de la rueda posterior, zona superior de la rueda posterior y en el soporte de la mangueta de las ruedas delanteras.

Las figuras 11, 12 y 13, muestran el esfuerzo axial en el soporte inferior de la rueda posterior, soporte superior de la rueda posterior, y acople de la mangueta delantera así como el lugar seleccionado para la ubicación de las galgas extensiométricas uniaxiales (A) (B) (C) y (D), se puede apreciar que los esfuerzos máximos (visualizados de color rojo) oscilan entre 5 y 104,9 MPa, en la zona de color naranja se encuentra en un valor entre -0.674 y 5 MPa. Las zonas escogidas para la colocación de la galga extensiométrica responden a la imposibilidad de ubicarlos en la zona de alta concentración de esfuerzos, por restricciones geométricas.



Figura 11. Esfuerzos en el soporte inferior de la rueda posterior.

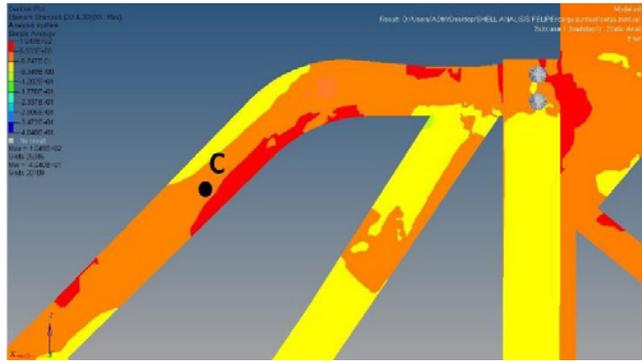


Figura 12. Esfuerzos en el soporte superior de la rueda posterior.

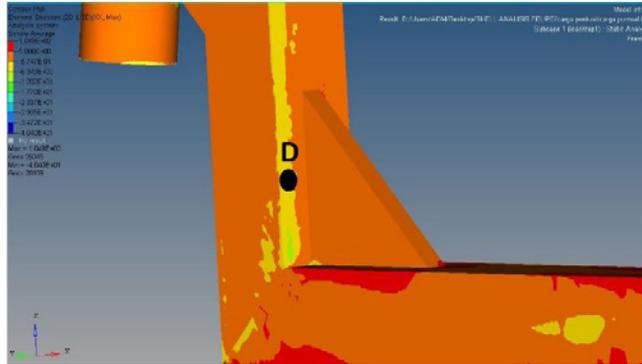


Figura 13. Zona de soporte de la mangueta de rueda.

### 2.2.3 DESCRIPCIÓN Y PRUEBAS EN EL PROTOTIPO.

Tomando en cuenta la correlación de los valores obtenidos en las pruebas de la barra a flexión se procede a realizar el pegado de las galgas en los puntos establecidos, y se designó una numeración para poder identificar los valores de las deformaciones normales que estarán sometidas cada una de las galgas colocadas en el bastidor para realizar las pruebas, ver **figura 14**

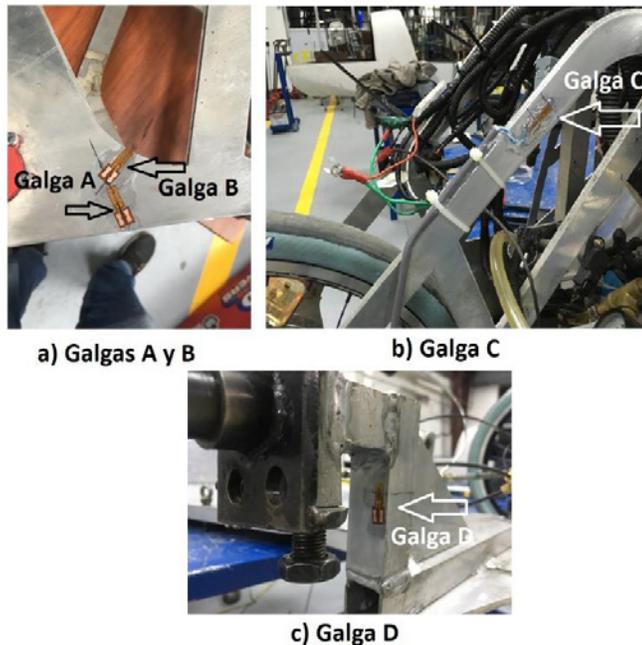


Figura 14. colocación de galgas y designación de cada una para el análisis.

Una vez colocadas las galgas extensiométricas se realizaron las pruebas estáticas del prototipo con el peso del piloto, en las pruebas estáticas se desarrollarán de dos maneras una en el cual el piloto se encuentra de pie en el centro del prototipo y otra en donde el piloto se encuentra en la posición casi horizontal la cual es la posición en la que se coloca al momento de la carrera, y las pruebas dinámicas que se realizan al prototipo consisten en hacer que acelere a su velocidad máxima y luego se accione el freno a su máxima capacidad ver **figura 15**.



Figura 15. Prueba estática y dinámicas.

### 3. ANALISIS DE RESULTADOS.

Los resultados de la deformación de las galgas extensiométricas instrumentadas en el prototipo, durante las pruebas estáticas se muestran en la figura 16 .



Figura 16. Pruebas estáticas donde el piloto se encuentra de pie en el centro del prototipo.

Los resultados indican que la mayor cantidad de esfuerzo se encuentra concentrado en la mangueta de la rueda delantera y en la zona posterior las variaciones de esfuerzo en la Galga (A) y Galga (C) son valores menores y de poca variación, las zonas donde existen una variación más significativa son los lugares donde se encuentran la Galga (B) y Galga (D), ver tabla 5.

Tabla 5. Valores máximos en las pruebas realizadas de manera estática con el piloto de pie.

	Galga A	Galga B	Galga C	Galga D
	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-2,904121	-10,906032	1,826325	-10,231569
Prueba 2	-3,585488	-13,299127	2,033862	-11,974879

Los valores negativos que se presentan en la tabla 5 indican que el elemento se encuentra a compresión, ahora los valores que se obtuvieron en la simulación en las zonas en las que se encuentran las galgas extensiométricas son delimitadas por colores, la galga extensométrica (A) se encuentra entre las zonas de color naranja y la zona de color amarillo cuyo valor mínimo de -6.349 MPa y un máximo de 5 MPa, para la galga extensométrica (B) está situada entre la zona de color naranja y la zona de crítica de color rojo con un valor mínimo de -0.6747 MPa y un máximo de 104.9 MPa, para la galga extensométrica (C) está en la zona de color naranja está entre el valor mínimo de -0.6747 MPa y un valor máximo de 5 MPa y la galga extensométrica (D) que se encuentra entre las zonas amarilla y naranja está en un valor mínimo de -6.349 MPa y un valor máximo de 5 MPa, los valores comparativos se presentan en la tabla 6.

Tabla 6. Comparación de resultados.

	Valores simulación CAE		Galga
	Esfuerzo [Mpa]		extensométrica A
	Val. Min	Val. Max	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-6,349	5	2,904121
Prueba 2	-6,349	5	3,585488
	Valores simulación CAE		Galga
	Esfuerzo [Mpa]		extensométrica B
	Val. Min	Val. Max	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-0,6747	104,9	-10,906032
Prueba 2	-0,6747	104,9	-13,299127
	Valores simulación CAE		Galga
	Esfuerzo [Mpa]		extensométrica C
	Val. Min	Val. Max	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-0,6747	5	1,826325
Prueba 2	-0,6747	5	2,033862
	Valores simulación CAE		Galga
	Esfuerzo [Mpa]		extensométrica D
	Val. Min	Val. Max	Esfuerzo [Mpa]
Prueba 1	-6,349	5	-10,231569
Prueba 2	-6,349	5	-11,974879

La segunda prueba que se realiza es cuando el piloto se encuentra en posición casi horizontal como se encontraría listo para la competencia, los valores obtenidos son los siguientes, ver **figura 17 (ver Anexo 2)**.

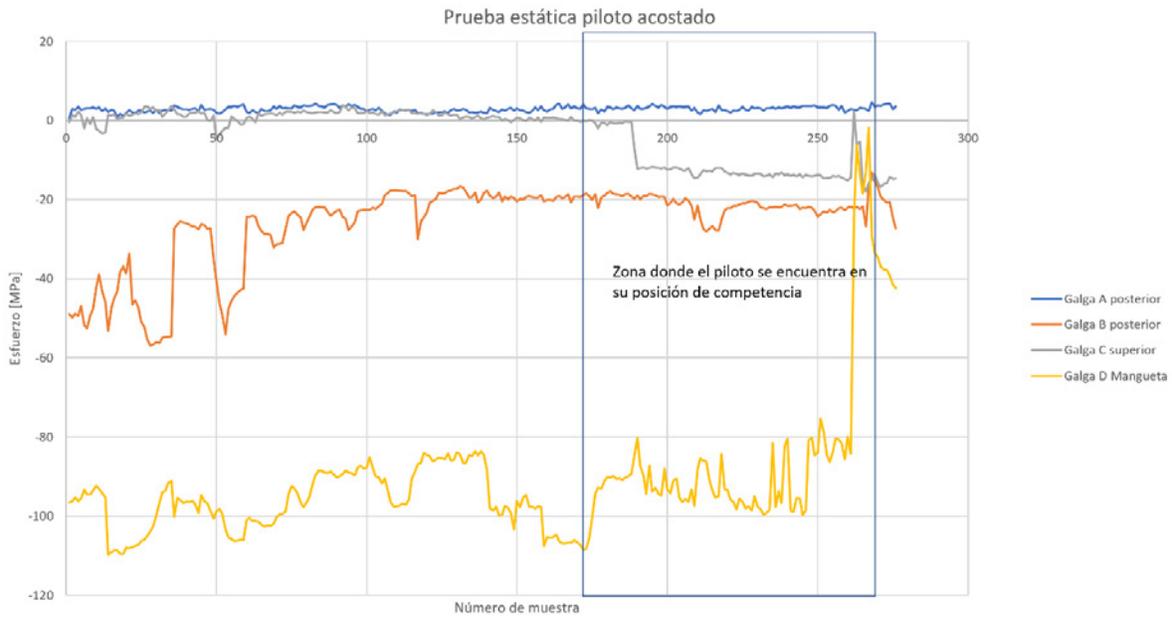


Figura 17. Pruebas estáticas con el piloto en posición de competencia.

La gráfica presentada muestra el comportamiento en la que el piloto se encuentra en posición de competencia, en esta prueba se pudo apreciar que la distribución de esfuerzos se encuentra entre los puntos donde se encuentran la Galga (B) con un valor máximo de esfuerzo de -13,141249 MPa, lo que me indica que el elemento se encuentra a compresión, en la Galga (C) con un valor de -18.022504 MPa que en el mismo caso anterior se encuentra en compresión, el valor de la Galga (A) se mantiene sin variaciones significativas, en el caso de la Galga (D) que se encuentra en la mangueta los valores comienzan a descender desde valores altos hasta que el piloto comienza a acomodarse en la posición de competencia. Por última prueba se procede a realizar de manera dinámica en donde se le da una aceleración al prototipo y se frena para ver el comportamiento del mismo a lo que hace referencia a los esfuerzos que sufren cada una de las zonas que se están analizando, ver figura 18.

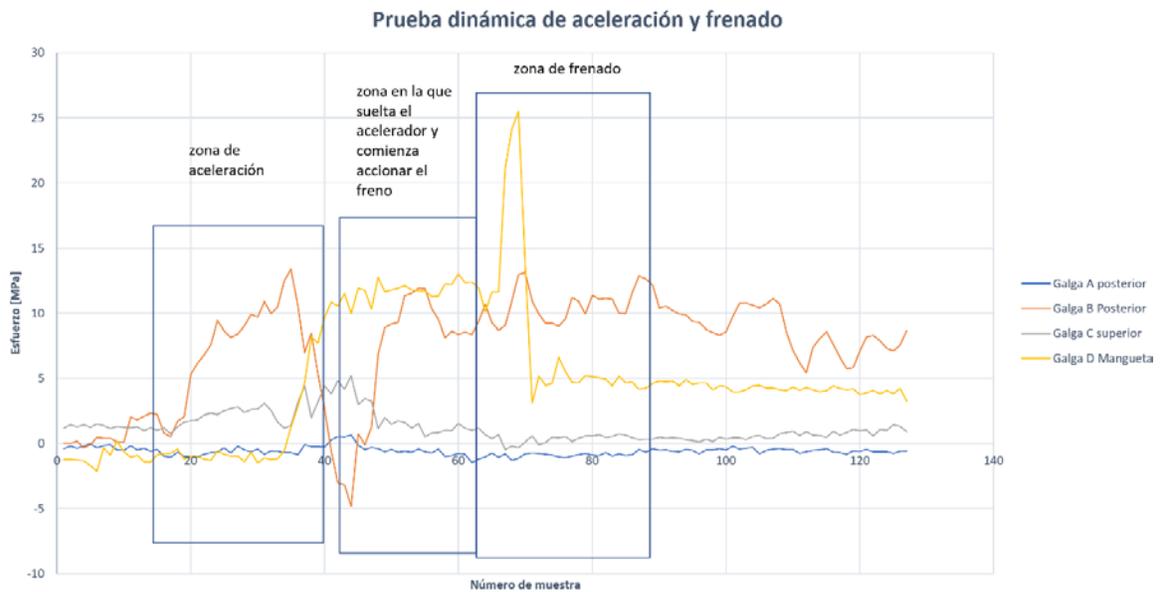


Figura 18. Pruebas dinámicas de aceleración y frenado.

La grafica presenta el comportamiento del chasis en el momento de realizar la prueba dinámica, se puede apreciar que al momento de realizar la aceleración del prototipo la Galga (B) es la que sufre un mayor aumento de esfuerzo de 13,365602 MPa lo que me indica que la zona está en flexión se puede apreciar que la Galga (A) mantiene sus valores constantes, en la parte superior podemos ver que la Galga (C) que se encuentra en el elemento de soporte también comienza a subir su valor de esfuerzo hasta 4,802404 MPa lo que por el signo me indica que el elemento se encuentra en flexión y por último tenemos los valores de la Galga (D) la cual se encuentra en la mangueta, este sensor alcanza su valor máximo en la zona de frenado alcanzando un pico de 25,497993 MPa.

#### 4. CONCLUSIONES.

En las pruebas estáticas que se realizaron tanto a la viga de prueba como al chasis del prototipo se obtuvieron valores de esfuerzo que se encuentran dentro de los rangos asimilables que se obtuvieron a través de las simulaciones CAE, evidenciándose correlación con el desempeño esperado, por lo que se puede establecer que las condiciones asumidas para la definición de cargas, características de apoyos, tamaño y distribución del dominio computacional, simplificaciones asumidas, así como el método de resolución planeado para el diseño del chasis, junto con el proceso de análisis de acumulación de esfuerzo, tiene correlación cercana en el comportamiento físico del bastidor. De esta manera los estudios subsecuentes podrán llevarse a cabo con mayor seguridad, procurando la reducción paulatina de factores de seguridad a contemplar y así reducir al máximo el peso del bastidor, sin limitar la capacidad de este elemento.

En la parte de instrumentación, la selección de las galgas extensométricas fue un factor importante ya que la geometría de las zonas de interés para el estudio resultan de difícil instrumentación, no obstante a través del análisis de correspondencia de valores de esfuerzo axial llevado a cabo en las zonas adyacentes permite comprender de mejor manera el desempeño de los puntos críticos, así se ha podido observar variaciones importantes en los esfuerzos debido a la naturaleza de las cargas (transitorias y de aplicación progresiva), aplicadas en el estudio experimental. Los resultados obtenidos permitirán en un futuro considerar la fluctuación de los esfuerzos en estudio de vida a fatiga de la estructura y así un mejor diseño de las zonas de máximo esfuerzo.

Como parte del análisis de los resultados se determinaron factores que inicialmente se pensaba tendrían una muy baja repercusión sobre el estudio del estado de carga, esto al analizar la influencia de las vibraciones que produce el motor en fase de funcionamiento, sobre la respuesta de las galgas extensométricas, las cuales, debido a su alta sensibilidad, presentan variaciones como parte del ruido ambiente de la prueba. Una mejor comprensión de este fenómeno se podría estudiar en estudios posteriores en base a la implementación de filtros durante la fase de procesamiento de datos.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] V. R. Deulgaonkar and A. G. Matani, "Development and validation of chassis mounted platform design for heavy vehicles," 2014.
- [2] W. B. Riley and A. R. George, "Design , Analysis and Testing of a Formula SAE Car Chassis," *Proc. 2002 SAE Mot. Eng. Conf. Exhib.*, no. 724, p. 382, 2002.
- [3] K. Miyagawa, Y. Maruyama, M. Nasada, P. Di Carlo, G. Conti, and V. Cibrario, "Advanced testing and simulation techniques in handling body deformation," *Int. Mech. Eng. Congr. Expo.*, pp. 1–10, 2008.
- [4] E. J. A. Rodríguez, J. W. M. Ocampo, and C. A. S. Ortega, "Medidores de deformacion por resistencia: galgas extensiométricas," *Rev. Sci. Tech.*, vol. 1, no. 34, pp. 7–11, 2007.

- [5] OMEGA, “¿Qué son las galgas extensiométricas? ¿Cómo se usan?” [Online]. Available: <https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html>. [Accessed: 12-Feb-2019].
- [6] D. González Peralta and E. Nivicela Patiño, “Análisis de las cargas en el sistema de suspensión de un vehículo formula SAE mediante extensometría eléctrica,” Universidad Politecnica Salesiana, 2015.
- [7] Omega Engineering Inc., “Force-Related Measurements,” *Trans. Meas. Control*, vol. 3, 1998.
- [8] R. L. Mott, *Resistencia de Materiales*. PEARSON Educación, 2009.
- [9] J. E. Shigley and C. R. Mischke, “Diseño En Ingeniería Mecánica De Shigley - 8va,” pp. 250–280, 2001.
- [10] K. Hoffmann, “Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas,” pp. 1–272, 1989.
- [11] L. Loaiza, “Galgas.” [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/luisalfonsoloaiza/galgas>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [12] C. A. S. Rodríguez, “Clasificación Y Selección De Strain Gages Y Su Aplicación En La Industria Mecánica,” p. 166, 2013.
- [13] P. X. Idrovo Urgiles and L. M. Quintanilla Molina, “Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas - UPS-CT001920.pdf,” 2010.
- [14] HBM, “Cómo seleccionar la galga extensométrica correcta | HBM.” [Online]. Available: <https://www.hbm.com/es/7164/como-seleccionar-la-galga-extensometrica-correcta/>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [15] Omega Engineering Inc., “Calibrador de tensión de precisión,” pp. 16–19.
- [16] O. ENGINEERING, “New Horizons ® in Strain Gages : OME ion BASICS.”
- [17] M. S. Guilacela Guaraca, M. V. Guachun Sánchez, and F. G. Muñoz Arévalo, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DIDACTICO PARA EL ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE SISTEMA DE SUSPENSION SEMI-ACTIVA,” 2010.
- [18] National Instruments, “¿Qué es Adquisición de Datos? - National Instruments,” 2016. [Online]. Available: <https://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [19] National Instruments, “Software de Aplicación para Adquisición de Datos y Control - Adquisición de Datos y Control - National Instruments.” [Online]. Available: <http://www.ni.com/es-cr/shop/select/application-software-for-data-acquisition-and-control-category>. [Accessed: 13-Feb-2019].
- [20] J. Mayné, “Sensores Acondicionadores y Procesadores de señal.”
- [21] J. Forero, “Strain gages. Fundamentos Y Aplicaciones en resistencia de materiales,” 2010.
- [22] A. Alonso Pastor, “Diseño de un sistema de posturografía portátil,” Universidad Politécnica de Catalunya, 2009.
- [23] National Instruments, “Serie de Fundamentos de Mediciones con Sensores.”
- [24] K. Hoffmann, “Practical hints for the installation of strain gages,” *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH*, p. 56, 1996.
- [25] W. Morton, “Standard Test Methods for Performance Characteristics of Metallic Bonded Resistance Strain Gages,” vol. i, no. August, pp. 1–3, 2008.
- [26] HBM, “El puente de Wheatstone | Galgas extensométricas | HBM.” [Online]. Available:

<https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>. [Accessed: 13-Feb-2019].

- [27] J. Chandler, RF, Clauser, CE, McConville, JT, Reynolds, HM, Young, “Investigation of Inertial Properties of the Human Body,” *US Dep. Transp.*, vol. 53, no. 9, pp. 1–155, 1975.

## **EVALUACION DE LA CAPACIDAD CALORIFICA DEL PROPILENGLICOL MEDIANTE LA ADICION DE NANOPARTICULAS DE ALOFAN** (EVALUATION OF THE HEAT CAPACITY OF PROPYLENE GLYCOL THROUGH THE ADDITION OF ALOFAN NANOPARTICLES)

Moreno, Telmo <sup>1</sup>; Silva-Yumi, Jorge <sup>2\*</sup>; Vargas, Alex <sup>1</sup>; Martínez, Edwin <sup>1</sup>

1. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
2. Facultad de Ciencias, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

Correspondencia. E-mail: [jorge.silvay@esPOCH.edu.ec](mailto:jorge.silvay@esPOCH.edu.ec) (J. Silva Yumi)

### **RESUMEN**

Los nanorefrigerantes constituyen una alternativa para el aprovechamiento óptimo de energía ya que mejoran las propiedades de transferencia de calor de los refrigerantes tradicionales. En esta investigación se compara las curvas de enfriamiento y la capacidad calorífica del refrigerante secundario propilenglicol con y sin presencia de nanopartículas de alofán. El alofán se obtuvo por el método de coprecipitación. El nanorefrigerante se obtuvo por el método de dos pasos, se evaluaron concentraciones de 0.5% en masa de nanopartículas y 15% y 21% en volumen de propilenglicol. Las curvas de enfriamiento se obtuvieron en un equipo chiller mediante una tarjeta My-DAQ. El principal resultado observado fue la disminución del tiempo de enfriamiento el cual pasa de 120 minutos con la mezcla de agua y propilenglicol a 80 minutos una vez que se añaden las nanopartículas, esto muestra que efectivamente se mejoran las propiedades térmicas del refrigerante secundario al adicionarle a este nanopartículas de alofán.

Palabras clave: refrigeración, nanopartículas, alofán, propilenglicol, capacidad calorífica.

### **ABSTRACT**

The nanorefrigerants are an alternative for the optimal use of energy since they improve the heat transfer properties of traditional refrigerants. This investigation compares the cooling curves and the heat capacity of propylene glycol secondary refrigerant with and without the presence of allophane nanoparticles. The allophane was obtained by the coprecipitation method. The nanorefrigerant was obtained by the two-step method, concentrations of 0.5% by mass of nanoparticles and 15% and 21% by volume of propylene glycol were evaluated. The cooling curves were obtained in a chiller device using a My-DAQ card. The main result observed was the decrease in the cooling time which passes from 120 minutes with the mixture of water and propylene glycol to 80 minutes once the nanoparticles are added, this shows that the thermal properties of the secondary refrigerant are effectively improved by adding allophane nanoparticles.

Keywords: refrigeration, nanoparticles, allophane, propylene glycol, heat capacity.

## 1 INTRODUCCIÓN

La refrigeración es empleada en cualquier tipo de proceso donde se requiera el enfriamiento de un medio por intercambio de calor. Existen varios equipos que realizan intercambio de calor ya sea por contacto directo o indirecto, entre estos tenemos a los chillers ya sean enfriados por aire, enfriados por agua, o algún otro tipo de refrigerante y de diferentes tipos: scroll, tornillo, centrífugo, de absorción, etc.

En la actualidad el uso eficiente de energía es una prioridad, debido a los problemas ambientales así como a factores económicos, los nanofluidos simples o híbridos con un enfoque refrigerante constituyen una alternativa para el aprovechamiento óptimo de energía ya que mejoran las propiedades de transferencia de calor de los refrigerantes tradicionales (1), como: agua, salmueras, glicoles (etilenglicol, propilenglicol), alcoholes (metanol, etanol), aceites, entre otros.

Los nanofluidos, son dispersiones estables de nanopartículas y refrigerantes denominados base que pueden ser preparados por dos métodos: el método de un paso y el método de dos pasos, el método de un paso implica la síntesis y dispersión de las nanopartículas en el fluido base en un solo paso, mientras que en el segundo método, las nanopartículas son sintetizadas por cualquiera de los enfoques bottom up o top down y posteriormente son dispersadas en cualquier fluido base (2,3).

Las nanopartículas ayudan a mejorar la conductividad térmica (4–6), el coeficiente de transferencia de calor (7) del nanorefrigerante comparado con el fluido base (8), la desventaja de los nanorefrigerantes es que exhiben altas viscosidades debido a la presencia de las nanopartículas y por tanto requieren mayores esfuerzos de los equipos.

Dentro de las nanopartículas utilizadas en la obtención de nanofluidos simples están óxidos de aluminio (9), de cobre, de titanio, de zirconio, de wolframio, de zinc, de silicio (10,11), nanopartículas metálicas de cobre, plata, oro (12), hierro (10), nanotubos de carbono (13,14), óxido de grafeno reducido (7) nanofibras de carbono (10), óxido de galio (15), entre otras. Para el caso de los nanofluidos híbridos se ha utilizado: nanopartículas de plata - nanotubos de carbono de pared múltiple (16) nanotubos de carbono de pared simple-óxido de magnesio, nanotubos de carbono de pared simple-óxido de magnesio, nanotubos de carbono de pared múltiple-óxido de hierro, óxido de hierro-grafeno, óxido de aluminio-nanopartículas de cobre, óxido de aluminio-nanopartículas de plata (17), nanopartículas de cobre-dióxido de titanio (18).

Una de las nanopartículas que aún no ha sido sujeto de estudio hasta el momento en nanofluidos simples y tampoco híbridos es la nanopartícula de alofán, un aluminosilicato de origen natural, presente en suelos de origen volcánico pero que también se lo puede sintetizar y que se puede considerar una especie de combinación de óxido de silicio y óxido de aluminio debido a su estructura característica. La nanopartícula de alofán tiene la forma de una esfera porosa (19,20) con diámetro externo entre 3.5 y 5.0 nm (21), radio interno entre 1.0 - 2.0 nm, espesor entre 0.7 y 1.0 nm, poros con diámetro alrededor de 0.3 - 0.4 nm (22,23) y presenta un área superficial específica que oscila entre 400 - 900 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> (22,24).

En esta investigación se plantea que las nanopartículas de alofán al ser una especie de combinación de óxido de aluminio y óxido de silicio podrían mejorar las propiedades de transferencia de calor del refrigerante secundario a base de agua y propilenglicol. Para comprobar esta hipótesis se sintetizó nanopartículas de alofán, se obtuvo un nanorefrigerante y se realizó una comparación de la capacidad calorífica y curvas de enfriamiento: temperatura-tiempo y caudal-tiempo del refrigerante secundario propilenglicol con y sin presencia de nanopartículas de alofán sintético, en un equipo chiller ubicado en la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Síntesis y caracterización de nanopartículas de alofán

Las nanopartículas de alofán se sintetizaron por el método de co-precipitación, se mezcló de manera simultánea soluciones de nitrato de aluminio nona-hidratado ( $\text{Al}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ ), silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), y ácido nítrico o hidróxido de sodio ( $\text{NaOH}$ ) para regular el pH, la mezcla se agitó por 45 minutos utilizando un agitador magnético SONICA Sweep System 500 WATT MODEL para

mantener una velocidad constante de 400 rpm. El pH fue controlado con un pHmetro BOECO BT-675 aproximadamente en 5 para asegurar la síntesis de las nanopartículas.

Luego de la síntesis, las nanopartículas fueron lavadas tres veces con agua destilada mediante centrifugación y suspensión consecutivas para la eliminación del nitrato presente en solución, finalmente las nanopartículas fueron conservadas en suspensión para la posterior preparación del nanorefrigerante, un pequeño volumen se sometió a liofilización para la respectiva caracterización. La caracterización del alofán sintético se realizó por microscopía electrónica de barrido (MEB), espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDX) y espectroscopía infrarroja (IR).

## 2.1 Preparación del nanorefrigerante

El nanofluido se obtuvo por el método de dos pasos, primero se sintetizaron las nanopartículas de alofán y luego se obtuvo el nanorefrigerante, se evaluaron concentraciones de 0.5% en masa de nanopartículas y 15% y 21% en volumen de propilenglicol de acuerdo a los resultados obtenidos por Telmo et. al (25), la mezcla se preparó in situ en el tanque reservorio del chiller.

Los volúmenes de refrigerante base, suspensión de nanopartículas y agua utilizadas se especifican en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Volúmenes empleados en la preparación de nanorefrigerante al 15% de propilenglicol.

Componente	Porcentaje (%)	Cantidad (L)
Propilenglicol	15	27
Nanopartículas	5	9
Agua	80	144
Total	100	180

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2: Volúmenes empleados en la preparación de nanorefrigerante al 21% de propilenglicol.

Componente	Porcentaje (%)	Cantidad (L)
Propilenglicol	21	37,8
Nanopartículas	5	9
Agua	74	133,2
Total	100	180

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

## 2.2 Curvas de enfriamiento temperatura y caudal vs tiempo

Las curvas de enfriamiento permiten comprender el comportamiento de los fluidos, la curva temperatura vs tiempo permite observar la variación de temperatura en función del tiempo, además se puede determinar la temperatura mínima que alcanza la solución y la velocidad de enfriamiento, mientras la curva caudal vs tiempo permite observar la influencia que tienen las propiedades de los fluidos como la densidad y la viscosidad al enfriarse y su afectación directa sobre el caudal que tiene el fluido.

Las curvas de enfriamiento se obtuvieron en un equipo chiller que cuenta con dos sensores uno de temperatura y uno de caudal, los datos se registran cada 5 minutos mediante una tarjeta NI-cDAQ, la programación se realizó a través del software LabView. La Fig. 1 muestra la interfaz para el registro de datos, los cuales se registraron variando la apertura de la válvula del equipo chiller al 50, 75 y 100%.



Figura 1: Interfaz de usuario en el software LabView

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Caracterización de nanopartículas de alofán

La MEB (Fig. 2) mostró agregados en el rango de los nanómetros, 40, 58 nm, aunque se observan también agregados de mayor tamaño, esto permitió asegurar que se está trabajando con partículas comprendidas en la escala nanométrica 1 – 100 nm. El análisis EDX mostró el predominio de silicio sobre aluminio en la composición de las nanopartículas.

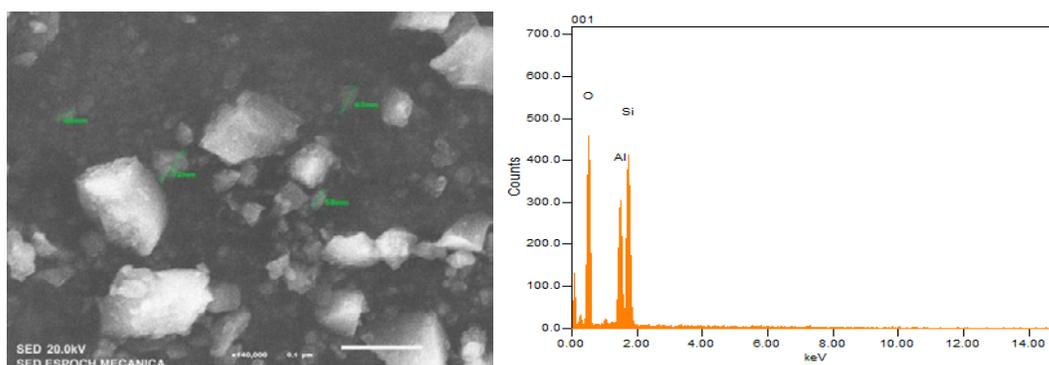


Figura 2: Microscopía electrónica de barrido (izquierda) y análisis elemental (derecha) de nanopartículas de alofán.

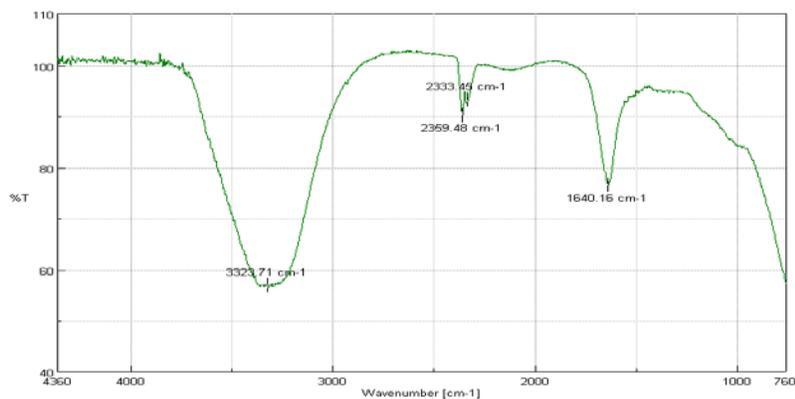


Figura 3. Espectro Infrarrojo de nanopartículas de alofán.

El espectro IR (Fig. 3) mostró el patrón característico del alofán con las señales de los grupos OH alrededor de los  $3322\text{ cm}^{-1}$ , la señal a  $1640\text{ cm}^{-1}$  debida a la vibración de las moléculas de agua adsorbidas y la señal a  $1000\text{ cm}^{-1}$  correspondiente a la superposición de las vibraciones de los grupos Al-O, Si-O así como Al-OH y Si-OH.

### 3.2 Curvas de enfriamiento temperatura y caudal vs tiempo

#### 3.2.1 Curvas de enfriamiento al 15% de propilenglicol y 0,5% de alofán

La Fig. 4 muestra los resultados de la variación de la temperatura en función del tiempo para el nanorefrigerante con el 15% de propilenglicol y 0,5% de alofán con apertura de válvula al 50, 75 y 100%. La temperatura disminuye hasta llegar a un mínimo, se aprecia que la apertura de la válvula tiene una influencia pues se llega a una menor temperatura y en un menor tiempo con una apertura de válvula del 100%, en comparación a una apertura de 75% o 50%.

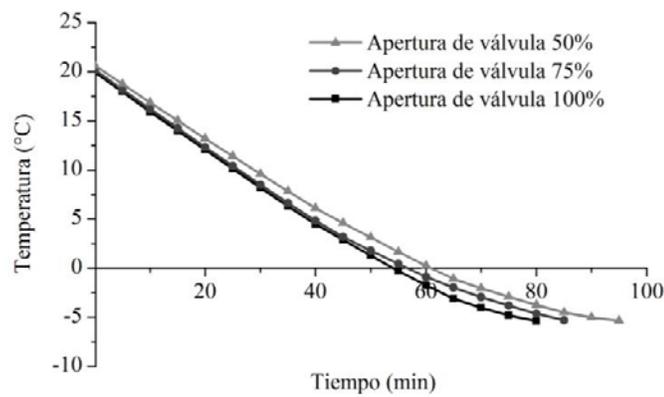


Figura 4: Curva de enfriamiento para nanorefrigerante al 15% de propilenglicol.

Al depender la velocidad de enfriamiento del caudal de circulación, a medida que la apertura de la válvula disminuye la velocidad de enfriamiento también disminuye, esto también es debido a la menor transferencia de calor en el intercambiador de placas, esa tendencia se puede observar en la Fig. 4, donde se aprecia una disminución de la pendiente al disminuir la apertura de la válvula. En la Fig.5, se observa que el caudal alcanza un valor constante y a medida que transcurre el tiempo existe una ligera disminución con las tres aperturas de válvula, lo cual se puede deber al aumento de la viscosidad del fluido debido a que se está cerca de la temperatura de congelación.

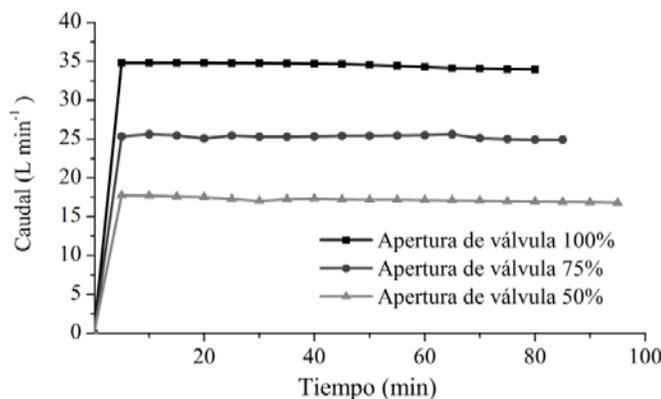


Figura 5: Curva de enfriamiento para nanorefrigerante al 15% de propilenglicol.

### 3.2.2 Curvas de enfriamiento al 21% de propilenglicol y 0,5% de alofán

En la Fig. 6 se puede observar que al abrir la válvula al 100% se obtiene una velocidad de enfriamiento mayor comparada con las aperturas del 50 y 75%, esto debido que bajo estas condiciones la bomba funciona con su máxima eficiencia. Si se compara con las curvas al 15%, el tiempo en que se alcanza 0°C es el mismo para el 15 y 21% de propilenglicol y una apertura de válvula del 100%, mientras que para el 15% de propilenglicol y aperturas de válvula de 50 y 75% el tiempo al que se alcanza los 0°C es ligeramente menor al nanorefrigerante con el 21% de propilenglicol y aperturas de válvula de 50 y 75%.

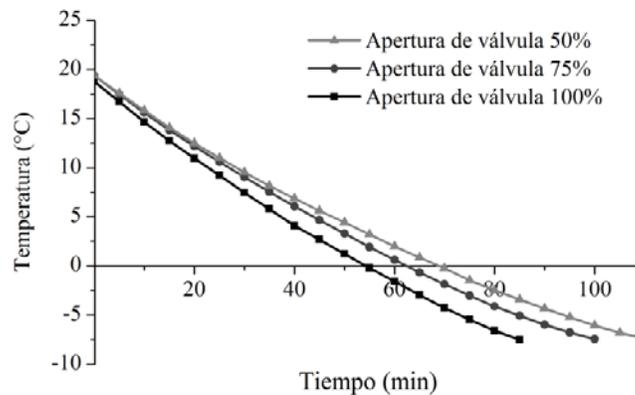


Figura 6: Curva de enfriamiento para nanorefrigerante al 21% de propilenglicol.

En la Fig.7, se observa el mismo comportamiento que en el caso anterior, el caudal alcanza un valor constante y a medida que transcurre el tiempo existe una ligera disminución con las tres aperturas de válvula, lo cual, de igual manera se debe al aumento de la viscosidad del nanofluido debido a que este está cerca de la temperatura de congelación, en este caso la disminución al final es muy notoria principalmente en el caso de la apertura de válvula al 100%, esto puede deberse a que con esta apertura y con la concentración de 21% de propilenglicol se alcanza la menor temperatura de enfriamiento.

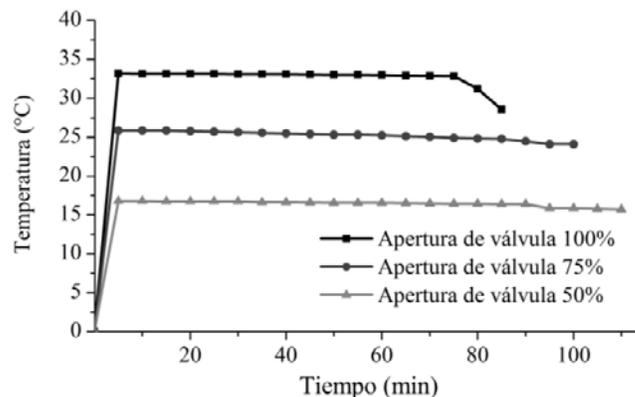


Figura 7: Curva de enfriamiento para nanorefrigerante al 21% de propilenglicol.

En las siguientes tablas se analiza el comportamiento que tiene el refrigerante a base de propilenglicol y agua, sin y con la presencia de nanopartículas de alofán sintético.

Al añadir nanopartículas de alofán en una concentración de 0,5% a una mezcla de 15% de propilenglicol y trabajar con una válvula abierta al 100% la velocidad de enfriamiento aumenta en un

26,87% respecto al refrigerante solo a base de propilenglicol, se llega a una temperatura de congelación de  $-5,4^{\circ}\text{C}$  (Tabla 3).

Tabla 3: Comparación entre refrigerante a base de polipropilenglicol y 15% propilenglicol-alofán usando una válvula abierta al 100%.

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
Velocidad enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	0,22	0,31	0,09
Punto de congelación ( $^{\circ}\text{C}$ )	-4,30	-5,40	-1,10

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de enfriamiento aumenta en un 29,6% alcanzando una temperatura de congelación de  $-5,31^{\circ}\text{C}$  si se trabaja con una mezcla a base de 15% de propilenglicol, 0,5% alofán y una válvula abierta al 75% (Tabla 4).

Tabla 4: Comparación entre refrigerante a base de polipropilenglicol y 15% propilenglicol-alofán usando una válvula abierta al 75%

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
Velocidad de enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	0,21	0,30	0,08
Punto de congelación ( $^{\circ}\text{C}$ )	-4,07	-5,31	-1,10

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

Al añadir 0,5% de alofán al refrigerante con el 15% de propilenglicol y trabajar con una válvula abierta al 50% la velocidad de enfriamiento aumenta en un 26,55% alcanzándose una temperatura de congelación de  $-5,37^{\circ}\text{C}$  (Tabla 5).

Tabla 5: Comparación entre refrigerante a base de polipropilenglicol y 15% propilenglicol-alofán usando una válvula abierta al 50%

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
Velocidad de enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	0,20	0,27	0,08
Punto de congelación ( $^{\circ}\text{C}$ )	-4,00	-5,37	-1,37

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, al trabajar con una concentración de 21% de propilenglicol y 0,5% de alofán con una válvula abierta al 100% la velocidad de enfriamiento aumenta en un 28,54% llegando a una temperatura de congelación de  $-7,5^{\circ}\text{C}$  (Tabla 6).

Tabla 6: Comparación entre refrigerante a base de polipropilenglicol y 21% propilenglicol-alofán usando una válvula abierta al 100%

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
Velocidad de enfriamiento ( $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ )	0,22	0,31	0,09
Punto de congelación ( $^{\circ}\text{C}$ )	-7,19	-7,50	-0,31

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

Con una válvula abierta al 75% y una concentración de 21% de propilenglicol y 0,5% de alofán, la velocidad de enfriamiento se eleva en un 29,6% y se llega a una temperatura de congelación de  $-5,31^{\circ}\text{C}$  (Tabla 7).

Tabla 7: Comparación entre refrigerante a base de polipropilenglicol y 21% propilenglicol-alofán usando una válvula abierta al 75%

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
Velocidad de enfriamiento (°C/min)	0,21	0,27	0,06
Punto de congelación (°C)	-7,22	-7,45	-0,23

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de enfriamiento se eleva en un 18,52% llegando a una temperatura de congelación de -7,39°C al usar una válvula abierta al 50%, una concentración de 21% de propilenglicol y 0,5% de nanopartículas (Tabla 8).

Tabla 8: Comparación entre refrigerante a base de polipropilenglicol y 21% propilenglicol-alofán usando una válvula abierta al 50%

Parámetros	Propilenglicol	Propilenglicol-Alofán	Variación
Velocidad de enfriamiento (°C/min)	0,20	0,24	0,04
Punto de congelación (°C)	-6,69	-7,39	-0,70

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

### 3.3 Capacidad calorífica

La Tabla 9 recoge los valores de las capacidades caloríficas a diferentes concentraciones de propilenglicol y alofán. Se observa que la capacidad calorífica aumenta en un 0,7% al añadir una concentración de 0,5% de nanopartículas de alofán a 15% de propilenglicol. Así mismo, para una concentración de 21% propilenglicol el incremento es de 0,4% en la capacidad calorífica comparada con una solución de propilenglicol sin la presencia de alofán.

Tabla 9: Valores numéricos de la capacidad calorífica

Concentración	Sin alofán	0,5% alofán	Unidad
15% Propilenglicol	717,08	722,51	kJ/°C
21% Propilenglicol	684,30	687,57	kJ/°C

Elaborado por: Autores.  
Fuente: Elaboración propia.

## 4 CONCLUSIONES

En el refrigerante secundario a base de agua y 15% y 21% de propilenglicol se obtuvo una velocidad de enfriamiento de 0,22°C/min mientras que con la presencia de 0,5% de alofán se obtuvo una velocidad de enfriamiento de 0,31°C/min. El punto de congelación alcanzado con la mezcla de agua y propilenglicol al 15% y 21% fue de -4.3°C y -7.19°C respectivamente mientras que la presencia de nanopartículas permitió alcanzar puntos de congelación de -5.4°C y -7,5°C con una apertura de válvula de 100%. La capacidad calorífica de la mezcla de agua y propilenglicol al 15% y 21% fue de 717,1 kJ/°C y 684,3 kJ/°C, respectivamente, la presencia de alofán permitió un ligero incremento alcanzándose valores de 722,5 kJ/°C y 687,6 kJ/°C. De esta manera se pudo comprobar que efectivamente las nanopartículas de alofán permiten mejorar las propiedades térmicas del propilenglicol. El efecto más notorio fue la disminución del tiempo de enfriamiento el cual pasa de 120 minutos con la mezcla de agua y propilenglicol a 80 minutos una vez que se añaden las nanopartículas.

La disminución en el tiempo de funcionamiento del equipo reduce también el consumo de energía, lo que implica un ahorro de dinero al tratarse de un equipo muy utilizado en industrias que requieren enfriar grandes volúmenes.

## AGRADECIMIENTOS

Al Grupo de Investigación y Desarrollo Tecnológico de Energías Renovables (GIDETER) de la ESPOCH.

Al Instituto de Investigaciones de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por financiar el proyecto Análisis de datos de un chiller para determinar las curvas de enfriamiento con el uso de refrigerantes secundarios.

## 5 REFERENCIAS

1. Nair V, Tailor P, Parekh A. Nanorefrigerants: A comprehensive review on its past, present and future. *Les nanofrigorigènes: une synthèse complète de leur passé, présent et future*. *Int J Refrig*. 2016;67:290–307.
2. Leong KY, Ahmad KZK, Chyuan H, Ghazali MJ, Baharum A. Synthesis and thermal conductivity characteristic of hybrid nano fluids – A review. *Renew Sustain Energy Rev*. 2017;75(May 2015):868–78.
3. Dhinesh Kumar D, Valan Arasu A. A comprehensive review of preparation, characterization, properties and stability of hybrid nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev* [Internet]. 2018;81(August 2016):1669–89. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.257>
4. Talib SFA, Azmi WH, Zakaria I, Mohamed W, Mamat AMI, Ismail H, et al. Thermophysical Properties of Silicon Dioxide (SiO<sub>2</sub>) in Ethylene Glycol/Water Mixture for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Cooling Application [Internet]. Vol. 79, *Energy Procedia*. Elsevier B.V.; 2015. 366–371 p. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.504>
5. Said Z, Saidur R. Thermophysical Properties of Metal Oxides Nanofluids. *Nanofluids Thermophys Prop Met Oxides Nanofluids*. 2017;
6. Sanukrishna S, Murukan M, Jose PM. An overview of experimental studies on nanorefrigerants: Recent research, development and applications. *Int J Refrig*. 2018;88:552–77.
7. Xu X, Xu C, Liu J, Fang X, Zhang Z. A direct absorption solar collector based on a water-ethylene glycol based nanofluid with anti-freeze property and excellent dispersion stability. *Renew Energy* [Internet]. 2019;133:760–9. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.073>
8. Liu Z, Yan Y, Fu R, Alsaady M. Enhancement of solar energy collection with magnetic nano fluids. *Therm Sci Eng Prog*. 2018;8(March):130–5.
9. Sanukrishna SS, Jose Prakash M. Thermal and rheological characteristics of refrigerant compressor oil with alumina nanoparticles—An experimental investigation. *Powder Technol* [Internet]. 2018;339:119–29. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.08.003>
10. Saidur R, Leong KY, Mohammad HA. A review on applications and challenges of nanofluids. *Renew Sustain Energy Rev*. 2011;15(3):1646–68.
11. Che Sidik NA, Witri Mohd Yazid MNA, Mamat R. Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. *Renew Sustain Energy Rev*. 2017;75(April 2015):137–44.
12. Li D, Fang W, Feng Y, Geng Q, Song M. Stability properties of water-based gold and silver nanofluids stabilized by cationic gemini surfactants. *J Taiwan Inst Chem Eng*. 2019;97:458–65.
13. Eltaweel M, Abdel-Rehim AA. Energy and exergy analysis of a thermosiphon and forced-circulation flat-plate solar collector using MWCNT/Water nano fluid. *Case Stud Therm Eng*. 2019;14(February):100416.
14. Kim S, Tserengombo B, Choi S, Noh J, Huh S. Experimental investigation of dispersion characteristics and thermal conductivity of various surfactants on carbon based nanomaterial. *Int Commun Heat Mass Transf*. 2018;91(December 2017):95–102.
15. El-salamony RA, Morsi RE. Stable gallium oxide@ silica/polyvinyl pyrrolidone hybrid nanofluids: Preparation, characterization, and photo-activity toward removal of malachite green dye. *J Mol Liq*. 2018;271(1):589–98.

16. Sun B, Zhang Y, Yang D, Li H. Experimental study on heat transfer characteristics of hybrid nano fluid impinging jets. *Appl Therm Eng.* 2019;151(July 2018):556–66.
17. Humnic G, Humnic A. Hybrid nanofluids for heat transfer applications – A state-of-the-art review. *Int J Heat Mass Transf [Internet].* 2018;125:82–103. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.04.059>
18. Sundar LS, Sharma K V., Singh MK, Sousa ACM. Hybrid nanofluids preparation, thermal properties, heat transfer and friction factor – A review. *Renew Sustain Energy Rev [Internet].* 2017;68(August 2016):185–98. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.108>
19. Abidin Z, Matsue N, Henmi T. Validity of Proposed Allophane Model for the Chemical Morphology. *Clay Sci.* 2006;2:267–9.
20. Creton B, Bougeard D, Smirnov K, Guilment J, Poncelet O. Structural Model and Computer Modeling Study of Allophane. *J Phys Chem C.* 2008;112(2):358–64.
21. Henmi T, Wada K. Morphology and composition of allophane. *Am Mineral [Internet].* 1976;61(5–6):379–90. Available from: [http://www.minsocam.org/ammin/AM61/AM61\\_379.pdf](http://www.minsocam.org/ammin/AM61/AM61_379.pdf)
22. Aomine S, Yoshinaga N. Clay minerals of some well-drained volcanic ash soils in Japan. *Soil Sci.* 1955;79(5):349–58.
23. Wada K. Minerals formed and mineral formation from volcanic ash by weathering. *Chem Geol.* 1987;60(1–4):17–28.
24. Wada K. Allophane and Imogolite. In: Dixon JB, Weed SB, editors. *Minerals in Soil Environments.* 2th ed. Madison: Soil science Society of America; 1989. p. 1052–81.
25. Moreno T, Orozco-Cantos L, Cadena A, Vera J. Análisis comparativo de la utilización de refrigerantes alternativos en un chiller. *Dominio las Ciencias.* 2018;4(1):418–33.

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA RUEDA HIDRÁULICA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA

Balseca, Otto<sup>1</sup>; Camacho, Michelle<sup>2</sup>; Naranjo, Washington<sup>3</sup>  
Facultad de Mecánica/ Escuela de Ingeniería Mecánica/ESPOCH/Riobamba/Ecuador  
otto.blaseca@epoch.edu.ec  
michelle.camacho@epoch.edu.ec  
washington.naranjo@epoch.edu.ec

### Resumen-

La energía hidroeléctrica es una de las más usadas a nivel mundial debido a su disponibilidad aproximadamente 8000 horas al año, esto es más que la energía eólica y solar, es por ello que en el presente trabajo se ha diseñado y construido una rueda hidráulica para la generación de energía eléctrica portátil. La rueda hidráulica aprovecha la energía cinética de un flujo de agua, esta energía se transmite por medio de un eje hacia una máquina o un generador, suelen trabajar con saltos hidráulicos muy reducidos o casi nulos. Para el diseño de la rueda se ha basado en una turbina Michell-Banki, debido a su facilidad de construcción y sencillo diseño, lo que la hace muy conveniente para aplicaciones más pequeñas, pero la rueda hidráulica no funciona con flujo cruzado, debido a que el agua pasa en forma tangencial. Para el diseño de la rueda se determinó el caudal, cabezal neto y la demanda eléctrica para la selección del tipo de micro central y turbina más adecuados, para luego seleccionar el diámetro del rodete y las relaciones de velocidades. Con un diámetro de 220 mm, y una velocidad angular de 104.17 rpm se obtuvo una potencia aproximada de 4 W. El diseño prototipo será construido mediante impresión 3D, con PLA (ácido poli láctico), el cual es un material biodegradable proveniente del ácido láctico. Se concluye que la energía es directamente proporcional al caudal, una rueda hidráulica presenta la ventaja de trabajar a bajo flujo.

### Palabras claves-

Energía, hidroeléctrica, rueda hidráulica, Michell Banki

### Abstract-

Hydroelectric energy is one of the most used at a global level due to its availability approximately 8000 hours per year, this is more than wind and solar energy, it is also in the present. generation of portable electric power. The hydraulic wheel takes advantage of the kinetic energy of a water flow, the energy is transmitted by means of a shaft towards a machine or a generator, often they work with very reduced or almost null hydraulic jumps. For the design of the wheel has been based on a turbine Michell-Banki, due to its facility of construction and simple design, which is very convenient for smaller applications, but the hydraulic wheel doesn't work with a cross flow, due to the water passes tangentially. For the design of the wheel, the flow rate, the net head and the electrical demand for the selection of the most suitable micro and turbine type were determined, to then select the impeller diameter and the speed ratios. With a diameter of 220 mm, and an angular speed of 104.17 rpm, an approximate power of 4 W was obtained. The design is converted into a 3D printing, with PLA (polylactic acid), which is a biodegradable material from the acid lactic. It is concluded that the energy is directly proportional to the flow, a hydraulic wheel has the advantage of working under the flow.

### Keywords-

Energy, hydroelectric, water wheel, Michell Banki, 3D printing.

### 1. Introducción

Alrededor del mundo existen personas que no tienen acceso a la energía eléctrica, muchos de ellos viven cerca de ríos o de otras fuentes de agua, por esa razón se han fabricado generadores portátiles que buscan aprovechar la energía cinética del agua, para convertirla en energía eléctrica. Dado que la energía de las aguas está generalmente disponible hasta 8,000 horas por año, mucho más que el viento aproximadamente 1,200 horas al año o solar aproximadamente 1,000 horas al año. (Belyaev, 2015). Sin lugar a dudas, los generadores hidroeléctricos portátiles, proporcionan energía totalmente limpia y evitan en la medida de lo posible la construcción de grandes infraestructuras de generación y distribución de la energía eléctrica. En definitiva, no se trata solo de consumir más eficiente, sino de consumir menos, es decir, desarrollar una conciencia y cultura de ahorro energético y condena del despilfarro, sobre todo en el continente americano que consume el 30,6 % de energía frente a Europa que consume el 27,3 %, según el Banco mundial; además han surgido a partir de que el mundo se ha inundado de aparatos electrónicos, consecuencia del desarrollo de la tecnología como por ejemplo celulares, tabletas, laptops, entre otros, que en realidad representan

consumo energético, y que en su gran mayoría utilizan la energía eléctrica para su funcionamiento puesto que es la forma de energía que interviene en nuestro día a día, como sociedad industrializada y tecnológica (Laura & Morata). Por lo tanto, para que esta sea sostenible es necesario que su generación venga de fuentes renovables. (Constante, 2016) como la hidroelectricidad. En algunos países ya se han fabricado como en: Corea del sur con el nombre de Estream o Enomad I, el dispositivo puede generar de 2.5 a 5 vatios de potencia, cuenta con una batería estándar de ion litio (Luleva, 2016) así mismo pesa 800 g y cuenta con una linterna que también funciona bajo el agua. (Swan, 2016). En Alemania Low cost, el cual puede obtener una potencia de 100 a 150 vatios en una corriente que fluya a una velocidad de 1,5 metros por segundo (Arteaga, 2015). Y en el mismo país, Blue Freedom puede utilizar incluso en las aguas más pequeñas, a una velocidad de flujo de 0,5 metros por segundo, actualmente genera 5 a 8 vatios de potencia, y en un futuro ofrecería un aerogenerador integrado. (Belyaev, 2015)

## 2. Materiales y Métodos

Las turbinas hidráulicas son máquinas que aprovechan la energía cinética y potencial del río para producir rotación que al transferirlo por un eje mueve una máquina o un generador. Las ruedas hidráulicas se han usado desde épocas antiguas para tareas laboriosas. (Vasquez, 2007)

La turbina de corriente libre es un dispositivo mecánico que extrae la energía cinética de una corriente fluida libre, como un río o un canal, y, a través de fuerzas de sustentación y arrastre, la convierte en energía mecánica. (Turbina de la corriente libre para bombeo de agua, 1990)

La energía existente en el agua que fluye o en la que se encuentra almacenada en un nivel apropiado, puede convertirse en potencia mecánica por lo que las turbinas son una forma para usar este tipo de energía. (Suescun, 2007). La "Rueda Hidráulica" describe de manera sencilla una serie de mecanismos orientados a la extracción de potencia mecánica, utilizando como fuente un caudal. Formalmente, se conocen como Turbinas Hidráulicas y bajo su definición se engloban numerosos diseños, no necesariamente asociados a la idea general de rueda.

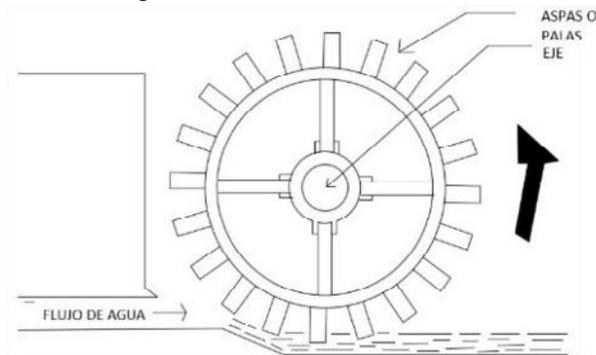


Figura 1: Rueda Hidráulica.

Autor: Heredia, 2011

Una definición formal de turbina considera la variación de la cantidad de movimiento producido en el fluido que acciona la turbina, sea compresible o incompresible. Esta definición sugiere también la manera en que se aborda el análisis de la transferencia de energía efectuada en el mecanismo, el cual debe considerar las características del fluido antes y después de actuar sobre la turbina. Para el aprovechamiento de los recursos hídricos al máximo es necesario buscar alternativas de bajo costo comparadas al de las instalaciones hidroeléctricas convencionales. Para este fin la turbina de flujo cruzado es la que mejor se adecua, debido a su estructura en la generación eléctrica a pequeña escala así como a su diseño sencillo, además de tener un bajo costo de fabricación y mantenimiento. (Chavez-Galarza, 2014) Las turbinas hidráulicas, el flujo de accionamiento corresponde a un caudal de agua, el cual contiene en mayor medida energía cinética, la cual es aprovechada por la turbina para generar potencia en el eje. (Heredia, 2011)

Turbinas de acción o de impulso giran cuando un chorro de agua provenientes de una tobera (boquilla) golpea uno de sus cangilones a velocidades muy altas, en esta la energía del agua se encuentra en forma de energía cinética debido a la velocidad. Turbinas de la reacción actúan ya que el agua se mueve a una velocidad relativamente baja, pero bajo presión, el agua llega al rodete a través de un sistema de distribución

cerrado, es así que la presión se mantiene sobre el rodete. (Suescun, 2007). Para la selección de la turbina adecuada se toma en cuenta la gráfica SALTO-CAUDAL de las distintas turbinas: (Diseño e implementación de una picocentral de generación eléctrica en el sector Pansachi, El Moro, Cuchitingue, 2012)

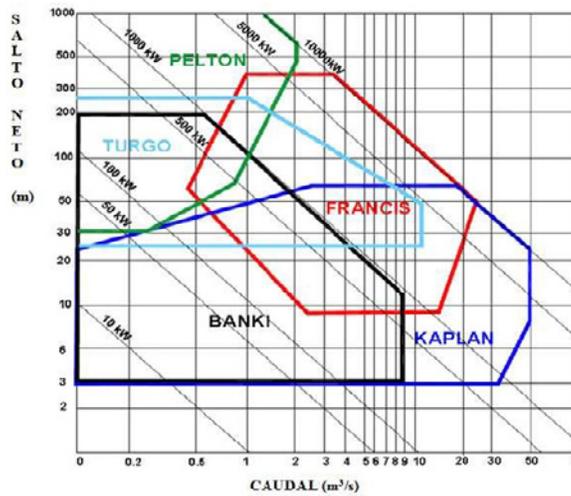


Figura 2: Relación del tipo de turbinas en función del salto y el caudal.

Autor: (Laura, y otros)

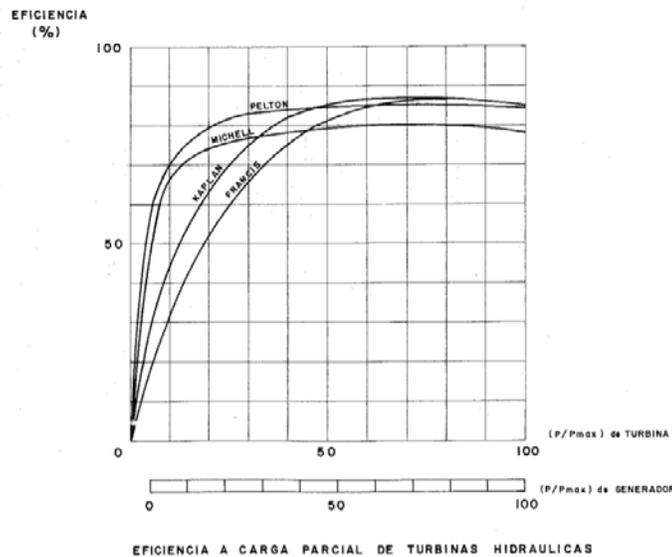


Figura 3: Eficiencia de turbinas.

Autor: (Días, y otros, 2008)

La turbina de flujo cruzado o Michell-Banki es una máquina utilizada principalmente para pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. Sus ventajas principales están en su sencillo diseño y su fácil construcción lo que la hace atractiva en el balance económico de un aprovechamiento a pequeña escala. No obstante, esto no impide que la turbina se utilice en grandes instalaciones. Aunque la turbina de flujo transversal se conoce como una máquina de pequeña escala, existen actualmente máquinas de este tipo de hasta 6 MW. (ITDG)

Una característica resaltante de las ruedas hidráulicas es que suelen trabajar con saltos hidráulicos muy reducidos, o incluso nulos. Este último es el caso de la rueda hidráulica de admisión inferior, sumersión parcial y eje horizontal. Esta rueda opera en la superficie de un corriente libre, en la cual no se presenta desnivel alguno entre la admisión y la salida de agua. Bajo tales circunstancias, la evaluación del

intercambio energético ocurrido en la rueda toma en cuenta el factor más característico que representa al flujo: la velocidad de corriente. (Breve historia de las turbinas hidráulicas, 2011)

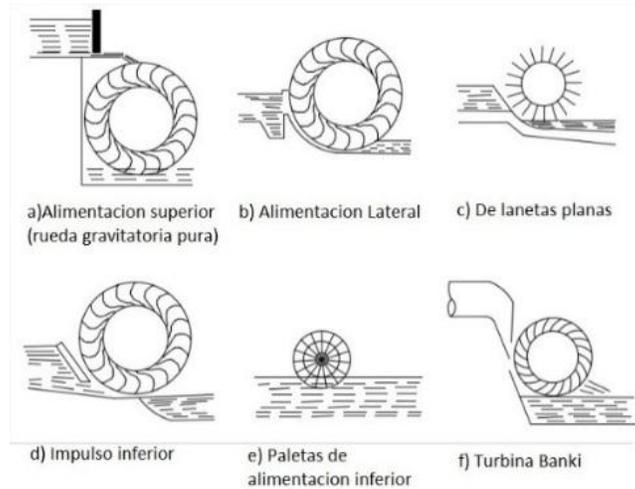


Figura 4: Ruedas hidráulicas de corriente libre.

Autor: (Chavez-Galarza, 2014)

### 2.1 Metodología

El diseño de la microcentral requiere determinar el caudal, cabezal neto y la demanda eléctrica para seleccionar un tipo de micro central y turbina adecuadas. Luego, para diseñar la turbina, se seleccionan un diámetro exterior de rodete y una relación de velocidades de manera que, para valores estándar de velocidad de giro de generadores eléctricos. Para realizar el diseño de la turbina se debe seleccionar el generador, el sistema de transmisión de potencia y demás componentes periféricos de la micro central. (Heredia, 2011)

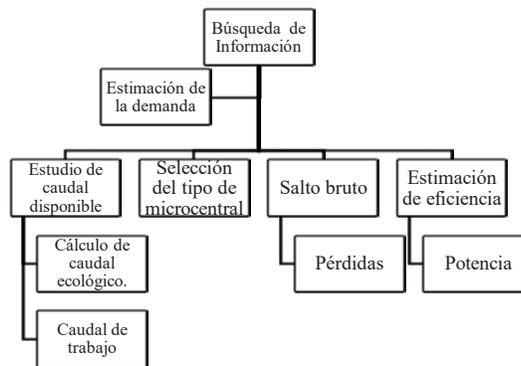


Figura 5: Metodología de Diseño para la Turbina.

Autor: (Córdova, 2011)

### 2.2 Cálculos

Para determinar las dimensiones generales de los principales componentes de la turbina Michell-Banki, se utilizan los resultados obtenidos de los cálculos hidráulicos realizados. Los cálculos hidráulicos desarrollados para este tipo de turbinas se obtienen a partir del análisis de los diagramas de velocidad, los cuales describen la forma en que la componente de velocidad del agua ingresa a la turbina y permiten definir la geometría del inyector y del rotor.

$$v = 1,2 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad \text{Velocidad de entrada}$$

Se utiliza el caudal máximo para el diseño. Se tiene que el caudal en los afluentes es de:

Tabla 1: Caudales

<i>Caudal en los afluentes</i>	$0,117 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$
<i>Caudal máximo</i>	$0,139 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$
<i>Caudal mínimo</i>	$0,110 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$

Elaborado por: Autores

Fuente: (DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA PARA LA CONSERVACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA, 2017)

Fluido	$\mu, \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})'$	Relación $\mu/\mu(\text{H}_2\text{O})$	$\rho, \text{kg}/\text{m}^3$	$\nu, \text{m}^2/\text{s}'$	Relación $\nu/\nu(\text{Hg})$
Hidrógeno	$8,8 \times 10^{-6}$	1,0	0,084	$1,05 \times 10^{-4}$	920
Aire	$1,8 \times 10^{-3}$	2,1	1,20	$1,51 \times 10^{-5}$	130
Gasolina	$2,9 \times 10^{-4}$	33	680	$4,22 \times 10^{-7}$	3,7
Agua	$1,0 \times 10^{-3}$	114	998	$1,01 \times 10^{-6}$	8,7
Alcohol etílico	$1,2 \times 10^{-3}$	135	789	$1,52 \times 10^{-6}$	13
Mercurio	$1,5 \times 10^{-3}$	170	13.580	$1,16 \times 10^{-7}$	1,0
Aceite SAE 30	0,29	33.000	891	$3,25 \times 10^{-4}$	2.850
Glicerina	1,5	170.000	1.264	$1,18 \times 10^{-3}$	10.300

Figura 6: Propiedades del agua

Autor: White, 2004

El diámetro de esta máquina no depende del caudal. Esto se afirma por el hecho de que esta turbina puede trabajar dentro de un amplio rango de velocidades de rotación. De acuerdo con esto el diámetro podrá ser seleccionado en primer término. Muchos autores señalan que para pequeños aprovechamientos hidroenergéticos, los diámetros comúnmente utilizados van desde los 200 mm hasta los 500mm. Lo que se hace frecuentemente es seleccionar el diámetro de los diagramas de estandarización que ofrece la bibliografía disponible y tomar a éste como base del diseño. (ITDG)

Tabla 2: Medidas Rueda

<b>Diámetro</b>	220 [mm]
<b>Radio</b>	110 [mm]

Elaborado por: Autores

Fuente: Elaboración propia basado en la toma de datos.

### Velocidad Angular

$$w = \frac{v}{r} \left[ \frac{\text{rad}}{\text{s}} \text{ ó } \frac{\text{rev}}{\text{min}} \right]$$

Ecuación 1: Cálculo de la velocidad angular.

Donde:

v: velocidad  $\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$

r: radio [m]

Por lo que desarrollando tenemos:

$$w = \frac{1,2 \left[ \frac{m}{s} \right]}{0,110 [m]} \qquad w = 10,90 \left[ \frac{rad}{s} \right] = 104,17 \left[ \frac{rev}{min} \right]$$

**Diagrama de Velocidades**

Los perfiles de los álabes del rodete de una turbina se determinan en base al diagrama de velocidades en cada punto del rodete. Para determinar estos diagramas, es necesario definir la velocidad de salida del agua del inyector, la que se determina en base a la Ecuación de Bernoulli aplicada entre la superficie del reservorio, donde la velocidad del agua es aproximadamente cero, y a la salida del inyector. El prototipo diseñado por Banki supone el empleo de ángulos de ataque de 16°, siguiendo esta recomendación, la mayor parte de las investigaciones han sido realizadas con dicho ángulo. Pero es hasta que Fizuat y Akekar [1989] realizaron experimentos con diferentes ángulos de ataque de concluyen que el ángulo de ingreso con el que se obtiene mayor eficiencia es 24°, contradiciendo lo que supuso el Dr. Donat Banki. La investigación de Aziz y Desai [1993] de la universidad de Clemson pusieron a prueba este resultado y concluyeron que el ángulo de 24 grados es más favorable. (Días, y otros, 2008) Se observa que los puntos máximos de la eficiencia hidráulica son mayores cuanto más pequeños son los valores del ángulo de flujo  $\alpha$ . (Turbina de la corriente libre para bombeo de agua, 1990)

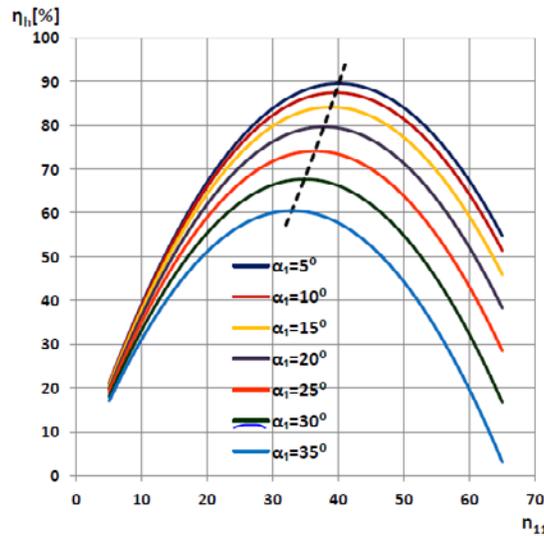


Figura 7: Eficiencia.

Autor: Idénergie

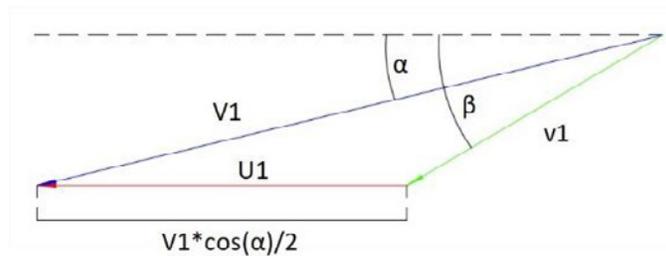


Figura 8: Triángulo de Velocidades.

Autor: (Breve historia de las turbinas hidráulicas, 2011)

## Ángulo De Las Palas( $\beta_1$ )

Para una máxima eficiencia el ángulo del alabe debería ser igual a  $\beta_1$ .

$$\tan \beta_1 = 2 * \tan \alpha$$

Ecuación 2: Fórmula del ángulo del álabe.

Se asume que:

$$\alpha = 16^\circ$$

$$\beta_1 = 29^\circ 30'$$

$$\mu_1 = \frac{1}{2} * v_1 * \cos \alpha$$

Ecuación 3: Fórmula en función de la cantidad de energía.

$$v_1 = 1,2 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$\alpha = 16 [^\circ]$$

$$\mu_1 = \frac{1}{2} * 1,2 \left[ \frac{m}{s} \right] * \cos 16^\circ = 0,5767 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

## Transferencia de Energía

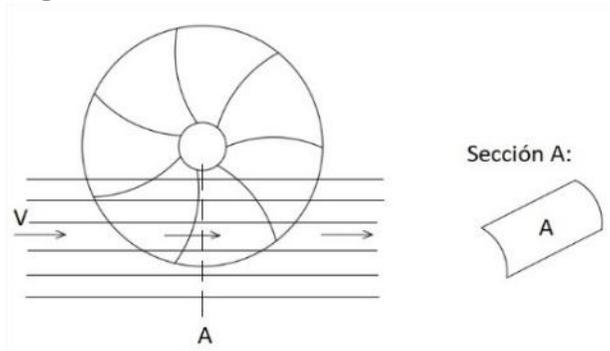


Figura 9: Flujo Incidente sobre rueda hidráulica.

Autor: (Días, y otros, 2008)

Para evaluar el intercambio energético que existe entre el caudal de agua y la turbina, considerar todos los factores involucrados resultaría muy complejo por lo cual se plantean relaciones sencillas.

## Fuerza Hidráulica

$$F = \rho \cdot Q \cdot v$$

Ecuación 4: Fórmula fuerza hidráulica.

$$F = 999,97 \left[ \frac{kg}{m^3} \right] 0,139 \left[ \frac{m^3}{s} \right] * 1,2 \left[ \frac{m}{s} \right] = 166,8 [N]$$

## Torque

$$T = F * r$$

Ecuación 5: Fórmula torque

$$T = 166,8 [N] * 0,15 [m] = 25,02 [Nm]$$

## Potencia

$$P = 0,41 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Ecuación 6: Fórmula Potencia mecánica en la rueda.

$$A = \text{espesor} \cdot \text{longitud}$$

Ecuación 7: Fórmula área sumergida.

$$\text{Espesor} = 0,042 \text{ m}$$

$$\text{longitud} = 0,110 \text{ m}$$

$$A = 0,042 \text{ m} \cdot 0,110 \text{ m} = 4,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$P = 0,41 \cdot (999,97 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]) \cdot (4,62 \cdot 10^{-3} [\text{m}^2]) \cdot (1,2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right])^3$$

$$P = 3,27 \text{ [W]}$$

El factor 0,41 es un coeficiente análogo a la eficiencia, en relación a un óptimo teórico. Esta expresión es muy similar a la relación planteada para potencia ideal, de uso extendido en aerogeneradores:

$$P_{ideal} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

Ecuación 8: Fórmula Potencia mecánica ideal en la rueda.

$$\rho P_{ideal} = 0,5 \cdot (999,97 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]) \cdot (4,62 \cdot 10^{-3} [\text{m}^2]) \cdot (1,2 \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right])^3$$

$$P_{ideal} = 3,99 \text{ [W]}$$

### 2.3 Dimensionamiento de la Turbina

Generalmente el espesor de los alabes se asume y posteriormente se realiza un chequeo de esfuerzo, considerándolo como una viga empotrada en sus extremos. (Manual de Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para pequeñas centrales Hidroeléctricas). Se selecciona el número de alabes necesarios para el rodete. Estudios recientes demuestran que el número de alabes no depende del tamaño del rodete. La selección del número de alabes se realizará en base al diámetro y las condiciones de funcionamiento de la turbina, es decir, altura y caudal. Se deberá tener en cuenta que un reducido número de alabes provocará pulsaciones en la generación de la potencia, y un número elevado producirá una aceleración de vena fluida con el consiguiente aumento de las pérdidas y el efecto de reja. (Días & Chaves, 2008). Según investigaciones de A. Ulku y H. Olgun existe un número óptimo de álabes. En la siguiente tabla se transcriben los resultados de diferentes investigaciones reflejadas en la literatura.

Tabla 3: Número óptimo de álabes.

Referencia	$\frac{D}{d}$	$\frac{D}{B}$	Z	$\eta\%$
YOKOHAMA(1985)JAPON	0,66	4,25	26	80,60
VIGM(1986)CCCP	0,63	3,00	24	78,00
GANZ(1984)HUNGRIA	0,66	1,00	30	75,00
ALABAMA(1983)USA	0,66	0,25	20	75,00
RESITA(1983)RUMANIA	0,66	1,28	24	73,00
KTU(1987)TRAZBON TURKIA	0,54	0,81	24	71,30
OREGON(1949)USA	0,66	1,09	20	68,00
VDI(1981)ETIOPIA	0,67	3,26	36	66,00
LOS ANDES (1973) COLOMBIA	0,62	1,87	27	60,60
ODTU(1985)ANKARA TURKIA	0,83	1,44	30	55,50

Elaborado por: *Los Autores*  
Fuente: *Días & Chaves, 2008*

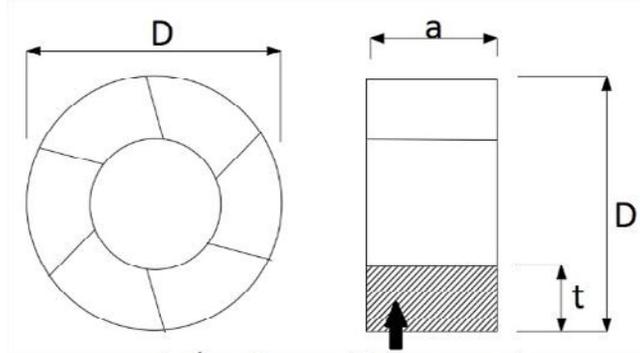
De esta tabla se desprende que el número óptimo de álabes está entre 24 y 30. Se adoptó una proporción sugerida para ruedas hidráulicas [Tokashiki, 1989], enunciada así:

$$\text{Número de paletas} = \text{Diámetro exterior} * 8$$

Ecuación 9: Fórmula número de paletas.

$$\text{Número de paletas} = 2 * 8 = 16 \text{ paletas}$$

Estas expresiones toman en cuenta el área sumergida transversal proyectada del álabe (o paleta) sobre la que incide el agua. Además, consideran la velocidad promedio del flujo.



A: Área Sumergida Proyectada

Figura 10: Flujo incidente sobre Rueda Hidráulica

Autor: (Heredia, 2011)

El mismo autor [Tokashiki, 1989] recoge las siguientes recomendaciones:

$$0,025 < \frac{t}{D} < 0,125$$

Ecuación 10: Fórmula para cálculo de álaves,

$$a < \frac{D}{2}$$

Ecuación 11: Fórmula para cálculo de álaves.

La ecuación 10 presenta un rango empírico adoptado históricamente por los fabricantes de ruedas hidráulicas, asociado a condiciones de estabilidad. La ecuación 11 expresa los problemas estructurales que se pueden generar con ruedas muy anchas. En realidad, ambas restricciones pueden salvarse con una adecuada selección de materiales y dimensiones, acompañados del correspondiente análisis estructural. Puesto que el enfoque de este trabajo es el aspecto energético, no se adentrará más en tales aspectos constructivos.

Tabla 4: Datos

Datos	Valor
Diámetro exterior	220[mm]
Altura de álabe	42 [mm]
Ancho de álabe	120[mm]

Elaborado por: Autores

Fuente: Elaboración propia basado en la toma de datos.

Tomando en cuenta los datos de la rueda:

$$\frac{t}{D} = \frac{42 \text{ [mm]}}{220 \text{ [mm]}} = 0,1909$$

$$0,025 < \frac{t}{D} < 0,125$$

0,025 < 0,1233 < 0,1909 (si cumple con la relación)

$$a < \frac{D}{2}$$

## 2.4 Materiales

El ácido poli-láctico es un polímero biodegradable derivado del ácido láctico. Es un material altamente versátil, que se hace a partir de recursos renovables al 100%, como son el maíz, la remolacha, el trigo y otros productos ricos en almidón. Este ácido tiene muchas características equivalentes e incluso mejores que muchos plásticos derivados del petróleo, lo que hace que sea eficaz para una gran variedad de usos. El PLA es un polímero versátil que tiene muchas aplicaciones, incluyéndose en la industria textil, en la industria médica y sobretodo en la del empaquetado.

Dentro de la industria textil, son conocidas las aplicaciones del PLA para la creación de telas empleadas en la tapicería, la elaboración de trapos y la confección de toldos y cubiertas resistentes a la luz U.V. El PLA se ha convertido en un material muy importante en la industria médica, donde lleva funcionando más de 25 años. Por sus características el PLA se ha convertido en un candidato ideal para implantes en los huesos o en los tejidos (cirugía ortopédica, facial, de pecho, abdomen). (EIS, 2017)

### 3. Resultado y Discusión

Los resultados obtenidos durante la etapa de pruebas nos dan como resultados a distintos caudales su velocidad aumentara, por lo tanto, aumentara su potencia permitiéndonos generar a un  $Q = 7 \frac{lt}{seg}$  una potencia de 5,46 Watts, permitiéndonos dar el voltaje necesario para cargar un celular. Para evaluar el intercambio energético que existe entre el caudal de agua y la turbina, considerar todos los factores involucrados. Su velocidad angular variara con respecto al caudal y al área sumergida.

### Datos Analizados

Tabla 5: Caudal Vs Potencia Mecánica

<b>Potencia Mecánica(W)</b>	0,07	0,31	0,63	0,86	1,272	1,56	1,826	2,338	3,66	5,463
<b>Caudal (lt/seg)</b>	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7

Elaborado por: Autores

Fuente: Elaboración propia basado en la toma de datos Laboratorio de Mecánica de Fluidos

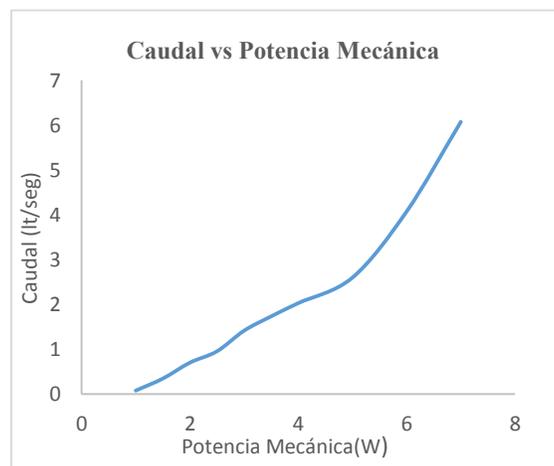


Figura 11: Potencia Mecánica Generada

Autor: Autores

En la Figura 11 observamos como la potencia aumenta con respecto al caudal esto nos quiere decir que ha mayor caudal mayor potencia obtenida en el generador.

### Potencia Eléctrica

$$P_{Eléctrica} = \frac{P_{Mecánica}}{\eta}$$

Ecuación 12: Fórmula para cálculo de la potencia eléctrica.

Donde:

$P_{Mecánica}$ : Potencia Mecánica[W]

$P_{Eléctrica}$ : Potencia Eléctrica[W]

$\eta$ : Eficiencia

Tabla 5: Caudal Vs Potencia Eléctrica

<b>Potencia Eléctrica (W)</b>	0,08	0,35	0,7	0,95	1,414	1,73	2,029	2,6	4,07	6,07
<b>Caudal (lt/seg)</b>	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	5	6	7

Elaborado por: Autores

Fuente: Elaboración propia basado en la toma de datos Laboratorio de Mecánica de Fluidos.

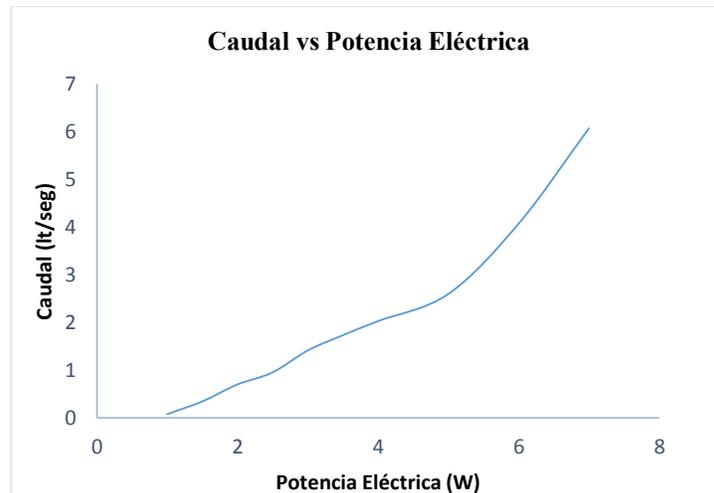


Figura 12: Potencia Eléctrica Generada

Autor: Autores

En la Figura 12 la potencia eléctrica generada por la rueda hidráulica será mayor ya que dependerá de la eficiencia del motor, para estos datos se tomó una eficiencia de 0,45.

### Análisis en Programas

Para el análisis de nuestra rueda hidráulica procedimos a utilizar dos programas diferentes, los cuales nos arrojaron los siguientes resultados:

- ANSYS

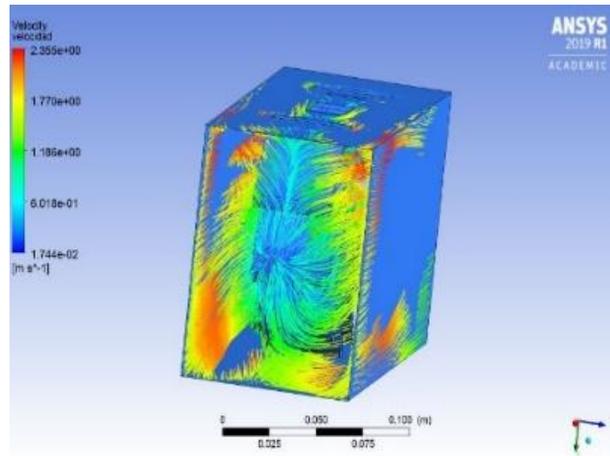


Figura 13: Análisis velocidades (ANSYS).

Autor: Autores

En la Figura 13 observamos el análisis del comportamiento del fluido a través de la rueda hidráulica, en la cual se observa que la velocidad de salida aumentara con respecto a la de entrada, por lo tanto esta aumentara de acuerdo al aumento de caudal .Su velocidad aumentara desde  $0,0174 \frac{m}{s}$  a  $2,35 \frac{m}{s}$  en la salida de la paleta.

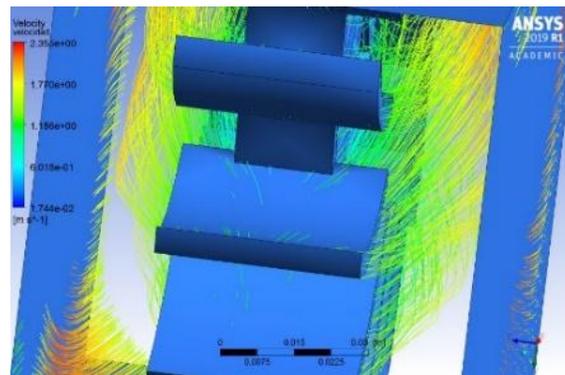


Figura 14: Comportamiento del agua en la pala de la rueda.

Autor: Autores

En la Figura 14 se observa el comportamiento del agua sobre el área sumergida, es así que en esta área aumentará su velocidad, esta área será el área sumergida. Además, la velocidad en la paleta variara en el rango de  $1,18 \frac{m}{s}$  a  $1,77 \frac{m}{s}$  debido a la turbulencia del fluido.

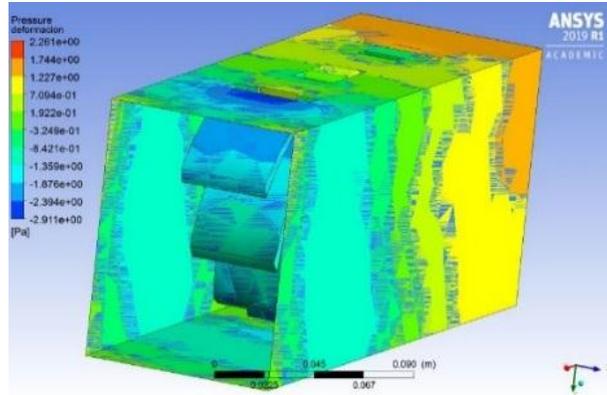


Figura 15: Análisis de Presión en ANSYS.

Autor: Autores

En la Figura 15 se observa la variación de la presión en la rueda hidráulica, en la entrada del fluido se observa una presión de  $-1,35 Pa$ , la cual será menor a la presión en la salida del fluido de  $1,744 Pa$ , esto dependerá del volumen geométrico ocupado por el fluido en la rueda.

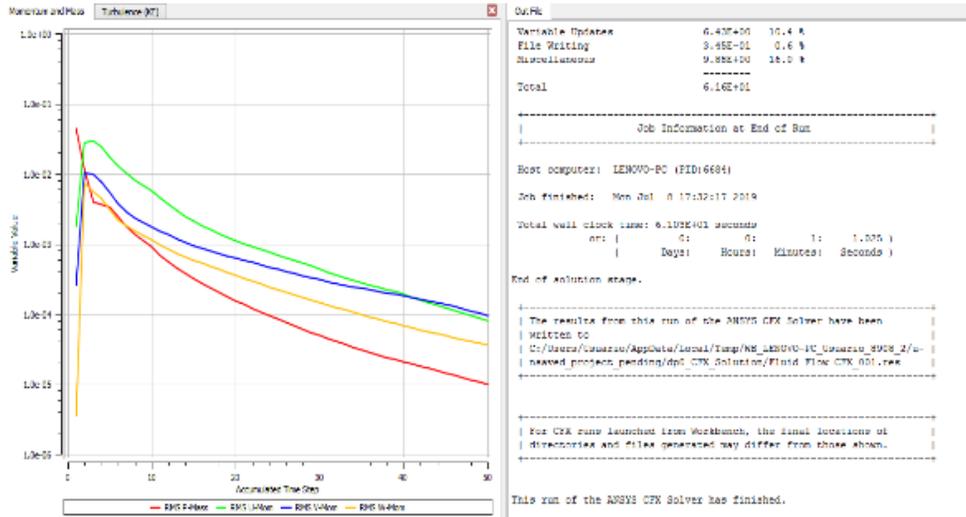


Figura 16: Tabla generada en ANSYS.

Autor: Los Autores

En la Figura 16 se observan los resultados de las iteraciones de temperatura, velocidad y presión de la rueda hidráulica.

**4. Conclusiones**

- Se concluye notablemente que, al aumentar el caudal de inyección de agua sobre los álabes, las revoluciones de esta se incrementan proporcionalmente, lo cual da un indicio pleno de la aplicación del dispositivo diseñado.
- Para el diseño del elemento rotativo, se seleccionó una rueda hidráulica ya que trabaja con saltos hidráulicos muy reducidos o incluso nulos, siendo éstos muy beneficiosos para la configuración del diseño.
- El diseño de la turbina se basó bajo el principio de rueda hidráulica, pero enfocado a una turbina Michell-Banki, de flujo cruzado para obtener mejores resultados en la transmisión de energía.
- La grafica obtenida permite observar como el caudal aumenta directamente con la potencia generada.

- Al momento de seleccionar el número de alabes se debe tomar en cuenta que un reducido número de alabes provocará pulsaciones en la generación de potencia y número elevado producirá un aumento en las pérdidas, se evidencia que las 16 alabes que se tomaron están dentro del rango óptimo.
- Es importante recalcar que, al realizarse las pruebas respectivas, se notó que al sumergirse un área mayor del alabe, se producirá turbulencia debido a la geometría del diseño de la rueda hidráulica, por lo que es recomendable que se sumerja únicamente el área del alabe, para no tener inconvenientes y pérdidas de transferencia de energía.
- Se comenzó a generar energía a partir de caudales de  $Q = 6,5 \frac{lt}{seg}$  por lo cual se debe tomar en cuenta que el lugar en que se sumerja deberá tener caudales mayores o iguales al anteriormente mencionado.
- Se usó un power bank de 2600 mAh, su carga completa se da en 3 horas, por lo tanto, se debe tomar en cuenta que hay que vencer el momento de inercia del motor y el existente para el diseño de la rueda hidráulica, se cargara en un mayor tiempo debido a la transformación de la energía mecánica a eléctrica en el río. Para una carga más rápida, hay que tomar en cuenta varios factores como que el caudal del río sea elevado o aumentar el área sumergida de la aleta.
- En las pruebas hechas en el río, la estructura que contiene la rueda hidráulica debe tener una gran estabilidad, es decir que el peso debe estar completamente equilibrado, puesto que, si no cumple esto, la rueda se volteara y no generara energía.

## 5. Referencias

- (1) Acuña, J. (21 de Septiembre de 2017). *Plantas Eléctricas*. Obtenido de Plantas Eléctricas : <https://www.stmeu.com/mantenimientos-y-reparaciones/rendimiento-en-los-generadores-electricos/>
- (2) Arteaga, S. (13 de 10 de 2015). Computerhoy. Obtenido de Computerhoy: [https://computerhoy.com/noticias/life/esta-turbina-low-cost-genera-electricidad-agua-35387?fbclid=IwAR0uXUF6FmpCmSht\\_vM0z\\_Zmh5DJDMHbtYs2-dkmdAJvxZz5eIpk-AAACtk](https://computerhoy.com/noticias/life/esta-turbina-low-cost-genera-electricidad-agua-35387?fbclid=IwAR0uXUF6FmpCmSht_vM0z_Zmh5DJDMHbtYs2-dkmdAJvxZz5eIpk-AAACtk)
- (3) Ballestin, A. (04 de 2010). [www.engadget.com](http://www.engadget.com). Obtenido de <https://www.engadget.com/es/2010/04/20/bourne-energy-bpp-2-un-generador-hidroelectrico-portatil-para-l/>
- (4) Belyaev, D. (31 de 03 de 2015). Metro World News. Obtenido de Metro World News: <https://www.metro.us/lifestyle/blue-freedom-portable-generator-uses-water-to-power-smartphone/zsjoce---gaemin9bow9m>
- (5) Cadena, N., & Tipan, D. (2012). Diseño e implementación de una picocentral de generación eléctrica en el sector Pansachi, El Moro, Cuchitingue,.
- (6) Chavez-Galarza, M. A. (2014). Chavez-Galarza, Michael A.
- (7) Constante, J. (03 de 08 de 2016). ¿ Cómo se genera energia electrica en el Ecuador ? el télegrafo. Obtenido de <https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/punto/1/como-se-genera-la-energia-electrica-en-ecuador>
- (8) Córdova, R. (2011). Breve historia de las turbinas hidráulicas.
- (9) Días, M., & Chaves, Y. (2008). Propuesta de diseño de una turbina Banki en la PCH Cutumay Camones.
- (10) Dormehl, L. (28 de 11 de 2016). DIGITAL TRENDS . Obtenido de DIGITAL TRENDS : <https://www.digitaltrends.com/home/portable-river-turbine/>
- (11) EIS. (27 de 05 de 2017). PLA. Obtenido de PLA: <http://www.eis.uva.es/~biopolimeros/alberto/pla.htm>
- (12) Heredia, L. (26 de 05 de 2011).
- (13) idénergie. (s.f.). idénergie. Obtenido de <http://idenergie.ca/en/riverturbine-2/>
- (14) ITDG, S. P. (s.f.). SOLUCIONES PRACTICAS ITDG. Obtenido de SOLUCIONES PRACTICAS ITDG: [www.solucionespracticas.org.pe](http://www.solucionespracticas.org.pe)
- (15) Laura, J., & Morata, M. (s.f.). Termodinámica y Energías. Energías Renovables. España : Universitat Oberta de Catalunya.
- (16) Lomas, N. (01 de 01 de 2014). Techcrunch. Obtenido de Techcrunch: <https://techcrunch.com/2013/11/22/hydrobee/>
- (17) Luleva, M. (16 de 08 de 2016). The Green Optimistic. Obtenido de The Green Optimistic: <https://www.greenoptimistic.com/estream-portable-water-turbine-20160816/#.XJZgcZhKjcc>
- (18) Madrigal, A. (03 de 01 de 2010). [www.wired.com](http://www.wired.com). Obtenido de <https://www.wired.com/2010/03/backpack-hydroelectric-plant/>
- (19) Manual de Diseño Estandarización y Fabricación de Equipos para pequeñas centrales Hidroeléctricas (Vol. 1). (s.f.).
- (20) Mendoza, B. (2017). DIAGNÓSTICO Y PROPUESTA PARA LA CONSERVACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO CHIBUNGA.
- (21) Serván, R. (1990). Turbina de la corriente libre para bombeo de agua.

- (22) Suescun, I. (25 de 08 de 2007). CENTRALES HIDRAULICAS. Obtenido de CENTRALES HIDRAULICAS.
- (23) Swan, A. (13 de 12 de 2016). Off-Grid Power Boom. Obtenido de Off-Grid Power Boom: <http://offgridpowerboom.com/esteam-power-generator/>
- (24) Vasquez, J. (01 de 2007). MICRO-HIDROELÉCTRICA TIPO MICHELL BANKI,. MICRO-HIDROELÉCTRICA TIPO MICHELL BANKI,. GUATEMALA.
- (25) Tokashiki L., (1989). Bombeo de agua utilizando ruedas hidráulicas, Tesis, PUCP, Lima.
- (26) White, F. (2004). *Mecánica de Fluidos*. Madrid: Mc Graw Hill.

## TURBOCOMPRESORES: ANÁLISIS Y SELECCIÓN

Balseca, Otto <sup>1</sup>; Hidalgo, Javier <sup>2</sup>; Tenemaza, Sebastián <sup>3</sup>

1. Escuela de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
2. Escuela de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
3. Escuela de Ingeniería Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

otto.balseca@epoch.edu.ec  
eduardo.hidalgo@epoch.edu.ec  
edwin.tenemaza@epoch.edu.ec

### RESUMEN

La presente investigación tiene como objetivo mejorar el desempeño en motores de combustión interna mediante la adecuada selección de un turbocompresor partiendo de la problemática de la pérdida de eficiencia en motores convencionales. La metodología utilizada para la experimentación se fundamentó en un análisis cuantitativo de su eficiencia y un posterior análisis descriptivo, lo cual permitió identificar las variables a programar, obteniéndose resultados muy favorables. Se logró la corrección del flujo másico aumentando la relación de compresión y posteriormente compararlas con las fichas de catálogo de fabricantes, obteniendo una coincidencia del 85%. Se espera que esta programación se utilice como medio de técnica empírica para la selección correcta de un turbocompresor y aplicación como método didáctico de enseñanza aprendizaje.

Palabras claves: Turbolag, turbocompresor, flujo másico.

### ABSTRACT

This research aims to improve the performance of internal combustion engines by properly selecting a turbocharger based on the problem of loss of efficiency in conventional engines. The methodology used for experimentation was based on a quantitative analysis of its efficiency and a subsequent descriptive analysis, which allowed identifying the variables to be programmed, obtaining very favorable results. Mass flow correction was achieved by increasing the compression ratio and then comparing them with the manufacturer's catalog cards, obtaining a 85% match. It is expected that this programming will be used as a means of empirical technique for the correct selection of a turbocharger and application as a teaching method of teaching learning.

Key words: Turbolag, turbocharger, mass flow

## 1 INTRODUCCIÓN

Los motores a combustión interna representan las maquinas térmicas de mayor complejidad en la actualidad, no obstante, su eficiencia energética ronda el 25 por ciento en los motores a gasolina y hasta el 30 por ciento en los motores a diésel (Crane, 2010). El ciclo al cual operan dichas maquinas no ha sido modificado desde su concepción, no obstante, todos los esfuerzos en la mejora que se han aplicado a los motores han sido estrictamente para incrementar dichos valores referentes a la eficiencia. (Cengel, 2007).

Según (Kates, 2015), una de las tendencias actuales en el diseño de los motores está comprendida por las técnicas de downsizing, las cuales comprenden una filosofía de diseño representada por la reducción de las dimensiones de los motores sin pérdidas de la potencia entregada por los mismos, principalmente se ha establecido una reducción en la cilindrada, lo cual se traduce en una disminución de la contaminación y el consumo de combustibles. (Cárdenas León, 2013), afirma que dichas técnicas presentan varias limitaciones

de carácter tecnológico, las cuales han sido subsanadas con la utilización y mejora de los turbocompresores centrífugos, ya que, en algunos casos, dichos dispositivos pueden incrementar la potencia del motor hasta en un 40 por ciento sin incrementar la cilindrada o el consumo. (Belmonte, 2018).

(García, 2015) indica que hoy en día la gestión electrónica de los motores es muy avanzada, ya que, de forma autónoma, se controla muchos parámetros del motor que mejoran la eficiencia de este, modificándose de manera progresiva y constante la configuración de sus componentes, en base a características del combustible, comportamiento de la conducción, demanda de potencia e incluso, condiciones ambientales. (Moran, 2014) asegura que resulta pertinente integrar los controles sofisticados de la gestión del motor con las tecnologías actuales de los turbocompresores, como es el caso de turbocompresores de geometría variable, para alcanzar una mejor adaptabilidad del motor a diferentes entornos, siendo así que en nuestro país por su diversidad topográfica existe una gran diferencia de la presión atmosférica al desplazarse por zonas de diferentes altitudes. (Marta Muñoz, 2011).

Según (HUERA, 2015) la utilización de turbocompresores de geometría variable o de geometría fija dentro de los automotores ensamblados en Ecuador creció entre un 20 y 25 por ciento, respecto de los anteriores años, con lo cual el sistema de turbocompresor de geometría variable o de geometría fija en los futuros años se introducirá al mercado en un 80 por ciento respectivamente tanto en automotores a gasolina como automotores a diésel. (PULKRABEK, 2016).

El presente artículo tiene la finalidad de mostrar una herramienta informática para la selección empírica de un turbocompresor en un automóvil a una presión y temperaturas ambiente, relacionado dos variables y comparándolas con las propuestas en catálogos técnicos.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

En vista a que el principal objetivo que se buscó dar cumplimiento en la ejecución de la presente investigación estuvo enmarcado en la formulación teórica, a través de la aplicación de un software especializado y la recolección de datos por observación directa de las condiciones atmosféricas de diferentes regiones del país, de una solución mecánica a la pérdida de potencia registrada en los motores a combustión interna que operan con ciclo de Otto a razón del tránsito en zonas de elevación sobre el nivel de mar considerable, característica propia de la topografía del Ecuador, por medio de la implementación de un turbocompresor, se estableció una tipología de investigación de carácter cuantitativo y con un alcance descriptivo, en vista a que no se presentaron conocimientos sólidos a la problemática en mención dentro del contexto nacional en la construcción de los antecedentes, por ende resultó pertinente iniciar con la evaluación descriptiva (alcance de la investigación) de la solución establecida, es decir, instituir los valores teóricos resultantes de la implementación de un turbocompresor para la compensación de la pérdida de potencia a razón de la variación de la presión atmosférica (y las subsecuentes variaciones en las características del aire de admisión) en los motores de combustión interna que permitieron verificar la validez de la propuesta (implementación del turbocompresor y la tipología del mismo), por medio de la aplicación de un software especializado y el modelamiento el fenómeno mecánico estudiado, lo cual se ajusta a los lineamientos experimentales referentes a las investigaciones de orden descriptivo.

Para la realización de la siguiente investigación se tomó como datos principales las temperaturas promedio en las diferentes ciudades del Ecuador, así como su altitud respectiva, teniendo una base de datos establecida se procedió a la programación del software el mismo que se lo realizó en una hoja de cálculo de Excel, con las siguientes ecuaciones y variables que se describen a continuación.

### **2.1 Cálculo del gasto másico**

El aumento de la densidad a la entrada del motor permite aumentar el gasto másico del aire, o de mezcla, para cilindradas y rendimientos volumétricos específicos, mediante la ecuación.

$$\dot{m} = n_v V_T \rho_a n / 2$$

Ecuación 1. Gasto másico

Donde:

$\dot{m}$ : Flujo másico [kg/s]

$n_v$ : Rendimiento volumétrico

$V_T$ : Volumen teórico [m<sup>3</sup>]

$\rho_a$ : Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]

$n$ : Número de revoluciones por minuto [RPM]

## 2.2 Cálculo de la presión media efectiva

Según, la principal ventaja que se obtiene de la compresión del aire de entrada al motor consiste en el aumento de la potencia para una determinada cilindrada, así logrando un incremento significativo de la potencia específica y la presión media efectiva.

$$pme = \frac{N_e}{V_T n / 2}$$

Ecuación 2. Presión media efectiva

Donde:

$pme$ : Potencia media efectiva [bares]

$N_e$ : Potencia efectiva [Newton metro]

$V_T$ : Volumen teórico [m<sup>3</sup>]

$n$ : Número de revoluciones por minuto [RPM]

## 2.3 Cálculo para el gasto másico corregido

(Prof.F.Payri, 2011), indica que el gasto másico corregido está en función de la presión atmosférica a la cual se encuentre el ambiente, ya que esto generara una mayor o menor cantidad de oxígeno presente en el proceso de combustión, con lo cual se realiza una pequeña corrección con la siguiente formula:

$$\dot{m} = \frac{ma}{\frac{\sqrt{\frac{T_{atm}}{T_{ref}}}}{\frac{P_{atm}}{P_{ref}}}}$$

Ecuación 3. Gasto másico corregido

Donde:

$ma$ : Flujo másico [lb/min]

$T_{atm}$ : Temperatura Atmosférica [°K]

$T_{ref}$ : Temperatura de Referencia [°K]

$P_{atm}$ : Presión Atmosférica [bares]

$P_{ref}$ : Presión de Referencia [bares]

## 2.4 Cálculo para la potencia efectiva

La fuerza de la explosión aplicada a la biela y transmitida por ésta al codo del cigüeñal para hacerle girar, produce un esfuerzo de rotación que se conoce con el nombre de "par motor". Así pues, el par motor es un esfuerzo de giro. (Kates, 2015).

$$Ne = ma \times Fr \times Fe \times Hc \times \eta_e$$

Ecuación 4. Potencia efectiva

Donde:

$ma =$  Flujo másico [kg/s]

$Fr =$  Rendimiento Mecánico

$Hc =$  Poder Calorífico [kJ/kg]

$\eta_e =$  Rendimiento efectivo

## 2.5 Cálculo para el torque efectivo

El torque efectivo en el rango medio de la escala de las revoluciones del motor, eso equivale que, entre más torque, mejor es la respuesta de aceleración y recuperación de la aceleración del motor. Un motor con muchos caballos y bajo torque requieren que la aguja del tacómetro esté en la parte alta del mismo para sentir un desempeño adecuado. Por el contrario, un motor de alto torque por lo general no va acompañado de muchos caballos y el rango de funcionamiento en la escala del tacómetro suele ser bajo o no mayor al 5.000 rpm. (Marta Muñoz, 2011).

$$Me = \frac{\frac{Ne}{2}}{n \times 60 \times 1000 \pi}$$

Ecuación 5. Torque efectivo

Donde:

$Ne =$  Potencia efectiva [kW]

$n =$  número de revolucione [RPM]

## 3 RESULTADOS

Como resultados obtenidos se tiene los siguientes datos:

El flujo másico corregido en la zona de Riobamba para un motor convencional de 2000 cm<sup>3</sup> a una temperatura promedio de 17 °C y una presión atmosférica media de 0,7173 atm en el régimen máximo de 5000 RPM se obtiene 0,128 kg/s y para un régimen mínimo de 700 RPM se obtiene 0,012 kg/s.

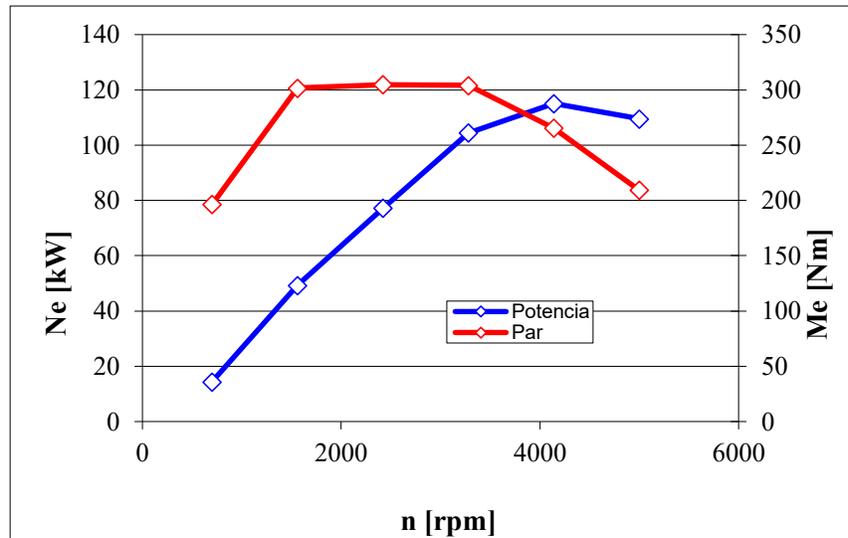


Figura 1. Par motor y Potencia vs RPM

Como se muestra en la figura 1 la presión media efectiva medida en el mismo motor de 2000 cm<sup>3</sup> a la misma presión y temperatura, para un régimen máximo de 5000 RPM es de 13,14 bares y para un régimen mínimo de 700 RPM es de 12,33 bares.

Dándonos a la idea que en la intersección de la gráfica indica la elasticidad del motor, este concepto es conocido como la potencia a bajo y medio régimen, en relación a la que da el motor en alto régimen. La elasticidad es, por tanto, una proporción, que se ve reflejada en la sensación se tiene al momento de conducir, por tanto, entre más elástico sea un motor menor cambios de marcha o aceleraciones tendremos que realizar, siendo una conducción mas placentera.

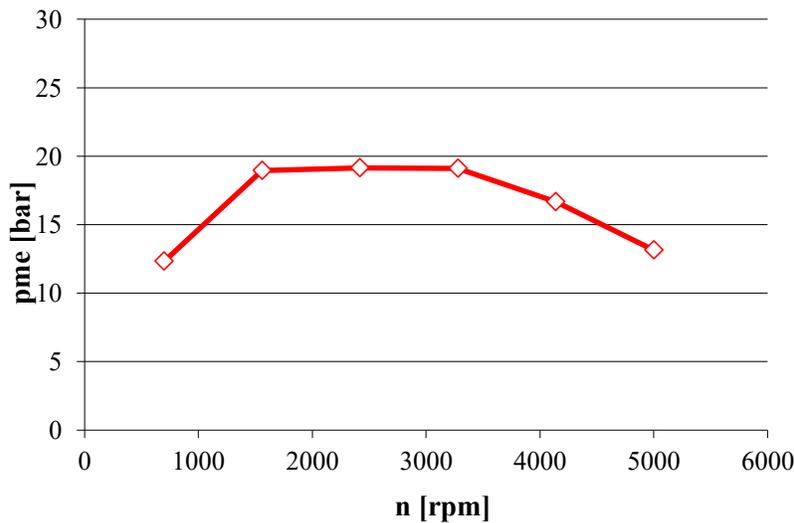


Figura 2. Presión media efectiva vs RPM.

En la figura 2 se puede observar que la presión dentro de la cámara de combustión es de 19,64 bares lo cual nos indica que el turbo seleccionado para nuestro motor esta dentro de los parámetros de seguridad

requeridos, ya que la normativa dicta que la presión interna de la cámara de combustión no debe ser mayor de 20 bares.

Para la selección empírica de nuestro turbo con los datos anteriormente obtenidos se procedió a comparar la gráfica de la presión máxima (relación de compresión), frente al gasto másico corregido obteniendo la siguiente gráfica:

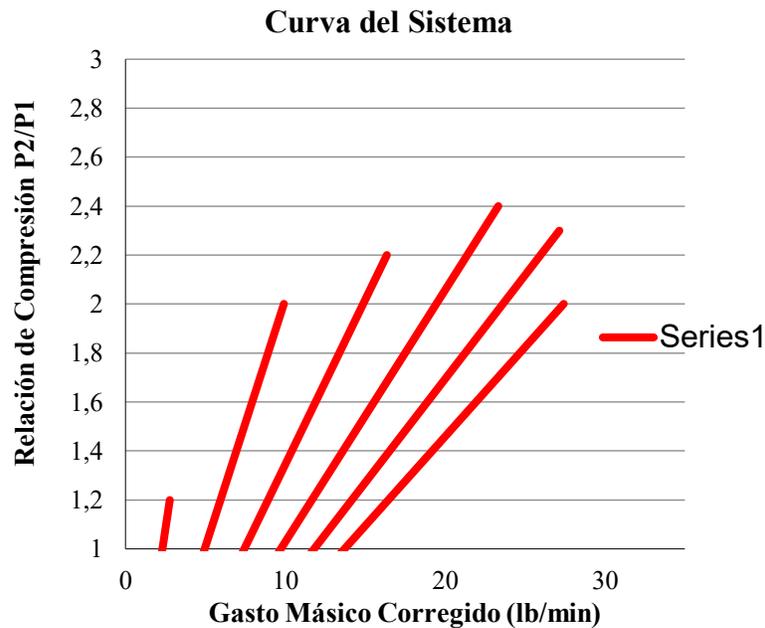


Figura 3. Relación de Compresión vs Gasto Másico Corregido.

La figura 3 nos indica el gasto másico que se debe corregir, esto quiere decir cuanta masa de aire más debe entrar al motor para poder tener una mejor relación de compresión a una altitud de 2764 metros sobre el nivel del mar, la cual es la altitud de la ciudad de Riobamba.

Sobreponiendo la curva de mapeo de un turbo GT20 de la fábrica matriz Turbocompresores GARRET se obtuvo el siguiente gráfico:

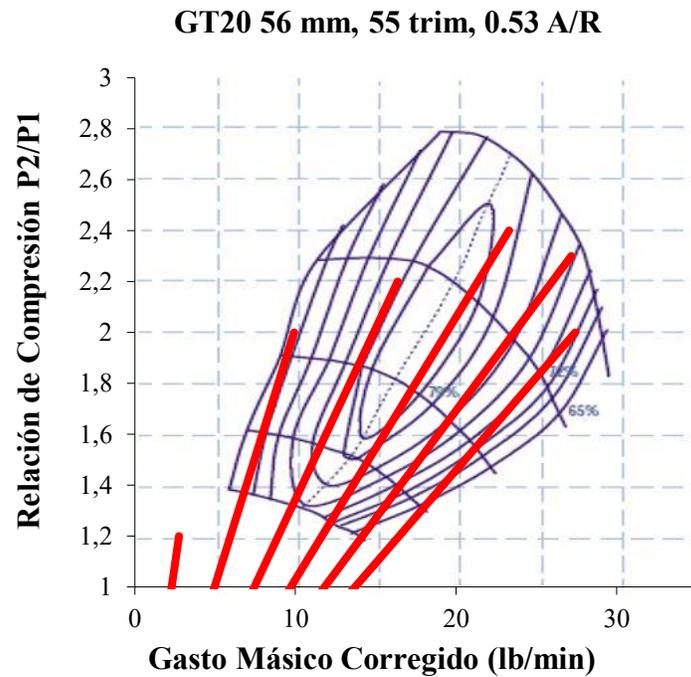


Figura 4. Mapa Característico sobre Curva del sistema.

La figura 4 nos da a conocer que las curvas características de nuestro sistema están dentro de los parámetros de trabajo del turbo GT20, proporcionada por la casa comercial Turbos Garret, con lo cual el turbo seleccionado es el adecuado para corregir las pérdidas de potencia que se tiene en las ciudades de mayor altitud, en este caso en la ciudad de Riobamba.

#### 4 CONCLUSIONES

El resultado obtenido nos da un acercamiento empírico aproximado del 85% de precisión en la selección de un turbocompresor para cualquier tipo de automóvil.

La dependencia topográfica afecta en la eficiencia y el desempeño del motor, puesto que la calidad de oxígeno que se tiene a mayor altura es considerablemente menor a la calidad de aire que se tiene en sectores a nivel del mar.

Al seleccionar bien el turbocompresor para cada motor, se puede obtener un aumento de la eficiencia entre un 20 y 25% dependiendo de ciertos factores, así como bajar el consumo de combustible que tendrá el vehículo al momento de conducirlo.

La sensación de manejo es directamente proporcional a la buena selección de un turbocompresor, puesto que al seleccionar un turbocompresor muy grande para un motor relativamente pequeño tendremos lo que se denomina turbolag, dependiendo mucho del turbocompresor para alcanzar la potencia media efectiva y sintiendo un golpeteo al momento de manejar el vehículo.

## 5 REFERENCIAS

**Belmonte, Borja Galmés. 2018.** *Motores de reacción y turbinas de gas. 2.ª edición.* Madrid : Reverté, 2018.

**Cárdenas León, Ángel Ríos. 2013.** *Mecánica de los turbocompresores.* México : Mc Graw Hill., 2013.

**Cengel, Yunus A. y Cimbala, John M. 2007.** *Termodinámica, Fundamentos y Aplicaciones.* México : Mc Graw Hill, 2007.

**Crane. 2010.** *"Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías".* Mexico : McGraw Hill, 2010.

**García, Gregorio Gil. 2015.** *Turbinas y compresores de gas: los motores del siglo XXI.* México : Mc Graw Hill, 2015.

**Kates, Edgar J. & LUCK, William E. 2015.** *Motores Diesel y de Gas de Alta Compresión.* Barcelona : Reverté, 2015.

**Marta Muñoz, Antonio Rovira. 2011.** *Ingeniería Térmica.* México : Mc Graw Hill, 2011.

**Moran, Michael J. & SHAPIRO, Howard N. 2014.** *Fundamentos De Termodinámica.* Barcelona : Reverté, 2014.

**Prof.F.Payri. 2011.** *Motores de combustión interna alternativos.* Valencia : REVERTÉ, 2011.

**PULKRABEK, Willard W. 2016.** *Engineering Fundamentals of The Internal Combustion.* New Jersey : Prentice-Hall, 2016.

## CÁLCULO DE COSTOS EN LA CONSTRUCCIÓN DE RECIPIENTES A PRESIÓN BAJO ESTÁNDAR ASME

Córdova, Juan <sup>1</sup>; Miño, Gloria <sup>2</sup>; Logroño, Santiago <sup>3</sup>; Gallardo, Fabián <sup>4</sup>

1. Centro de Educación Continua, Universidad de las Fuerzas Armadas, Sangolquí, Ecuador
2. Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
3. Sede Orellana, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Orellana, Ecuador
4. Sede Orellana, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Orellana, Ecuador

Autor de correspondencia: jrcordova3@espe.edu.ec

### RESUMEN

Los recipientes a presión diseñados bajo normas internacionales tienen un impacto importante en el mercado metalmeccánico del Ecuador, en el cual existen doce empresas certificadas por la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos, el diseño de estos equipos lleva un prolijo análisis desde la etapa de ingeniería, procura y construcción del equipo. Al existir varios códigos y procedimientos ya establecidos en los talleres de construcción, se hace viable la fabricación de un recipiente a presión, es así que existen software especializados, códigos según la necesidad del cliente que se utilizan para el diseño y construcción de los equipos; sin embargo, el análisis de costos de cada fase en el proceso constructivo presenta sus dificultades al no contar con mayor información específica de este tipo como presupuestos o bibliografía de análisis de costos para la construcción metalmeccánica. En esta investigación se presentan los resultados referentes a los costos que intervienen directa e indirectamente en la construcción, valores obtenidos al analizar las órdenes de trabajo de treinta y seis equipos construidos entre ellos separadores de petróleo, scrubber de gas, torre destiladora, en un lapso de seis años. Se concluye el estudio que los costos de ingeniería pueden estimarse hasta el 5% del costo total, mientras que la mano de obra directa puede llegar hasta el 50%, y los costos de materiales y despacho suman el 45% en forma general del monto total.

Palabras clave: costos, presupuestos, recipientes a presión, asme

### ABSTRACT

Pressure vessels designed under international standards have an important impact on the metalmechanical market of Ecuador, where there are twelve companies certified by the American Society of Mechanical Engineers, the design of these equipment carries a thorough analysis from the engineering stage, seeks and team building. As there are several codes and procedures already established in the construction workshops, it is possible to manufacture a pressure vessel, so there are specialized software, codes according to the customer's needs that are used for the design and construction of the equipment; However, the cost analysis of each phase in the construction process presents its difficulties in not having more specific information of this type such as budgets or bibliography of cost analysis for metalworking. In this investigation, the results regarding the costs that are directly and indirectly involved in the construction are presented, values obtained by analyzing the work orders of thirty-six equipment built including oil separators, gas scrubber, distillation tower, in a span of six years. The study concludes that engineering costs can be estimated up to 5% of the total cost, while direct labor can reach up to 50%, and the costs of materials and clearance add up to 45% overall of the total amount.

Keywords: costs, budgets, pressure vessels, asme

## 1 INTRODUCCIÓN

Los recipientes a presión son recipientes cerrados que se utilizan para contener gases o líquidos a una presión sustancialmente diferente de la presión ambiental. Ver ejemplos en Fig 1. La presión dentro del recipiente es diferente y puede cambiar según las condiciones. Los recipientes son demasiado peligrosos y se han producido accidentes fatales en la historia del desarrollo y operación de recipientes a presión. En consecuencia, el diseño, la fabricación y la operación del Vessel (recipiente a presión) están regulados por autoridades de ingeniería respaldadas por la legislación. (1) Es así que la Asociación de Ingenieros Mecánicos de Estados Unidos (ASME) norma la construcción de este tipo de equipos con la verificación del cumplimiento de sus códigos por medio de un profesional certificado que evalúa y aprueba todo el proceso desde la etapa de ingeniería, procura y construcción.



Figura 1: Recipientes a presión contruidos en taller y en campo

Los códigos de diseño requieren frecuentemente que se cumplan los límites de deformación al final de la vida útil especificada de la estructura. No obstante, los códigos de diseño generalmente brindan poca orientación sobre cómo se calculan las deformaciones y los rangos de deformación acumulados, y algunas de las pautas implementadas en los códigos de diseño no están bien fundadas y, por lo tanto, pueden ser engañosas. (2) Esto implica que los cálculos en la etapa de ingeniería son trascendentes para mantener el presupuesto original y así contar con el menor margen de desviaciones.

Es de vital importancia contar con la mayor información referente a los costos que implica los procesos productivos, en especial para los gerentes departamentales que son quienes toman las decisiones en pro de la empresa. Los costos de producción son todos los rubros en los que se incurre para transformar la materia prima en un producto que cumpla los requerimientos del cliente.

El gasto de los materiales consumidos para elaborar un producto, el gasto en sueldos y salarios del personal de producción y otros gastos diferentes generados en el área de producción por conceptos tales

como electricidad, combustibles, mantenimiento, por citar algunos, de un periodo, conforman lo que se denomina el costo de producción. (3). La estimación de costos es un tema crítico para muchas compañías con respecto a la generación de ofertas y evaluaciones estratégicas de la compañía (4)

El precio de venta en un mundo globalizado en la mayoría de los casos, lo determina el mercado; por lo tanto, para que los productos y servicios puedan participar y ser competitivos, deben partir del precio de venta que fija el mercado; restarle el porcentaje de utilidad deseado, para llegar al costo total objetivo. (5), bajo este concepto es necesario conocer a detalle los costos unitarios y ser lo más eficiente en cada uno de ellos para lograr la utilidad planeada.

En el mercado ecuatoriano existen doce empresas (Ver Tabla.1) que cuentan con la certificación ASME, que se disputan el mercado en especial los equipos para el proceso de petróleo que mantiene una hegemonía sobre otras industrias con una demanda importante. (Ver Fig 2). Los equipos que trabajan a presión de mayor demanda en este tipo de industria son separadores de crudo-agua, scrubber de gas, intercambiadores de calor, calderas, entre otros.

Tabla 1: Talleres certificados ASME en el Ecuador

	EMPRESA	CIUDAD
1	Beite B&T CIA. Ltda	Quito
2	Suministros y mantenimientos de equipos petroleros symep S.A.	Esmeraldas
3	Sertecpet S.A.	Orellana
4	DV Santos	Guayaquil
5	Enatin S.A.	Guayaquil
6	Calderos y Afines S.A.	Guayaquil
7	Industria Metalmeccanica Constructora IMETECO S.A.	Guayaquil
8	Induacero Industria de Acero Del Ecuador Cia. Ltda.	Latacunga
9	AE&M engineering solutions S.A.	Quito
10	Aceros Industriales Del Ecuador S.A.	Quito
11	Industria Acero De Los Andes S.A.	Quito
12	Sedemi S.C.C.	Sangolquí

Elaborado por: Autores

Fuente: extraído de <https://caconnect.asme.org/directory/>

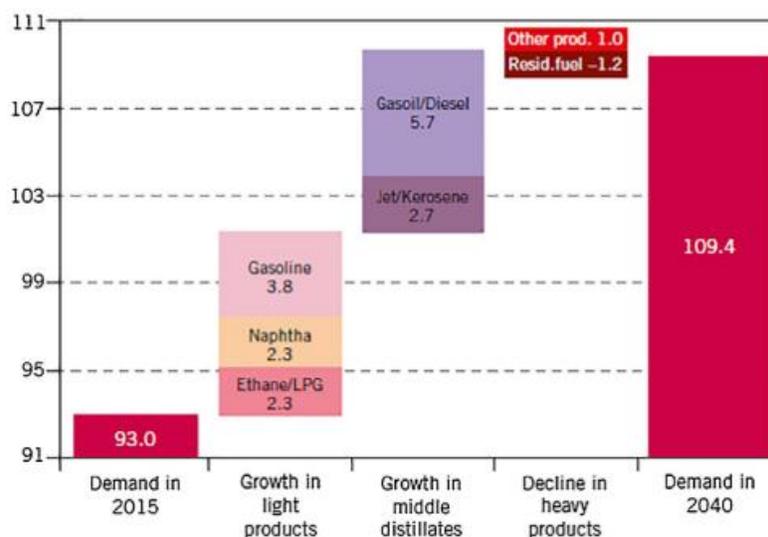


Figura 2: Crecimiento de la demanda del Petróleo desde 2015 al 2040 (6)

Con especial particularidad estos equipos pueden ser construidos en taller como en campo, todo dependerá de las capacidades a procesar. Pero, hay variables muy importantes que en la etapa de ingeniería muchas veces se omiten, o se descuidan por no ser parte de los procesos productivos y es el de logística, el de transporte. Son rubros importantes cuando los equipos son de gran volumen o de gran peso.

Al diseñar y manufacturar un equipo éste debe responder a las necesidades de la empresa y del cliente, para generar el mayor efecto económico y los índices más altos como alta productividad, rendimiento económico y fiable, peso y dimensiones mínimas, con un elevado grado de automatización y un fácil y sencillo manejo de la seguridad del servicio.(7)

Es así de suma importancia contar con un sistema de gestión que permita llevar una base de datos de proyectos ya ejecutados, en cada proceso constructivo (Ver Fig. 3) sobre todo con la información para crear índices medidores de desempeño tales como de producción, costos variables, tiempos de ejecución entre otros para facilitar la tarea y llevar registros para generar las curvas de aprendizaje y contribuir a la mejora continua de la empresa.



Figura 3: Proceso general de construcción de un equipo bajo estándar ASME y su porcentaje promedio que representa en el costo final del equipo

Existen costos directos e indirectos en un proceso de manufactura, y estos a su vez se subdividen cada uno en costos fijos y variables. En la etapa de ingeniería si en verdad es el que menos representación tiene en el costo total ya que básicamente en las empresas son el reflejo de los costos indirectos fijos, es el proceso más sensible ya que de este dependerá en gran medida el triunfo o fracaso del proyecto, de aquí se desprenderán los procedimientos de construcción, las lista de materiales para su compra y los procedimientos de calidad a seguir; Conocer el valor económico que representa este proceso no es tarea fácil, pero con el registro de horas hombre asignada a cada proyecto y las curvas de aprendizaje se llega a un estándar e índice que servirá como guía para hallar el costo de este rubro. En realidad, el 80% del costo y el rendimiento del producto están comprometidos en función de las decisiones tomadas en el diseño conceptual (8). El diseño mecánico de los recipientes a presión puede imponer restricciones a las condiciones factibles del proceso o conducir a cambios significativos en el costo del equipo con pequeños cambios en las condiciones del proceso. (9)

Para conocer el costo que representa la etapa de procura es menos difícil que la ingeniería, pero no que la etapa de construcción, ya que si ingeniería emitió bien las listas de materiales con sus detalles específicos la compra de materiales no será difícil de consignar.

Mientras que en la etapa de construcción el tema de obtener los costos se convierte en una tarea ardua y minuciosa, es la más compleja de analizar ya que depende básicamente de los costos fijos variables y fijos a la vez, entre otros, mano de obra directa, materia prima, maquinaria asignada a las actividades, entre otros.

El proceso de soldadura por arco de metal protegido es uno de los procesos más ampliamente utilizados en este tipo de equipo (10, 11). Un método para conocer los que incurren en soldadura es el calcular la cantidad de metal de soldadura depositado (10). Para este es el cálculo hay múltiples mecanismos tales como software, catálogos de suministros con fórmulas (12), pese a todas estas metodologías en muchos casos difieren de la realidad ya que son experimentales e ideales. El cálculo de los costos totales de

soldadura por arco eléctrico de los procesos SMAW, GMAW, FCAW con protección y sin protección gaseosa, SAW y GTAW con varilla o con alambre continuo son importantes desglosarlos por etapas en el proceso constructivo. (13)

Otro rubro importante más que por su costo es por los tiempos de entrega e importación cuando se trata de accesorios especiales son las bridas, que para que cumplen la normativa, hay ocasiones que no se los encuentra en el mercado local y sus especificaciones se los encuentra en la normativa respectiva. (14)

Un rubro importante son los costos de mano de obra que también se ven afectados por los costos de materiales, especialmente por el espesor, ya que las tuberías de paredes más gruesas requieren más soldadura y las tuberías más pesadas pueden recurrir en equipos de instalación más robustos (15)

Por lo general, se selecciona el material de menor costo que sea adecuado para las condiciones químicas y físicas del proceso. Además del costo, el diseñador debe considerar la resistencia mecánica, la rigidez, la tenacidad, la dureza, la resistencia a la fatiga, la resistencia a la fluencia, los efectos de la temperatura en las propiedades de los materiales, el ciclo térmico y de presión, la resistencia a la corrosión y la facilidad de fabricación (16). Todos estos datos y variables se los detecta en la etapa de ingeniería con un estricto seguimiento al código ASME (17).

De esta forma el escenario complejo que presenta el análisis de costos en los procesos de manufactura, hace que las empresas estén a la vanguardia y que se experimenta, hoy en día, en cuanto a la generación de nuevos conocimientos en la ciencia y la tecnología, lo que genera importantes retos en relación con el desarrollo y aplicación de modelos creativos e innovadores en todas las organizaciones para resolver los diferentes problemas que les aquejan (18).

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Al recopilar la información de trabajos realizados, proyectos ejecutados, cotizaciones fracasadas, análisis de formatos de lecciones aprendidas, y un exhaustivo análisis de los indicadores de gestión propios de cada proyecto, se llegó a conclusiones importantes que servirán como guía a profesionales que se dedican al análisis de costos y presupuestos de elementos metalmeccánicos con certificación ASME.

Los dos principales sistemas de costeo que utilizan las empresas manufactureras son el de órdenes de trabajo y por procesos, pero existen combinaciones de ambos, denominados híbridos. Las empresas que operan en industrias de ordenes de trabajo fabrican una amplia variedad de productos o trabajos que son bastante distintos entre sí. Los productos fabricados o construidos bajo pedido especial entran en esta categoría, así como los servicios que varían con cada cliente. (19)

Para el actual estudio se realizó un sistema híbrido, y se recopiló información de treinta y seis recipientes construidos bajo el código ASME VII, Div 1, cada uno con sus características de servicio (Ver Tabla 2), en un lapso de 6 años.

Tabla 2: Vessel construidos

	Cantidad	Presión de prueba (psi)	Peso c/u (Ton)
Scrubber de gas	3	320	2.5
Separador clase #150	13	450	7.2
Separador clase #300	18	850	9.3
Torre destiladora	2	150	35
Total	36	29	15

Elaborado por: Autores  
Fuente: Adaptado por autores

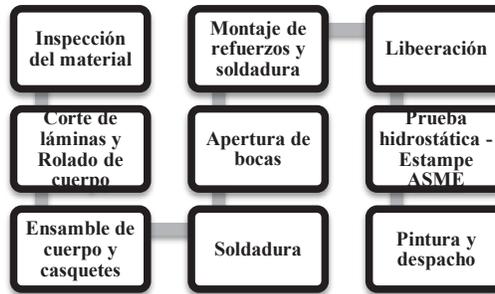


Figura 4: Diagrama de flujo del ensamble y construcción de un vessel (20).

Hay que considerar que en todos los procesos constructivos metalmecánicos (Ver Fig. 4) son liberados por un inspector autorizado ASME, quien planificadamente acude al taller autorizado a verificar que se cumpla con los estándares y requisitos que impone el código.

Tratado y analizado el concepto de costo, se aborda lo referente a los costos de producción; consideran que “es la recolección organizada de datos de costo mediante un conjunto de procedimientos o sistemas. La clasificación de costos es la agrupación de todos los costos de producción en varias categorías con el fin de satisfacer las necesidades de la administración”. (19)

### 2.1 Ingeniería

Para hallar los costos en la etapa de ingeniería se analizó las horas hombre asignadas a cada proyecto, y las horas máquina utilizados, donde se entiende que las horas máquina son las horas utilizadas en el diseño en software especializados tales como Compres, Autocad, Hysis, Sap, Ansys, entre otros.

En la etapa de inicial que es la Ingeniería básica y conceptual (Ver Fig. 5) comprende en revisar las hojas de datos que entrega el cliente con las especificaciones del proceso para el cual se diseñará el recipiente, luego vienen las simulaciones en el software especializado como el Hysis, y hallar las variables que intervendrán en el proceso así, volumen, temperatura, presión externa e interna, límite de corrosión, a reglón seguido se continúa con él diseño mecánico del recipiente con sus planos general y de detalle, para finalmente llegar a la emisión de listas de materiales y entrega al departamento de compras, no sin antes obtener el visto bueno del inspector autorizado quien al final del proceso de construcción coloca la placa en el recipiente (Ver Fig. 6 )



Figura 5: Flujo del trabajo de Ingeniería para el diseño de un recipiente a presión

Los tiempos estimados se los registran en formatos de gestión y control de proyectos propios de cada empresa; ya que cada equipo es difiere de los otros se lo evalúa en función del peso medido en kilogramos, es así como se obtienen los indicadores de horas hombre por kilogramo procesado.



Figura 6: Placa con estampe ASME U

## 2.2 Procura

Para verificar los costos en la etapa de procura se consideró las órdenes de compra de cada uno de los materiales y accesorios utilizados, los que son registrados en virtualmente en el sistema de contabilidad e inventario propio de cada empresa. Este rubro generalmente oscila entre el 30 y 40% del costo total del equipo procesado.

De igual forma el indicador se lo presenta en función del peso del recipiente.

Esta etapa es crítica para el cumplimiento de la planificación inicial, ya que varios materiales y accesorios necesariamente serán importados, y está expuesta a múltiples variables externas tales como las climáticas, legales, incluso políticas de estado, es una de las razones por las cuales deben ser analizadas muy detenidamente los términos de importación.

Por otro lado, es menester indicar que no solo se registran los valores económicos sino también los tiempos de entrega si cumplen o no con los planificados.

## 2.3 Construcción

Las organizaciones de fabricación generalmente tienen como objetivo producir productos de alta calidad para evitar defectos y asegurarse de que las máquinas funcionen durante un período prolongado sin comprometer las ganancias de la compañía con averías prolongadas. La mayoría de los fabricantes están equipados con sistemas heredados que generalmente no son efectivos en términos de duración del ciclo de vida y rendimiento operativo (22). La distribución de la planta es vital para la eficiencia de los procesos productivos (23)

En la construcción del equipo la variable que más inconvenientes da al momento de poder deducir sus costos es el de soldadura, y este se convierte en un cuello de botella, ya que, si en verdad se cuenta con los recursos materiales y humanos para la construcción, se presentan variables ocultas como la experiencia de la mano de obra, tipos de materiales, horas efectivas de trabajo, eficiencia de la maquinaria, entre otras. El objetivo del control del proceso de soldadura es obtener soldaduras con una calidad satisfactoria mediante acciones de control adecuadas (24). Por medio del código en la etapa de ingeniería se conoce los procedimientos a aplicar y tipos de juntas (Ver Fig. 7), estos datos se los encuentra en los planos de construcción y hojas de datos respectivo por lo que se contabilizan cada una de ellas y se valora el costo de la soldadura.

Para analizar los costos unitarios en el proceso de soldadura se consideró, el material depositado, horas hombre en la preparación de la junta, horas hombre en la unión de la junta, horas hombre de mano de obra indirecta asignadas a personal que realiza control de calidad y liberaciones todos ellos registrados en las órdenes de trabajo; Se conoce que la especificación del procedimiento de soldadura (WPS) que utilizan el proceso de aporte con gas (GMAW) son hasta cuatro veces más económicos que los procedimientos de electrodo revestido (SMAW) y que los tiempos de producción de una junta con GMAW son del orden del 20% de los requeridos con SMAW. (25).

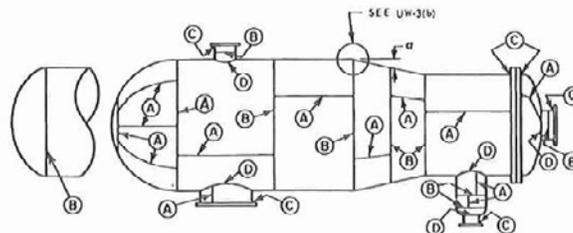


Figura 7: Ilustración de juntas típicas a soldar en un recipiente a presión. (17)

Una vez liberado el recipiente por el inspector autorizado y puesta la placa de estampe en el recipiente luego de la prueba hidrostática queda listo para la fase final de construcción que es la aplicación de pintura, para lo cual se consideró las horas hombre aplicadas de igual forma directas e indirectas y la materia prima utilizadas.

Para obtener los costos de horas máquina en el proceso constructivo se lo hizo por el método de depreciación en línea recta, para el caso de equipos ya depreciados se utilizó un valor remanente, todos estos considerados según la capacidad instalada de la planta, y verificados en las órdenes de trabajo.

Se debe tomar en cuenta que el alcance el presente estudio es la evaluación de los costos en la construcción del recipiente a presión, no se considera los costos que implican los elementos adicionales tales como baffles, tuberías de interconexión, válvulas, instrumentos, instalación, puesta en marcha.

## 2.4 Despacho

El rubro de despacho se lo planifica en la etapa inicial ya que se conoce desde un principio el destino final de equipo, empero, este rubro toma importancia cuando el volumen o el peso del equipo superan los 20 metros de longitud o 30 toneladas ya que las condiciones de las carreteras ecuatorianas sobre todo los puentes de forma general están diseñados para una resistencia de hasta 40 toneladas.

Para estos casos el costo de este rubro se convierte en crítico, y la toma de decisiones con argumentos técnicos son necesarias tales como fabricar en taller unas secciones y otras en campo, lo que implica que los costos sean mucho mayores.

## 3 RESULTADOS

El objetivo de la presente investigación luego de revisar los resultados obtenidos en la construcción de varios equipos con estampe ASME, fue el de obtener un modelo matemático que permita como guía a los ingenieros técnicos encargados del área de costos y presupuestos, y sea una herramienta confiable y viable al momento de planificar analizar el costo de la construcción de un vessel.

El Costo total de la construcción de un recipiente a presión se calcula con la ecuación 1, ver su relación y ponderación con respecto al costo total en la Fig. 8

$$C_T = C_I + C_M + C_C + C_D$$

Ecuación 1: Costo total

Donde

$C_T$  = Costo total de construcción, \$

$C_I$  = Costo de ingeniería, \$

$C_M$  = Costo de materiales, \$

$C_C$  = Costo de construcción, \$

$C_D$  = Costo de despacho, \$

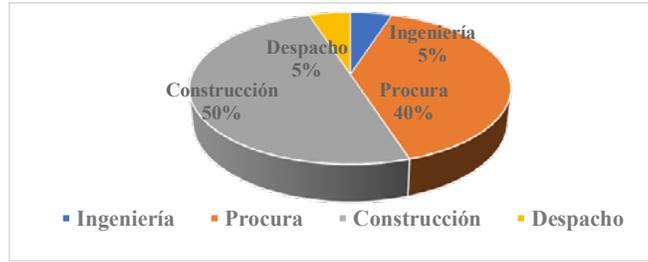


Figura 8: Promedio de los rubros que abarca el costo total

Tabla 3: Resumen de Horas Hombre de Ingeniería

EQUIPOS	PROMEDIO HORAS EFECTIVAS			RESUMEN	
	SOFTWARE	PLANOS	REVISIÓN	PESO (KG)	KPI (H-H / Kg)
SCRUBBER	10,00	62,00	8,00	2500	0,032
SEPARADOR 150	48,62	124,00	32,46	7200	0,028
SEPARADOR 300	63,22	144,22	47,22	9300	0,027
TORRE	255,00	360,00	240,00	35000	0,024

Elaborado por: Autores  
Fuente: Adaptado por autores

En los resultados obtenidos para el rubro de ingeniería se nota en la Fig. 9 como en la Tabla 3 que a medida que los recipientes tienen más peso las horas hombre en una forma exponencial se incrementa, este fenómeno tiene coherencia ya que a más peso más tiempo de cálculo para los accesorios o selección de materiales.

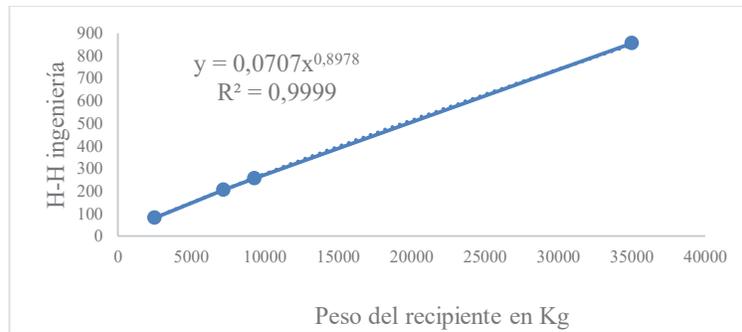


Figura 9: Relación del peso del vessel con las horas hombre de ingeniería promedio

Se deduce que el Costo de Ingeniería queda plasmado con la ecuación 2.

$$C_I = ((0,0707 Q^{0,8978}) * (I + \frac{S}{8640}))$$

Ecuación 2: Costo de Ingeniería

Donde:

Q = Peso del recipiente en Kg

I = Valor económico del salario de un ingeniero especialista, \$ / hora

S = Costo de compra de las computadoras con software especializado que se usan para ingeniería, \$.

Nota: En caso de tener más de tres años los equipos de informática especializada, S = 25% del costo inicial de los equipos.

Para obtener los costos en la actividad de procura será necesario partir de la lista de materiales emitido por ingeniería, y a esta sumarle un porcentaje no mayor del 6% del costo de materiales por concepto de imprevistos.

$$C_M = W + L + A + T + D$$

Ecuación 3: Costos de Procura de materiales

Dónde

W = Costo de soldadura, \$

L = Costo de lámina, \$

A = Costo de accesorios, \$

T = Costo de tubería

D = Costo por discos y gratas. \$

H = Costo para accesorios para seguridad industrial, \$

El costo de soldadura depositado se determina de la siguiente forma.

$$W = P_W * 2,3 \% Q$$

Ecuación 4: Costos de soldadura

Donde:

$P_W$  = Precio del material de aporte

Q = Peso del vessel, Kg

Para los costos de lámina, codos, bridas, discos para preparación de la junta, elementos de seguridad industrial y todos los accesorios que serán instalados en el recipiente, necesariamente se deben contabilizar unitariamente bajo la modalidad de cotizaciones de los proveedores cada vez que se requiera un nuevo equipo sin importar el tiempo transcurrido de la construcción de un equipo con otro, esto es la volatilidad de los precios del acero en el mercado que son variables constantemente.

Para el cálculo de los costos de construcción se dividirá en dos partes, como muestra la ecuación 5; la una para mano de obra y la otra etapa para el cálculo que representa el uso de equipos y planta industrial, (Se asume que todos los equipos son propios, y no en alquiler).

$$C_C = M_O + E$$

Ecuación 5: Costos de Construcción

$$M_O = (0,000\ 005\ Q^2 + 0,203\ 9\ Q) * P_{M_O}$$

Ecuación 6: Costos de Mano de obra directa(Fig 11)

Donde:

Q = Peso total del vessel, kg

E = Costo asignado por el uso de equipos y herramientas, \$

$P_{M_O}$  = Valor económico de por hora de mano de obra calificada, \$/Hora

Se encontró que a medida que se construyen más equipos y se cuenta con el mismo personal la curva de aprendizaje de mano de obra directa mejora (Ver Fig. 10) hasta un punto máximo, lo ideal en este caso es mantenerla para de esta manera ser lo más eficiente posible en la manufactura de equipos diseñados a presión.

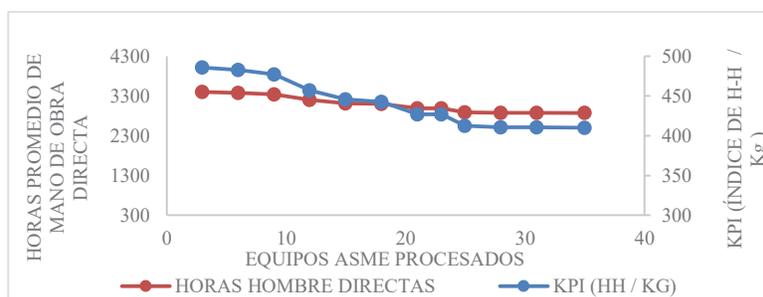


Figura 10: Curva de aprendizaje de mano de obra directa

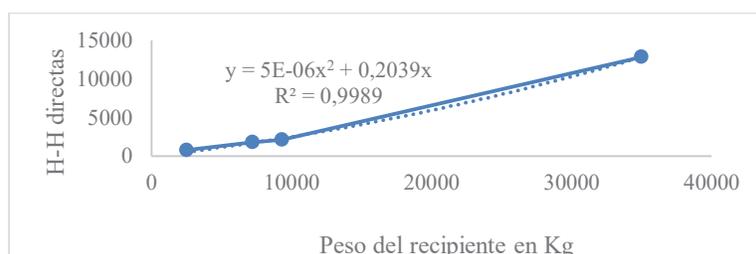


Figura 11: Costo de mano de mano de obra directa

Las horas hombre tabuladas en las órdenes de trabajo son las presentadas en la Fig. 11, las que entregan información idónea y veraz al momento de verificar con los tiempos de entrega planificados. En la tabla 4 se puede observar el índice KPI que también se lo puede considerar al momento de valorar el costo, esto dependerá de la experiencia de quien lo haga y su interpretación.

Tabla 4: Resumen de Horas Hombre de Ingeniería

EQUIPOS	MANO DE OBRA DIRECTA			RESUMEN	
	ARMADOR	AYUDANTE	SOLDADOR	PESO (KG)	KPI (H-H / Kg)
SCRUBBER	254,33	189,67	343,33	2500	0,315
SEPARADOR 150	433,08	517,69	873,00	7200	0,253
SEPARADOR 300	537,94	616,72	962,22	9300	0,228
TORRE	2375,00	4450,00	6000,00	35000	0,366

Elaborado por: Autores  
Fuente: Adaptado por autores

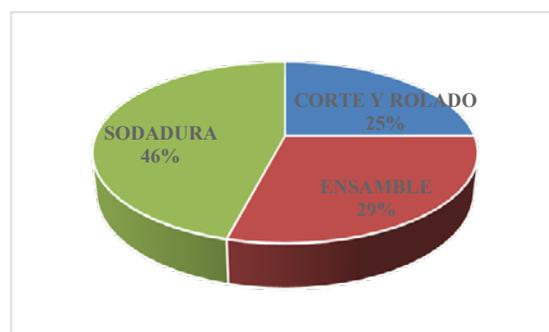


Figura 12: Tiempos promedio en los diferentes procesos de construcción del vessel

Para el cálculo del uso de maquinaria en el proceso constructivo se usa la ecuación 7.

$$E = (0,000\ 005\ Q^2 + 0,203\ 9\ Q) * \frac{0.46S+0.25MR+0.29\ HR}{28\ 800}$$

Ecuación 7: Costos directos de Maquinaria a utilizada

Donde:

Q = Peso del recipiente, Kg

S = Costo de compra de las máquinas soldadoras, \$

MR = Costo de compra de la mesa de corte más el costo de la roladora

HR = Costo total estimado de las herramientas a utilizarse en el proceso constructivo

Finalmente, el costo de despacho dependerá del sitio donde se traslade el equipo, este rubro se lo debe planificar desde la etapa de ingeniería y plasmarlo en la ecuación 1.

#### 4 CONCLUSIONES

El diseño y construcción de recipientes a presión bajo estándar ASME, es apasionante para los ingenieros técnicos, quienes a su vez en su formación no cuentan con bases de contabilidad de costos, sino que adquieren experiencia de a poco. La importancia que tiene este tema de análisis de costos es inmensa en la industria de la manufactura, sin embargo, muchos autores proponen analizarlos mediante plantillas y cédulas ideales que se ajustan a varios tipos de procesos productivos. En este estudio se ha plasmado los resultados de treinta y seis equipos construidos para el área petrolera en un lapso de seis años, donde se verifica que las horas hombre de ingeniería suman hasta el 5% del costo total de un proyecto, al igual que los procesos constructivos se puede decir en forma general que los materiales llegan a representar hasta el 40% del monto total y el monto más delicado es el de mano de obra directa que puede llegar hasta el 50% del monto total. Estos datos servirán como herramienta para el análisis de plazos de entrega y costos unitarios.

Por otro lado, se concluye que los modelos matemáticos obtenidos difieren de las tablas que manejan los catálogos de soldadura o bibliografía de análisis de costos, en vista de que son teóricos y los presentados en esta investigación fueron fruto del análisis de los datos tabulados en órdenes de trabajo reales.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer a las empresas Industria Acero de los Andes y Sertecpet, quienes apoyan incondicionalmente al desarrollo de este tipo de investigaciones.

#### 5 REFERENCIAS

1. SIVA KUMAR, B., PRASANNA, P., SUSHMA, J. y SRIKANTH, K. P. Stress Analysis and Design Optimization of A Pressure Vessel Using Ansys Package. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2018. Vol. 5, no. 2, p. 4551–4562. DOI 10.1016/j.matpr.2017.12.025. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.025>
2. HÜBEL, Hartwig y VOLLRATH, Bastian. Simplified determination of accumulated strains to satisfy design code requirements. *International Journal of Pressure Vessels and Piping* [online]. 2019. Vol. 171, no. November 2018, p. 92–103. DOI 10.1016/j.ijpvp.2019.01.014. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2019.01.014>

3. SARDINHA, Ferreira, PRAVIA, Pérez, CARIDAD, Milagros, CORELLA, Vilariño, MANUEL, Carlos, FERREIRA, Lino, NETO, Costa, MANUEL, Carlos y CORELLA, Vilariño. Indicadores de costos logísticos ambientales en cadena suministros de combustibles y lubricantes. *Ciencias Holguín* [online]. 2018. Vol. 24. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181555444007>
4. SAVORETTI, Andrea, MANDOLINI, Marco, RAFFAELI, Roberto y GERMANI, Michele. Analysis of the Requirements of an Early Life-cycle Cost Estimation Tool: An Industrial Survey. *Procedia Manufacturing* [online]. 2017. Vol. 11, no. June, p. 1675–1683. DOI 10.1016/j.promfg.2017.07.291. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.291>
5. LAMBAN, Pilar, ROYO, Jesús, VALENCIA, Javier, BERGES, Luis y GALAR, Diego. Modelo para el cálculo de costo de almacenamiento de un producto: Caso de estudio en un entorno logístico model for calculating the storage cost of a product; study. *DYNA* [online]. 2013. Vol. 80, p. 1–13. Available from: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/rt/printerFriendly/30587/45285>
6. GEBREMARIAM, S. N. y MARCHETTI, J. M. Economics of biodiesel production: Review. *Energy Conversion and Management*. 2018. Vol. 168, no. February, p. 74–84. DOI 10.1016/j.enconman.2018.05.002.
7. RAMIREZ, Heriberto, NIEBLES, Enrique y TOORES, Jaime. *Diseño para la fabricación y ensamble de productos soldados*. Ediciones. Barranquilla, 2009. ISBN 978-958-8252-74-2.
8. MARTINELLI, Irene, CAMPI, Federico, CHECCACCI, Emanuele, PRESTI, Giulio Marcello Lo, PESCATORI, Francesco, PUMO, Antonio y GERMANI, Michele. Cost Estimation Method for Gas Turbine in Conceptual Design Phase. *Procedia CIRP* [online]. 2019. Vol. 84, p. 650–655. DOI 10.1016/j.procir.2019.04.311. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.311>
9. SINNOTT, Ray y TOWLER, Gavin. *Mechanical Design of Process Equipment*. 2020. ISBN 9780081025994.
10. VALLEJO, Esteban. *Determinación de costos de la planta de facilidades de producción de recipientes a presión bajo jorma ASME y tanques de almacenamiento*. Escuela Politécnica Nacional, 2013.
11. BAZÁN, Ciro. *Determinación de electrodos y costos de soldadura al arco asistido por computadora*. Universidad de Piura, 2002.
12. LINCOLN. *Catálogo de electrodos*. 2010. Barquisimeto.
13. GARCÍA, Darian. *Software para el cálculo de costos de soldadura en procesos por arco eléctrico*. Universidad Central Marta Abreu de las Villas, 2015.
14. MATTHEWS, Clifford. ASME B16.5 Flange Design. *A Quick Guide to API 570 Certified Pipework Inspector Syllabus*. 2009. P. 186–190. DOI 10.1533/9781845696849.4.186.
15. FEKETE, James R., SOWARDS, Jeffrey W. y AMARO, Robert L. Economic impact of applying high strength steels in hydrogen gas pipelines. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2015. Vol. 40, no. 33, p. 10547–10558. DOI 10.1016/j.ijhydene.2015.06.090. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.06.090>
16. ELLINGSON, W. A., NATESAN, K. y VOJNOVICH, T. Materials of Construction. *Sci and Technol of Coal and Coal Util*. 1984. P. 489–610. DOI 10.1016/B978-0-08-102599-4.00007-2.
17. FELDSTEIN, J, PASTOR, T y BRZUSKIEWICS, J. *VIII Rules for construction of Pressure Vessels, Div 1*. 2013. New York, 2018.
18. EUGENIA, Díaz-castellanos Elizabeth, ALBERTO, Barroso-moreno Luis, CARLOS, Díaz-Ramos y BEATRIZ, Pico-gonzález. Desarrollo de un modelo matemático para procesos multivariabales mediante Balanced Six Sigma Development of a Mathematical Model for Multivariate Process. *Ingeniería Investigación y Tecnología* [online]. 2015. Vol. 16, no. número 3, p. 419–430. Available from: [doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.003](http://dx.doi.org/10.1016/j.riit.2015.05.003)
19. RODRÍGUEZ, Guillermo, CHÁVEZ, Jorge, RODRÍGUEZ, Belkis y CHIRINOS, Alira. Gestión de costos de producción en el sector metalmeccánico de la región zuliana. *Revista de Ciencias Sociales (Ve)* [online]. 2007. Vol. 13, no. 3, p. 455–467. Available from: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=28011681007>
20. JOSHI, J., YADAV, A., JOSHI, K., SINGH, D., PATEL, H., ULAHANNAN, S.,

- VINAYKUMAR, A., GIRISH, M., KHAN, M., MANOHAR, SINGH, M., BANDYOPADHYAY, M. y CHAKRABORTY, A. Manufacturing experience and commissioning of large size (volume >180 m<sup>3</sup>) UHV class vacuum vessel for Indian test facility (INTF) for neutral beam. *Fusion Engineering and Design* [online]. 2019. Vol. 146, no. October 2018, p. 1377–1380. DOI 10.1016/j.fusengdes.2019.02.080. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.02.080>
21. EDUARDO, Gutiérrez-gonzález, FERNANDO, Hurtado-ortiz Moisés, VLADIMIROVNA, Panteleeva Olga y CARLOS, González-navarrete. Aplicación de un modelo de inventario con revisión periódica para la fabricación de transformadores de distribución An Inventory Model Application with Periodic Review for the Manufacture of Distribution Transformers. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 2013. Vol. 16, no. número 4, p. 537–551.
  22. TEDESCHI, Stefano, RODRIGUES, Duarte, EMMANOUILIDIS, Christos, ERKOYUNCU, John, ROY, Rajkumar y STARR, Andrew. A cost estimation approach for IoT modular architectures implementation in legacy systems. *Procedia Manufacturing* [online]. 2018. Vol. 19, p. 103–110. DOI 10.1016/j.promfg.2018.01.015. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.01.015>
  23. MANUEL, González-longoria Héctor. La heurística LDMTTP : Una metodología híbrida basada en el problema de transporte para el diseño óptimo de la distribución de planta The LDMTTP Heuristic : A Hybrid Methodology Based on the Transportation Problem for the Optimal Design of Plant Layout. *Ingeniería Investigación y Tecnología* [online]. 2016. Vol. 17, no. número 4, p. 463–478. DOI 10.1016/j.riit.2016.11.006. Available from: [doi:10.1016/j.riit.2016.11.006](https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.11.006)
  24. ZHOU, Kang y YAO, Ping. Overview of recent advances of process analysis and quality control in resistance spot welding. *Mechanical Systems and Signal Processing* [online]. 2019. Vol. 124, p. 170–198. DOI 10.1016/j.ymsp.2019.01.041. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.01.041>
  25. ROBLEDO, David Mazuera, GÓMEZ, J. A S y BARRADA, J. E G. Estudio de productividad en la soldadura del acero MIL A 46100 con los procesos GMAW y SMAW. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia* [online]. 2011. Vol. 59, no. 1, p. 66–74. Available from: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-62302011000300007](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-62302011000300007)
  26. ALFONSO, Gallego-rendón Ramón y FREDY, Franco-baquero John. Modelo matemático para resolver el problema de localización y ruteo con restricciones de capacidad considerando flota propia y subcontratada Mathematical Model for Capacitated Location Routing Problem with Private Fleet. *Ingeniería Investigación y Tecnología* [online]. 2016. Vol. 17, no. número 3, p. 357–369. DOI 10.1016/j.riit.2016.07.006. Available from: [doi:10.1016/j.riit.2016.07.006](https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.006)
  27. MANUEL, Izar-landeta Juan, ARTURO, Castillo-ramírez y BERENICE, Ynzunza-cortés Carmen. Estudio comparativo del impacto de la media y varianza del tiempo de entrega y de la demanda en el costo del inventario A Comparative Study About the Impact of the Mean and Variance of Lead Time and Demand on the Inventory Cost. *Ingeniería Investigación y Tecnología*. 2016. Vol. 17, no. número 3, p. 371–381. DOI 10.1016/j.riit.2016.07.007.

## METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DE UN ENSAYO DE IMPACTO MEDIANTE MEF

López, Santiago <sup>1</sup>; Quinga, Milton <sup>2</sup>; Abarca Edison <sup>3</sup>; Sánchez Edgar <sup>4</sup>

Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador

...  
Autor de correspondencia: sa\_lopez@esPOCH.edu.ec

### RESUMEN

Uno de los accidentes con mayor fatalidad y daño por heridas es el choque frontal de vehículos, ya que grandes fuerzas y desaceleraciones son transmitidas a los ocupantes como producto de la colisión. Por este motivo es de gran importancia el estudio de la resistencia ofrecida por los fabricantes de vehículos de todo tipo, desde automóviles hasta vehículos de carga y transporte de personas. En el presente trabajo se abordará la metodología utilizada para realizar un estudio numérico del tipo explícito no lineal que evalúe la resistencia y comportamiento estructural de un vehículo que como caso aplicativo se realiza en la sección frontal de un bus. Se explican consideraciones necesarias para obtener un modelo computacional fiable y validarlo.

Palabras clave: Simulación numérica, impacto frontal, método de elementos finitos, análisis no lineal.

### ABSTRACT

One of the most fatal accidents and injuries due to injuries is the frontal collision of vehicles, since large forces and decelerations are transmitted to the occupants because of the collision. For this reason, it is of great importance the study of the resistance offered by the manufacturers of vehicles of all kinds, from cars to vehicles for loading and transporting people. In the present work, the methodology used to perform a numerical study of the non-linear explicit type that assesses the resistance and structural behavior of a vehicle that as an application case is carried out in the front section of the bus will be addressed. The specifications necessary to obtain a reliable computational model and validate it are explained.

Keywords: Numerical simulation, frontal impact, finite element method, nonlinear analysis.

## 1 INTRODUCCIÓN

En países europeos aproximadamente 30000 personas sufren heridas como consecuencia de accidentes en buses de los cuales 150 sufren heridas fatales. En el Ecuador, la agencia nacional de tránsito ANT determinó que el impacto frontal es el tercer tipo de siniestro más suscitado en la clasificación de accidentes de tránsito, por este motivo es de gran importancia los estudios enfocados a disminuir el riesgo de lesiones o muerte en este tipo de choques. Existen numerosos ensayos para la evaluación de la seguridad en vehículos pequeños y pesados que dependiendo de la normativa propia de cada país pueden ser obligatorios o no, debido a los grandes costos requeridos se han empezado a utilizar herramientas computacionales con el fin de realizar ensayos similares a los del mundo real con el uso de menos recursos y la obtención de datos confiables.

El trabajo realizado en la Universidad Politécnica de Madrid y el que se simula el impacto frontal de la sección de un autobús que lo compara con un ensayo experimental previo, concluye que existe un error de ajuste 11.61% considera bastante aceptable en este tipo de trabajos. También considera que las simulaciones son herramientas complementarias que permiten dar solución a problemas ingenieril de gran interés en. (Delgado, 2016)

Varios trabajos son conocidos para analizar impactos frontales con el método de elementos finitos MEF los que se contrastaron que los resultados con ensayos experimentales (Sharma, 2013) (Tejasagar, y otros, 2012) (Mirzaamiri R, 2012) con buenos resultados en la simulación, validando así el uso de herramientas computacionales en la actualidad con el fin de mejorar las condiciones de seguridad en los vehículos. Se puede aplicar reglamentos que indican el procedimiento del ensayo, en Estados Unidos la Norma FMVSS 2018 de la agencia NHSTA analiza el impacto frontal de vehículos pequeños contra diferentes tipos de obstáculos como: barreras, pared rígida y vehículos con diferentes ángulos de choque. El objetivo principal de estos ensayos es evaluar la protección de los ocupantes. (Julaluk, y otros, 2010)

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Una de las técnicas más utilizadas para la resolución de problemas de ingeniería, es el uso de métodos numéricos tal como lo es el Método de Elementos Finitos MEF, el cual surge a partir de un modelo matemáticos propuesto para resolver un problema físico del mundo real. Obviamente los resultados obtenidos con este método son aproximaciones numéricas al resultado real del problema, pero, muy validas al momento de buscar soluciones en ingeniería.

Partiendo de la consideración que algunos materiales, presentan un comportamiento estructural alejado del típico lineal elástico, la realización de un análisis no lineal en el material puede mejorar sensiblemente la seguridad o economía del diseño de los elementos estructurales de los vehículos. Si se toma en cuenta las carrocerías de autobuses como caso de aplicación para el presente trabajo, durante un impacto aparece este comportamiento del material que no solo afecta a la resistencia estructural sino puede significar daño de sus ocupantes.

Por lo tanto, la principal contribución de este trabajo es presentar el procedimiento basado en simulaciones numéricas, del tipo dinámico no lineal, que permitan recrear las condiciones de impacto frontal establecidas en normativas internacionales y que tomen en cuenta diferentes características del choque. Se sabe que en el análisis de problemas no lineales solamente una resolución numérica proporciona una solución aceptable en la mayoría de los casos. La solución temporal que se pretende aplicar mediante la ecuación de la dinámica es la siguiente:

$$M\ddot{x} + F_i + F_e = 0$$

Ecuación 1: Ecuación de un modelo dinámico.

Donde:

$\ddot{x}$  = Vector aceleración

$M$  = Matriz de masa

$F_i$  = Fuerzas internas desarrolladas durante la deformación

$F_e$  = Fuerzas externas aplicadas y fuerzas de volumen

Existen software especializados para la resolución de este tipo de problemas, con los que se tratan análisis de choque, explosiones o conformado de materiales, todos ellos tienen la característica de sufrir de grandes deformaciones del material en lapsos de tiempo muy cortos. Una resolución del tipo explícita permite obtener modelos más estables y soluciones más confiables que los tradicionales modelos implícitos usados principalmente para problemas que implican lapsos de tiempo mayor. Numéricamente se realiza una integración de las ecuaciones que rigen el modelo, utilizando pasos de tiempo infinitos, resultando la ecuación siguiente.

$$M\ddot{x}^{(n)} + F_i^{(n)} + F_e^{(n)} = 0$$

Ecuación 2: Resolución explícita de la ecuación de un modelo dinámico.

Esta solución tiene como características ser eficiente y rápida, con pasos de tiempo pequeños y condicionalmente estable. El paso de tiempo al ser tan pequeño penaliza enormemente el tiempo de cálculo por lo que en ciertos casos se puede combinar con un análisis de tipo implícito en los últimos pasos del análisis.

### 2.1 Proceso de simulación aplicando MEF

Las etapas que siguen los programas se definen por: pre procesado, procesado y post procesado, en la primera etapa se crea un modelo geométrico del objeto de estudio que posteriormente se transforma en el modelo elementos finitos caracterizado por una malla y las condiciones externas e internas del problema real. Luego en la etapa de procesado que se resuelven las ecuaciones diferenciales para posteriormente en visualizar los resultados en la etapa de post procesado. A continuación, se puede ver en la figura 1 los pasos seguidos para la obtención de los resultados mediante la simulación numérica.

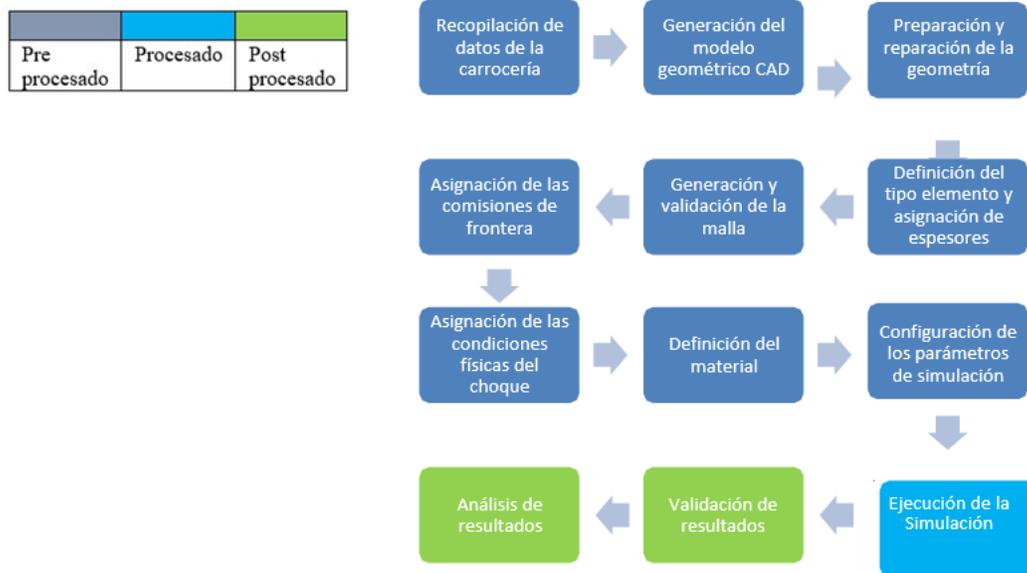


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de simulación con MEF

### 2.2 Validación de la simulación

Para la verificación de la simulación de un fenómeno explícito en la que se produce la interacción entre varios cuerpos que como característica tienen velocidades iniciales por defecto y experimentan un choque se aplica un criterio de balance de energías mediante la siguiente ecuación: (LS-DYNA Theory Manual, 2006)

$$E_I + E_V + E_{FD} + E_{KE} - E_W = E_I = \text{Constante}$$

Ecuación 3: Balance de energías en la simulación de impacto.

Donde:

EI= Energía interna, producida por la energía de deformación elástica y plástica y la energía artificial asociada a un control hourglass.

EV= Energía disipada por mecanismos viscosos.

EFD= Energía friccional.

EKE= Energía cinética.

EW= Trabajo producido por fuerzas externas.

### 2.3 Normativa referente a la resistencia en un impacto frontal.

Al momento de certificar la protección de los ocupantes en pruebas de seguridad se estudia el comportamiento de los componentes del vehículo y el efecto producido en los ocupantes de este. La norma americana FMVSS 208, FMVSS 203 y FMVSS209 son reglamentaciones actuales de las más usadas. En relación con vehículos de mayores proporciones se viene aplicando el reglamento ECE R29 para verificar la seguridad del conductor, esta reglamentación presenta las siguientes consideraciones:

- Los vehículos M2, M3 con un peso bruto superior a 7,5 toneladas se ensayan con una energía de impacto del péndulo de 55 KJ, las dimensiones del péndulo son 2,500 mm x 800 mm y construido de acero con una masa no menor a 1500 Kg.
- El péndulo debe estar sujeto a dos apoyos fijos a 1000 mm de distancia entre si con 3500 mm desde el eje hasta el centro de gravedad del impactador. La superficie del impactador debe estar en contacto con la parte sobresaliente del vehículo, además la posición punto H es de 50 mm bajo al punto-R del conductor. (UNECE R 29, 2007).

La figura 2 muestra las consideraciones geométricas del péndulo de impacto del ensayo, con las dimensiones de posicionamiento requeridas respecto al autobús.

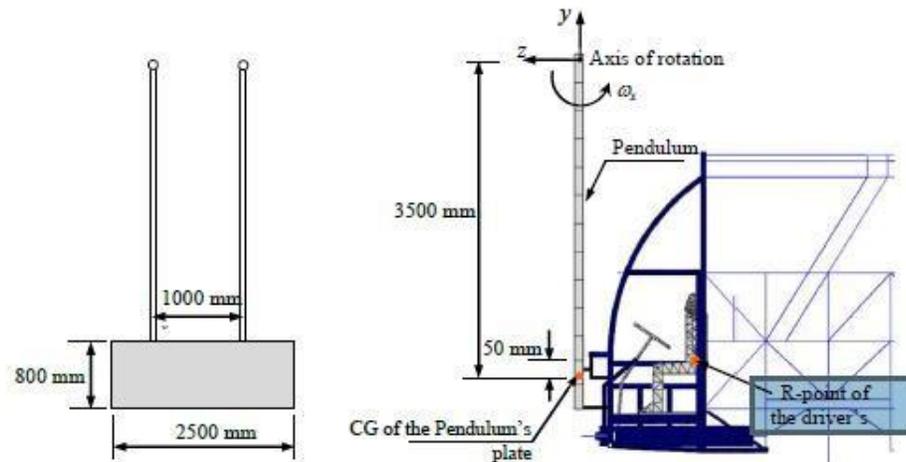


Figura 2. Especificaciones del reglamento R 29 de UNECE

Para el aseguramiento del espacio de supervivencia del conductor, no deben entrar en contacto los componentes del vehículo con el maniquí de prueba puesto que esto supone que no se va a causar lesiones al ocupante durante el choque. (UNECE R 29,2007)

## 2.4 Etapa de Pre procesado

En esta etapa se configuran todas las características del modelo previas a la ejecución de la simulación, por lo tanto, es importante definir con el mayor grado de similitud la geometría, el material, tipo de contacto entre componentes y las condiciones físicas iniciales en el ensayo de impacto para obtener resultados más aproximados a la realidad.

### 2.4.1 Generación de la geometría

El modelado CAD se lo obtuvo con las dimensiones del chasis, los paneles, el piso y sección frontal de la carrocería del autobús, se tomó en cuenta como zona de análisis hasta la primera ventana a partir de la puerta ya se reduce el consumo de recursos computacionales sin afectar los resultados buscados.

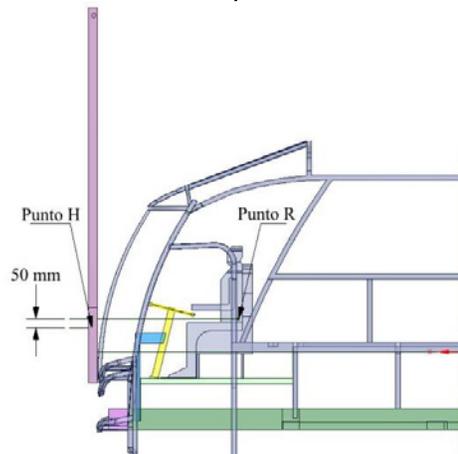


Figura 3. Características de los componentes del modelo computacional.

El tipo de elemento predominante es el tipo cascaron o conocido como Shell que si bien representa menor costo computacional supone de un tratamiento especial en las uniones. Por otro lado, el elemento tipo solido entrega información más completa del estado tensional o de esfuerzos, pero requiere de mayores recursos e incrementa el tiempo de análisis de la simulación. A continuación, se muestran los elementos usados en el modelo.

Tabla 1: Tipo de elementos usados en el modelo

Nº	COMPONENTE	TIPO	ESPEJOR (mm)	COMPORTAMIENTO
1	Carrocería	Cascarón (Shell)	2	Elástico-Plástico
2	Chasis	Cascarón (Shell)	7	Elástico-Plástico
3	Placas de sujeción del volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
4	Base del volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
5	Volante.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
6	Piso de la cabina.	Cascarón (Shell)	3	Elástico-Plástico
7	Maniquí de prueba.	Cascarón (Shell)	2	-
8	Péndulo de impacto.	Sólido (Solid)	-	Rígido
9	Sujeciones del péndulo	Sólido (Solid)	-	Rígido

Elaborado por: Autores

Fuente: Autores

### 2.4.2 Generación de la Malla

En el modelado de la malla se usan tetraedros para los elementos sólidos y cuadriláteros para los elementos Shell, con un tamaño entre 50 mm y 16.62 mm, se obtiene un número total de 15 530 nodos y 23 403 elementos. A continuación, se observa el modelo mallado.

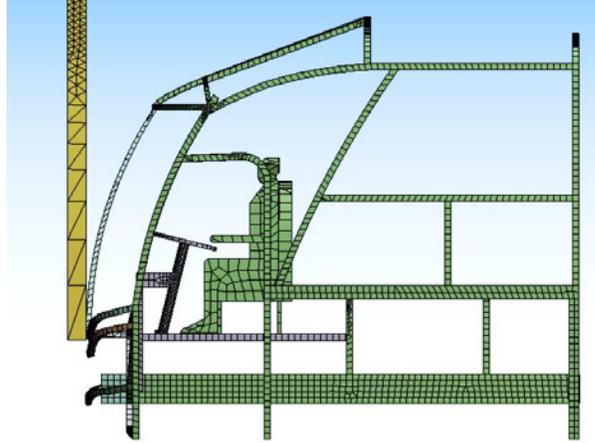


Figura 4. Mallado de los componentes.

La calidad de malla se determina mediante un análisis muy usado en este campo que es la relación de “Aspect Ratio” con un rango aceptable entre 0.8 - 1,0. (Arroba, 2013). Es así como el modelo tiene un valor medio de 0,847 en calidad de elemento en todo el modelo y se ha configurado el mallado de las uniones en las que se asegura que no exista penetración de nodos y coincidencia de nodos en las juntas fijas como vemos en la siguiente figura.

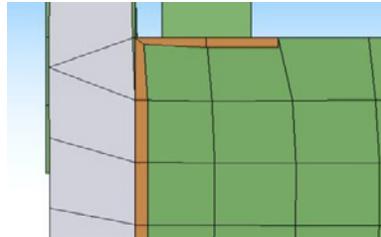


Figura 5. Control de malla en unión de componentes.

### 2.5 Condiciones de borde y especificaciones de la norma.

Para el ensayo de impacto frontal se fija la estructura del bus para eliminar los desplazamientos longitudinales del chasis esto menciona la misma norma, otra consideración es reducir el desplazamiento vertical en el sistema de suspensión utilizando bloques de madera colocados debajo del chasis. En el modelo computacional utilizado para la simulación se pueden recrear estas restricciones mediante la asignación de sujeciones fijas. Un aspecto importante para obtener datos precisos es definir correctamente la interacción de los componentes o llamados contactos, que en este modelo tienen las siguientes consideraciones.

Tabla 2. Tipo de interacción entre componentes del modelo.

Interacción entre componentes	Tipo de Contacto
Péndulo - Sujeciones de péndulo	Contacto sin fricción
Péndulo - Carrocería - Chasis - Placas de sujeción de volante - Base de Volante - Piso de la cabina	Contacto con fricción
Maniquí de prueba (7), Carrocería (1), Chasis (2), Placas de sujeción de volante (3), Base de Volante (4), Piso de la cabina (6)	No existe contacto

Elaborado por: Autores  
Fuente: Autores

### 2.4.3 Definición del Material

El material utilizado en la estructura del autobús es un acero estructural ASTM A500 cuyo comportamiento mecánico de la zona elástica y plástica ha sido comprobada en varios trabajos y utilizado en investigaciones similares (Arroba, 2013). En la siguiente gráfica de esfuerzo – deformación unitaria se observa el comportamiento de la materia y los datos usados para configurar en el software.

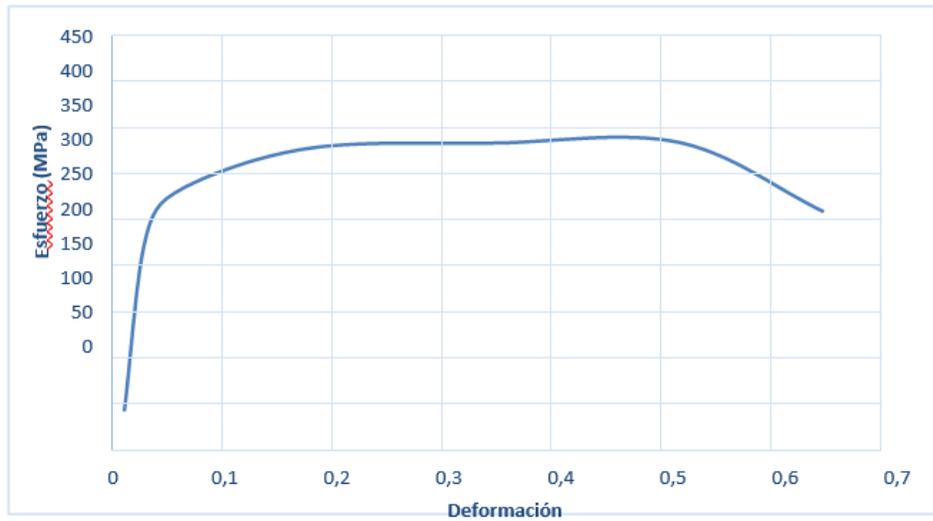


Figura 6. Gráfica de Esfuerzo – Deformación del material utilizado en la simulación.

Las características del modelo del material configuradas en el software LS DYNA se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 3 Características del material utilizado en el modelo discreto.

Características	Descripción
Definición	Tipo 24 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY Es un material elasto-plástico con una curva de esfuerzo-deformación que puede ser definida. También se puede definir la falla basado en la deformación plástica o el mínimo time step.
Densidad de Masa	RO 7,89E-009
Módulo de Young	E 2,1E+005
Radio de Poisson	PR 3E-001

Elaborado por: Autores

Fuente: Autores

Antes del proceso de simulación se recomienda una revisión del modelo que se muestra con el siguiente diagrama de bloques.



Figura 7. Proceso de verificación antes de ejecutar la simulación.

### 3 RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir del modelo computacional se presentan a continuación y sirven para verificar el cumplimiento de la norma en un vehículo de fabricación nacional.

#### 3.1 Procesado y Post procesado

El tiempo de procesamiento es exactamente de 1 hora , 27 minutos y 50 segundos, a continuación vemos la secuencia de movimientos a través de los 0.20 segundos que dura en realidad el ensayo de impacto.

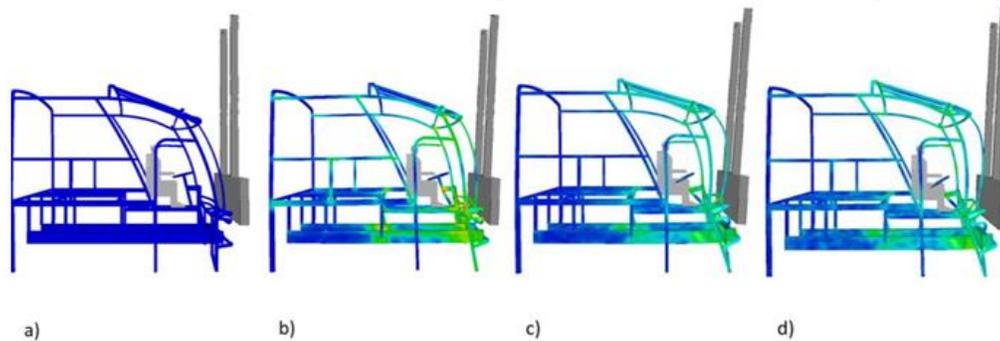


Figura 8. Simulación del impacto frontal según el reglamento UNECE R 29. **a)** Instante de inicio del impacto, tiempo=0,000s. **b)** Durante el impacto, tiempo=0,029s. **c)** Máxima intrusión, tiempo=0,152s. **d)** Fin de la simulación, tiempo=0,200s.

En la simulación se observa que el volante ha invadido el espacio de supervivencia que se puede traducir como la posible generación de lesiones al conductor durante el choque. El programa permite calcular el valor de invasión observando el desplazamiento de un nodo del volante, se produce un valor máximo de 153 mm en el tiempo de 0,11 s, como se ve en la siguiente gráfica.

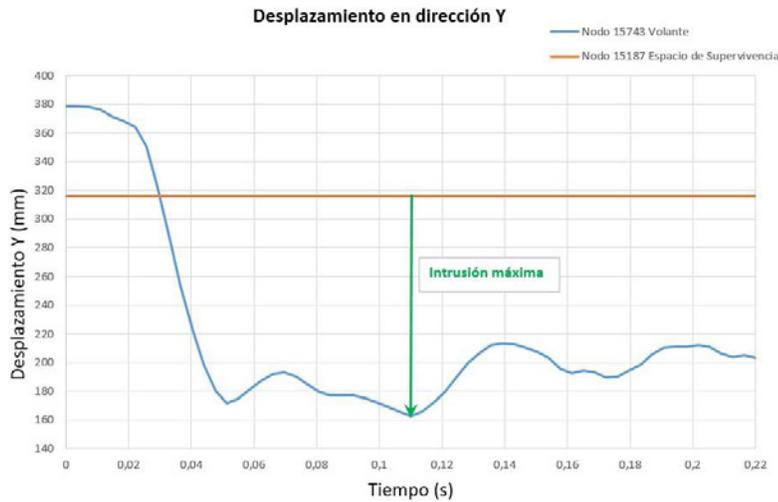


Figura 9. Desplazamiento del volante en relación con el espacio de supervivencia.

Las zonas que sufren mayores deformaciones luego del choque se observan a continuación, estos resultados también indican la mayor incidencia sobre determinados componentes de la carrocería y se puede estudiar posteriormente su tipo de falla.

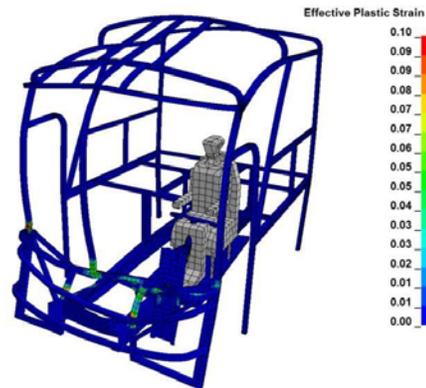


Figura 10. Deformación plástica efectiva de la carrocería.

Los valores críticos de deformación se ubican en el pórtico central, generalmente es donde se enfocan los fabricantes para mejorar su capacidad de absorción de energía mediante absorbentes de impacto (bumpers) o uso de materiales diseñados para ese propósito (espumas, aleaciones de aluminio, materiales compuestos).

### 3.2 Validación de los resultados

Mediante el principio de conservación de energía se verifica que la transformación de la energía cinética es decreciente debido a la desaceleración del péndulo y de tipo creciente la energía interna debido a la energía absorbida en el choque, también se cumple que el valor máximo de la energía de fricción y la energía hourglass no superen el 10% de la energía total del ensayo. Una vez analizados estos valores se puede asegurar que la simulación numérica entrega datos aceptables y cercanos al fenómeno real.

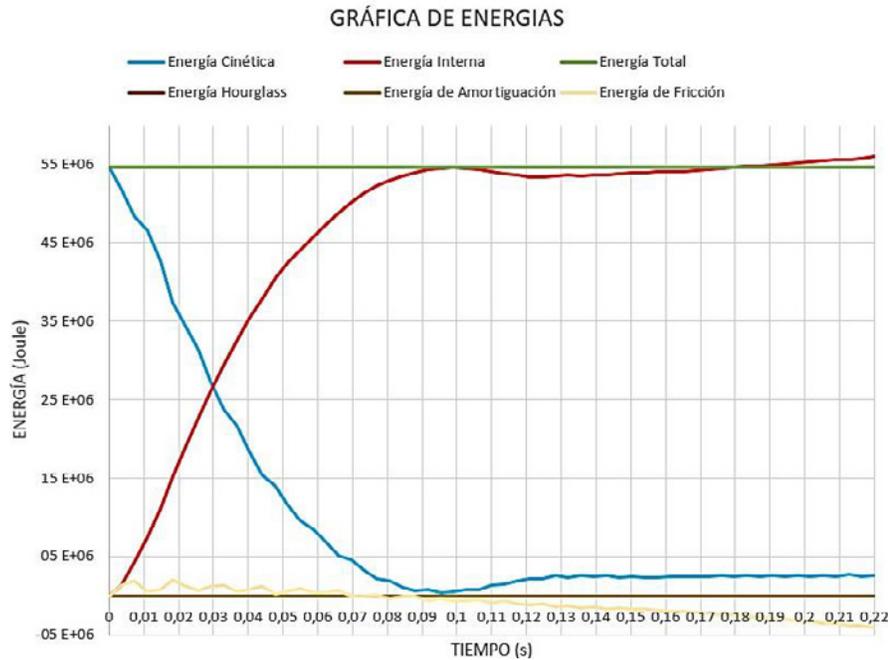


Figura 10. Gráfica de energías producidas en la simulación del impacto frontal.

En la gráfica se puede observar la conversión de energía cinética del péndulo en energía interna de la carrocería, constituye un fenómeno lógico de conversión de energía en ensayos de choque de este tipo impacto.

#### 4 CONCLUSIONES

- El Método de Elementos Finitos es una herramienta potente para analizar componentes de vehículos bajo cargas de impacto. Además, se pueden identificar zonas de mayor afectación o críticas que requieren ser rediseñadas o en las que se pueden cambiar de material o dispositivos de seguridad.
- La metodología usada es válida para diferentes problemas de ingeniería, incluso sirve para caracterizar la resistencia de ciertos materiales bajo cargas de impacto y determinar sus propiedades mecánicas. También los resultados de desplazamiento, deformaciones plásticas y esfuerzos pueden servir de base para investigaciones futuras.
- El caso presentado de la sección frontal del bus, indica que el modelo actual correspondiente a un bus interprovincial de fabricación nacional NO cumple los requerimientos de las norma UNECE R-29 por lo que se puede sugerir el desarrollo de investigaciones y revisión de las condiciones de seguridad.
- Para la etapa de diseño resulta muy útil el uso de simulaciones ya que se pueden evaluar diferentes modelos o configuraciones bajo múltiples condiciones de choque tales como: velocidades de impacto, tipos de impactador y ángulos de choque. De esta manera se podrían diseñar modelos más seguros que los que no han sido analizados.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó gracias al compromiso del Instituto de Investigaciones de la ESPOCH de colaborar y apoyar a los grupos de investigación en especial al Grupo GDP de la Facultad de Mecánica, por lo que hacemos público nuestro agradecimiento.

## 5 REFERENCIAS

**Arroba, C. 2013.** *Estudio del comportamiento mecánico de una sección de la superestructura del autobus interprovincial marca miral infiniti en chasis hino ak sometida a volccadura, mediante los programas ansys ls-dyna y su incidencia en el espacio de supevivencia.* s.l. : Universidad Técnica de Ambato, 2013.

**Delgado, Blanca. 2016.** *Análisis mediante el MEF de la protección de los conductores del Autobuses .* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2016.

*Improvement of crashworthiness of Bus Structure under Frontal Impact.* **Jangpradist P, Senawat S, Muangto B. 2015.** Incheon : Korea, 2015. Conference: 2015 World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics.

**Julaluk C, Sujeprapa C, Wachirut K.** *Study of effects of vehicle- front shapes and impact speeds on post- crash kinematic and injury mechanisms.* s.l. : King Mongkuts University of North Bangkok.

**Julaluk, Carmai, Sujeprapa, C y Wachirut, k. 2010.** *Study of effects of vehicle front shapes and impact speeds on post-crash kinematic and injury mechanisms.* s.l. : King Mongkuts University of North Bangkok, 2010.

**LS-DYNA Theory Manual. 2006.** 2006.

**Mirzaamiri R, Esfahanian, M. 2012.** *Test simulation and structure Improvement of IKCO 2624 Truck according to ECE R29.* s.l. : International Journal of Automotive Engineering, 2012.

*Protection of Occupants for Survival Space as per ECCE R29: A Study of Regulatory Requirements, New Proposals and Challenges of Implementation in Global Context.* **Sharma M. 2013.** s.l. : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013. Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. págs. 747-768.

**Sharma, Mukesh. 2013.** *Protection of occupants for survival space as per ECCE R29.* s.l. : Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congres, 2013.

**Tejasagar, A y Srinkanth, K. 2012.** *Simulation of vehicular frontal crash test.* s.l. : International Journal of Applied Research in Mechanical Engineering, 2012. Vol. 2.

*Título artículo. Apellido, Nombre. Año. Número, Ciudad : Editorial, Año, Vol. Volumen.*

**UNECE R 29. 2007.** VEHICLES WITH REGARD TO THE PROTECCION OF THE OCUPANTS OF DE CAB OF A COMMERCIAL VEHICLE. 2007.

## EVALUACIÓN DE RESISTENCIA AL IMPACTO MEDIANTE PÉNDULO TIPO IZOD EN PROBETAS IMPRESAS EN 3D DE PLA Y ABS CON ESTRUCTURA CÚBICA Y TRI HEXAGONAL

Geovanny Novillo, Edwin Pozo, Miguel Aquino, Miguel Escobar  
Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Facultad de Mecánica

### RESUMEN.

*Muchos polímeros en condiciones de servicio sufren impacto debido a choques, golpes, caídas accidentales, por ello es importante determinar esta propiedad para predecir la respuesta de las férulas construidas con el material y la malla que se comporte mejor ante el fenómeno citado.*

*Para este ensayo se seleccionó el método del péndulo tipo izod y las probetas se imprimieron en 3D con estructuras cúbica y tri hexagonal en los dos materiales (PLA y ABS) con las dimensiones establecidas en la norma ASTM D256. Las pruebas se realizaron en un péndulo tipo Izod marca Tinius Olsen. Este tipo de péndulo se utiliza frecuentemente para medir la resistencia al impacto de plásticos, las probetas de ensayo son algo similares a las de impacto Charpy.*

*De los resultados obtenidos se determinó que el ABS tiene mejor comportamiento ante impacto que el PLA y el mallado de impresión 3D recomendado comparando entre el de estructura cúbica y la tri hexagonal es la cúbica.*

**Palabras clave:** Ensayo Izod, PLA, ABS, impacto

### I. INTRODUCTION

Estos métodos de prueba cubren la determinación de la resistencia de los plásticos al tipo de péndulo "estandarizado" (martillos, montados en máquinas "estandarizadas", en rotura muestras estándar con un péndulo oscilante. Las pruebas estándar para estos métodos de prueba requieren muestras hecho con una muesca molida. En los métodos de prueba la muesca produce una concentración de estrés que aumenta la probabilidad de una fractura quebradiza, en lugar de dúctil. En Método de prueba, la resistencia al impacto se obtiene rotura por choque flexural como lo indica la energía extraída de invertir la muestra con muesca 180 ° en la prensa de sujeción. Los resultados de todos los métodos de prueba se informan en términos de energía absorbida por unidad de ancho de muestra o por unidad de sección transversal área debajo de la muesca.

Las máquinas con sus martillos de péndulo han sido "Estandarizados" en el sentido de que deben cumplir con ciertos requisitos, incluyendo una altura fija de caída del martillo que resulta en una velocidad sustancialmente fija del martillo en el momento del impacto. Sin embargo, los martillos de diferentes energías iniciales (producidas al variar sus pesos efectivos) son recomendados para usar con muestras de diferente resistencia al impacto.[1]

Además, los fabricantes de los equipos pueden usar diferentes longitudes y construcciones de péndulos con posibles diferencias en rigidez del péndulo resultante. Tenga en cuenta que otros pueden existir diferencias en el diseño de la máquina. Las muestras están "estandarizadas" en el sentido de que deben tener una longitud fija, una profundidad fija, y un diseño particular de muesca molida. El ancho de los especímenes es permitido variar entre límites.[2]



Fig. 1. Péndulo tipo Izod

La prueba de impacto del péndulo de exceso de energía indica la energía para romper muestras de pruebas estándar de tamaño especificado bajo parámetros estipulados de montaje de muestras, muescas y péndulo de velocidad al impacto.

La energía perdida por el péndulo durante la rotura de la muestra es la suma de lo siguiente:[3]

1. Energía para iniciar la fractura de la muestra
2. Energía para propagar la fractura a través de la muestra
3. Energía para lanzar el extremo libre (o extremos) del roto muestra ("corrección de lanzamiento")
4. Energía para doblar la muestra
5. Energía para producir vibraciones en el brazo pendular;
6. Energía para producir vibración o movimiento horizontal del bastidor o base de la máquina
7. Energía para superar la fricción en el rodamiento pendular y en el mecanismo indicador de exceso de energía, y para superar windage (arrastre de aire pendular)
8. Energía para sangrar o deformar plásticamente la muestra en la línea de impacto; y
9. Energía para superar la fricción causada por el roce del delantero (u otra parte del péndulo) sobre la cara del espécimen doblado.

Los resultados generados mediante péndulos que utilizan una celda de carga para registrar la fuerza de impacto y, por lo tanto, la energía de impacto, puede no ser equivalente a resultados que se generan utilizando probadores codificados manual o digitalmente que mida la energía restante en el péndulo después del impacto.



Fig. 2. Resultados del ensayo en el péndulo tipo Izod

La muesca en la muestra de Izod sirve para concentrar la tensión, minimizar la deformación plástica y dirigir la fractura a la parte del espécimen detrás de la muesca. La dispersión en la energía para romper se reduce así. Sin embargo, debido a las diferencias en

las propiedades elásticas y viscoelásticas de los plásticos, la respuesta a una muesca dada varía entre los materiales. Una medida de la "sensibilidad de muesca" de un plástico se puede obtener con un método de prueba comparando las energías para romper especímenes que tienen diferentes radios en la base de la muesca.[4]

Se debe tener precaución al interpretar los resultados de estos métodos de prueba estándar. Los siguientes parámetros de prueba pueden afectar la prueba resultados significativamente:

Método de fabricación, que incluye, entre otros, el procesamiento, condiciones de impresión 3d, diseño de las trayectorias de impresión 3D.

Método de muescas;

Velocidad de la herramienta para hacer muescas;

Calidad de la muesca;

Tiempo entre muescas y prueba;

Prueba de espesor de muestra,

Pruebe el ancho de la muestra debajo de la muesca, y

Acondicionamiento ambiental.

#### *Datos técnicos ABS*

El ABS se utiliza en diversos sectores en todo el mundo y es conocido por sus excepcionales propiedades mecánicas. El ABS se ha formulado específicamente para minimizar las deformaciones y garantizar una adhesión uniforme entre capas.

Excelentes propiedades mecánicas y adhesión entre capas (especialmente al utilizar el accesorio de compuerta frontal), buena estética, deformación mínima y adhesión fiable al lecho.

Prototipado visual y funcional y fabricación en series cortas.

Aplicaciones en contacto con alimentos en vivo. La exposición prolongada a radiación UV puede afectar negativamente a las propiedades de una impresión ABS. Aplicaciones en las cuales la parte impresa está expuesta a temperaturas superiores a 85°C.

#### *Datos técnicos PLA*

El filamento de PLA ofrece una experiencia de impresión 3D sencilla gracias a su fiabilidad y buena calidad superficial.

El PLA está fabricado con materiales orgánicos y renovables. Es seguro, fácil de utilizar en la impresión y se adecua a una amplia gama de aplicaciones para usuarios nuevos y experimentados.

El PLA ofrece una buena resistencia a la tracción y calidad superficial, facilita el trabajo a altas velocidades de impresión, simplifica el uso en entornos domésticos y de oficina y permite la creación de piezas de alta resolución. Existe una amplia gama de opciones de color disponibles.

Herramientas domésticas, juguetes, proyectos educativos, objetos de exposición, prototipado, modelos arquitectónicos y también métodos de fundición a la cera perdida para crear piezas de metal.

Aplicaciones en contacto con alimentos e in vivo. Uso prolongado en exteriores o aplicaciones en las cuales la parte impresa está expuesta a temperaturas superiores a 50 °C.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material. Las impresoras 3D son por lo general más rápidas, más baratas y más fáciles de usar que otras tecnologías de fabricación por adición, aunque como cualquier proceso industrial, estarán sometidas a un compromiso entre su precio de adquisición y la tolerancia en las medidas de los objetos producidos. Las impresoras 3D ofrecen a los desarrolladores del producto la capacidad para imprimir partes y montajes hechos de diferentes materiales con diferentes propiedades físicas y mecánicas, a menudo con un simple proceso de ensamble. Las tecnologías avanzadas de impresión 3D pueden incluso ofrecer modelos que pueden servir como prototipos de producto.[5]

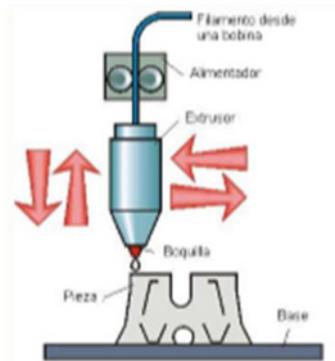


Fig. 3. Izod impact test - Charpy impact test

El ensayo de Izod (en inglés: Izod impact testing) es un tipo de ensayo destructivo dinámico de resistencia al choque que utiliza un péndulo de Charpy como herramienta. Este procedimiento se lleva a cabo para averiguar la tenacidad de un material. En el caso de que la fractura sea totalmente frágil, este valor coincidirá con el de la resiliencia del material.[6]

El ensayo consiste en romper una probeta de sección cuadrangular a través de tres entalladuras que tiene situadas en distintas caras. El procedimiento se repite para cada entalladura. La resiliencia se obtiene de la media de los datos obtenidos en los tres pasos. El ensayo Izod difiere del ensayo de Charpy en la configuración de la probeta entallada.

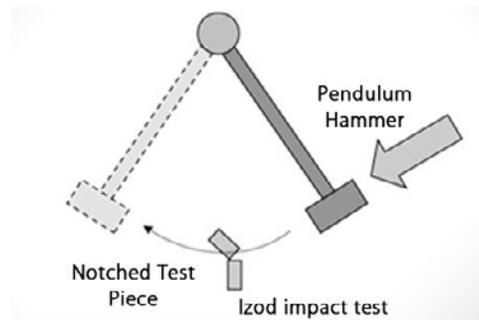
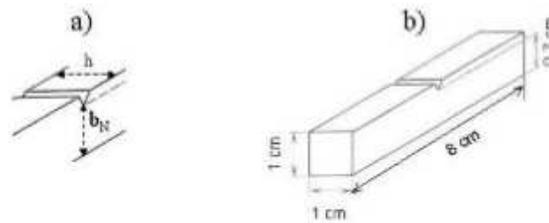


Fig. 4. Diagrama de impacto

La máquina de ensayo de impacto Charpy permite registrar las curvas fuerza-tiempo generadas durante los ensayos, y a su vez nos permite obtener el valor de la energía absorbida por los materiales en el proceso de fractura. Las probetas usadas en nuestros experimentos tienen forma de paralelepípedos con una sección transversal de 1x1 cm<sup>2</sup> y 8 cm de longitud. Las entallas realizadas a las probetas tienen una profundidad de 3 mm y el radio de estas es variable de acuerdo con la figura. Las probetas con entalla deben colocarse en el soporte S, de forma tal que el lado de la entalla quede opuesto a la cara de la probeta que estará directamente expuesta al impacto del péndulo.[7]

Tabla 1. Relación entre el ángulo de carga y la velocidad de impacto.

Ángulo de carga ( $\alpha$ )	Velocidad del impacto (m/s)
80 °	2.55
100 °	3.03
110 °	3.24
120 °	3.42
139 °	3.71



#### Desarrollo del ensayo

Para el desarrollo del ensayo se inicia con el diseño de las probetas en un software CAD, en base a estos diseños se realizan las impresiones 3D con distintas configuraciones como se muestra en la figura.

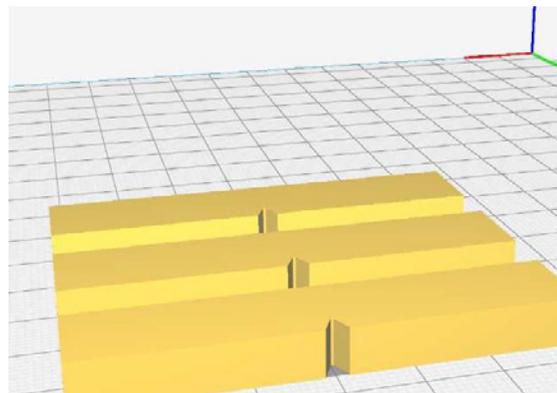


Fig. 5. Probetas para impresión 3D

Se obtienen varias probetas con distintas configuraciones de relleno de acuerdo con la figura [8]

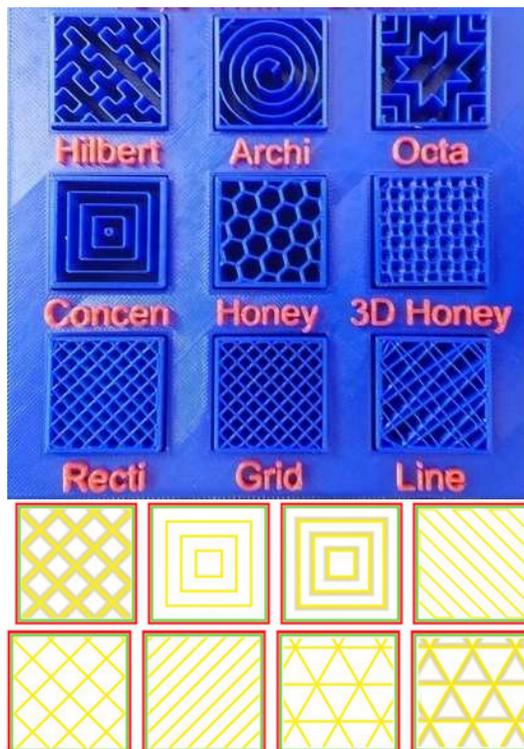


Fig. 6. Distintas formas de relleno interno para las probetas

Los ensayos se realizaron en distintos materiales: ABS y PLA

Con las probetas impresas se procede a el desarrollo del ensayo Izod impact test de acuerdo a la norma ASTM D256 como se muestra en la figura



Fig. 7. Distintas formas de relleno interno para las probetas

### III. RESULTADOS

Los resultados de las pruebas de impacto mediante péndulo tipo Izod de acuerdo a la norma ASTM D256 obtenidos son los siguientes:[9]

Tabla 2. Resultados en probeta de PLA impresa en 3D con estructura cúbica

Material	PLA
Estructura	Cúbica
Ancho de probeta (mm)	S1 (J/m)
13	17,72
13	17,46
13	17,85
13	17,59
13	18,49
13	17,55
<b>Media</b>	<b>20,71</b>

Tabla 3. Resultados en probeta de PLA impresa en 3D con estructura tri hexagonal.

Material	PLA
Estructura	Tri hexagonal
Ancho de probeta (mm)	S1 (J/m)
12,75	16,09
12,5	20,11
13	21,3
12,5	21,31
12,5	17,66
12,5	18,7
<b>Media</b>	<b>19,20</b>

Tabla 4. Resultados en probeta de ABS impresa en 3D con estructura cúbica

Material	ABS
Estructura	Cúbica
Ancho de probeta (mm)	S1 (J/m)
13	38,34
13	37,47
12,75	38,66
12,5	39,69
12,5	39,28
13	37,58
<b>Media</b>	<b>38,50</b>

Tabla 2. Resultados en probeta de ABS impresa en 3D con estructura tri hexagonal.

Material	ABS
Estructura	Tri hexagonal
Ancho de probeta (mm)	S1 (J/m)
12,5	37,74
13	33,85
13	35,18
13	32,14
12,5	37,83
12,75	32,69
<b>Media</b>	<b>34,91</b>

De acuerdo con los datos tabulados se establece un gráfico comparativo entre los dos materiales y sus mallas de impresión del ensayo de impacto realizado considerando que el material ABS con malla de estructura cubica absorbe mayor energía.[10]

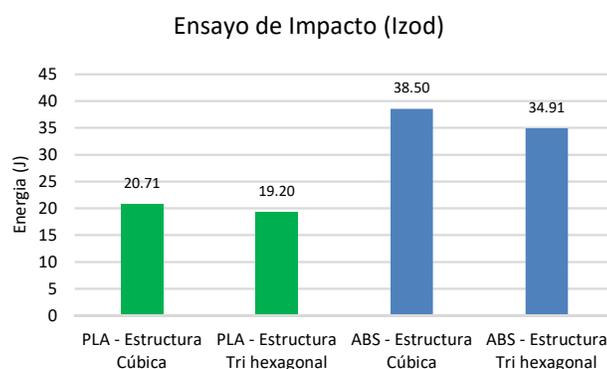


Fig. 8. Resultados de la energía absorbida en el ensayo de impacto (Izod) para probetas de PLA y ABS impresas en 3D con estructura cúbica y tri hexagonal.

#### IV. CONCLUSION

La experimentación en el péndulo tipo IZOD de acuerdo la norma ASTM D256 estableció una relación entre la estructura interna de las probetas (mallas) y su comportamiento a la fractura, determinándose en unidades de J/m.

De acuerdo con los datos tabulados entre los dos materiales y sus mallas de impresión del ensayo de impacto realizado considerando que el material ABS con malla de estructura cubica absorbe 38,5 J/m.

#### REFERENCIAS

- [1] Y. Ortega, "Prueba de impacto: ensayo Charpy," *Rev. Mex. física E*, vol. 52, no. 1, pp. 51–57, 2006.
- [2] F. J. Perosanz, M. Serrano, C. Martinez, and J. Lapeña, "Cálculo de la tenacidad de fractura a través de ensayos dinámicos," *Rev. Metal.*, vol. 34, no. 5, pp. 399–406, 1998.
- [3] R. A. Dean, R. M. Duelli, L. A. Lifschitz, and H. H. Brito, "Revisión sobre bancos de ensayos para la medición de pequeños impulsos," in *IV Congreso Anual Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*, 1998, pp. 288–297.
- [4] F. Villareal, M. T. Piovan, F. Diaco, and C. Nacud, "Desarrollo De Una Máquina De Ensayo Charpy Para Plásticos: Evaluación De Propiedades De Impacto De Probetas Construidas Por Impresión 3d."
- [5] E. Gamboa Rosas, E. Mosquera Gómez, L. Valencia Zapata, and others, "Diseño de guías de laboratorio para el ensayo de productos plásticos," Universidad Autónoma de Occidente, 1994.

- [6] J. C. Costa and W. B. Castelló, “Análisis de la tenacidad a la fractura de metales a partir de un modelo numérico basado en el ensayo Charpy.”
- [7] S. L. Cardona, D. H. M. Grajales, and W. P. Castro, “Instrumentación de un péndulo tipo Izod, para evaluación de la resistencia al impacto de polímeros,” Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnologías. Tecnología Mecánica, 2016.
- [8] M. I. Beltrán and others, “Tema 1. Estructura y propiedades de los polímeros,” *Tecnol. los Polímeros*, 2011.
- [9] L. Aretxabaleta, J. Aurrekoetxea, I. Urrutibeascoa, and M. Sánchez Soto, “Caracterización a impacto de plásticos: modelos con criterio de fallo,” in *Anales de Mecánica de la Fractura*, 2004, vol. 21, pp. 310–314.
- [10] J. V. Molina Osejós, “Caracterización de materiales termoplásticos de ABS y PLA semi-rígido impresos en 3D con cinco mallados internos diferentes,” Quito, 2016., 2016.

## SISTEMA DE TELEMETRÍA APLICADO A VEHÍCULOS DE BAJO CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARTICIPANTES EN LA COMPETENCIA SHELL-ECO MARATHON

Morocho, David <sup>1</sup>; Gavilanes, Javier <sup>2</sup>; Néjer, Jorge <sup>3</sup>

1-3. Facultad de Mecánica, ESPOCH. Riobamba, Ecuador

Autor de correspondencia: david.morocho@esPOCH.edu.ec

### RESUMEN

El presente trabajo muestra el procedimiento para la implementación de un sistema de telemetría aplicable en los vehículos participantes en la competencia Shell Eco Marathon, ya que al ser una competencia de eficiencia de consumo energético se ha conseguido reducir el consumo de combustible mediante la utilización de dicho sistema el mismo que nos permite supervisar sensores del sistema de inyección en tiempo real que se encuentran a cierta distancia lo cual nos permite tomar acciones para generar un control del proceso de conducción y de esta manera formular una estrategia que nos permita obtener el menor consumo de combustibles.

Palabras clave: sistema de inyección, sensores, telemetría.

### ABSTRACT

This paper shows the procedure for the implementation of a telemetry system applicable in the vehicles participating in the Shell Eco Marathon competition, since being an energy efficiency competition has reduced fuel consumption through the use of the same system that allows us to monitor sensors of the injection system in real time that are at a certain distance which allows us to take actions to generate a control of the driving process and this formulate a strategy that allows us to obtain the least fuel consumption.

Keywords: injection system, sensors, telemetry.

### 1 INTRODUCCIÓN

Shell Eco-Marathon, al ser una competencia de eficiencia de consumo energético y debido a que la gran parte de prototipos participantes cuentan con diferentes estrategias de operación, por lo tanto, se implementara un sistema de telemetría en uno de los prototipos participantes, para optimizar su desempeño y conseguir que consuma la menor cantidad de combustible. (Marathon, 2019)

Después de haber tenido una participación en la competencia Shell Eco-Marathon Brasil 2018, se pudo apreciar que uno de los principales problemas que radican en cuanto al desempeño del prototipo es la falta de comunicación y monito-reo de los diferentes parámetros de funcionamiento del prototipo en tiempo real, los cuales son de mucha importancia ya que permite tomar de decisiones para asistir al piloto y por ende tener una operación más eficiente del prototipo.

Es por eso por lo que se ha visto la necesidad de investigar y desarrollar un instrumento con tecnología capaz de estudiar el desempeño del vehículo y del piloto durante de la carrera, asistiendo en la corrección de errores de manejo y en la formulación de estrategias (Jiménez, 2006)

En la actualidad los diferentes tipos de sistema de monitoreo y comunicación implementados en los prototipos participantes en la competencia Shell Eco-Marathon han permitido tener una ventaja notable sobre los otros prototipos que no poseen dicho sistema, obtenido mejores resultados dentro de la competencia.

Con el presente trabajo se mostrará que, mediante la utilización de dicho sistema, resulta ser beneficiosa para la participación del prototipo, lo cual se lograra, aplicando los conocimientos adquiridos a lo largo de la formación académica, interviniendo en uno de los principales problemas que se presentan dentro de esta competencia.

Consecuentemente, este sistema al ser una herramienta con la cual podemos supervisar sensores y tomar acciones para generar un control de procesos que se encuentran a cierta distancia, y tener una mejora notable en la eficiencia de consumo energético, por ende, se podrá trabajar con una tecnología que permita obtener un buen desempeño en cuanto a la competencia. (J. Herrera, 2014)

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Teniendo en claro las normativas del reglamento de la competencia shell-eco marathon 2019 no se ha encontrado ningún impedimento en cuanto a la implementación de un sistema de telemetría; con lo que se prosiguió a realizar el análisis de los parámetros que van a ser monitoreados, los cuales nos permitirán obtener datos de suma importancia.

### 2.1 Sensores utilizados en el sistema

Una vez realizado la selección de los parámetros a ser monitoreados se continúa a la extracción de dicha información de los sensores del sistema de inyección y a su vez a la implementación de sensores que nos permitan obtener datos sobre el comportamiento del prototipo. En la Tabla 1 se especifica los sensores a utilizar.

Tabla 1: Descripción de sensores

Sensor	Datos a obtener
ECT (Engine Coolant Temperature)	Temperatura del motor
CKP (Crankshaft position sensor)	Revoluciones por minuto del motor
MAP (Manifold Absolute Pressure)	Presion del aire de entrada
TPS (Throttle Position Sensor)	Posicion de la mariposa de aacelearacion
WSS (Wheel Speed Sensor)	Velocidad del prototipo
TERMISTOR	Temperatura del habitaculo
CAUDALIMETRO	Flijo del cosumo del combustible

Elaborado por: Autores  
Fuente: Sistema de telemetría

#### ECT (Engine Coolant Temperature)

El sensor ECT responde a los cambios en la temperatura del refrigerante del motor. Mediante la medición de la temperatura del refrigerante del motor, de esta manera la ECU conoce la temperatura media del motor. Este sensor ECT tiene un elemento sensor NTC, Esto significa, con el aumento de la temperatura, la resistencia del elemento sensor cae. (controllers, 2019)

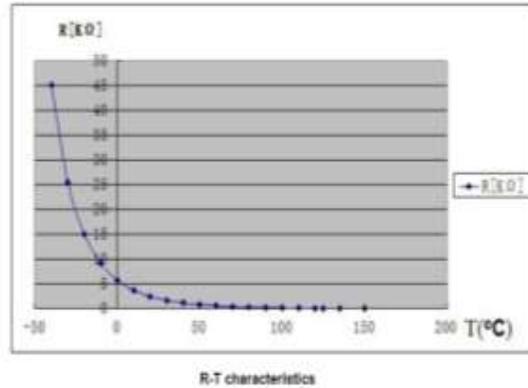


Figura 1: Temperatura vs Resistencia del sensor

**CKP (Crankshaft position sensor)**

El sensor ECT responde a los cambios en la temperatura del refrigerante del motor. Mediante la medición de la temperatura del refrigerante del motor, de esta manera la ECU conoce la temperatura media del motor. Este sensor ECT tiene un elemento sensor NTC, Esto significa, con el aumento de la temperatura, la resistencia del elemento sensor cae. (controllers, 2019)

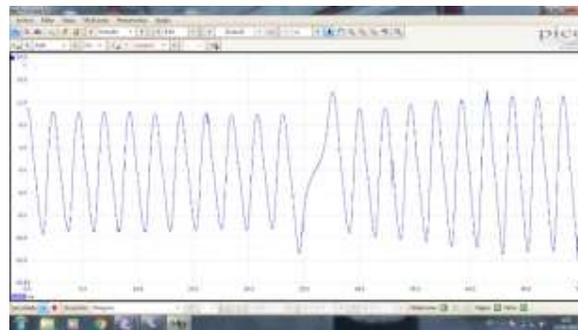


Figura 2: Señal de sensor CKP

**MAP (Manifold Absolute Pressure)**

EL sensor MAP requiere una fuente de alimentación de + 5v, un retorno a tierra y tiene una salida de tensión analógica. La salida del sensor está en el rango de 0-5v. Es lineal proporcional a la presión del aire medido, como se muestra en la figura. (controllers, 2019)

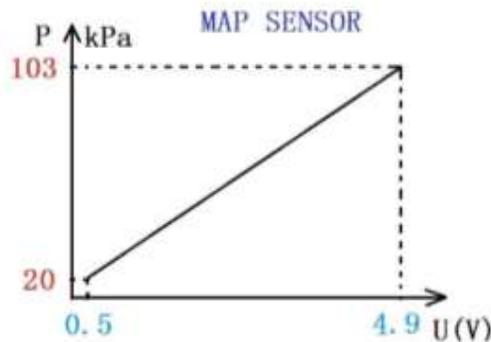


Figura 3: Presión de aire Vs voltaje de sensor

### TPS (Throttle Position Sensor)

Este sensor de posición del acelerador (TPS) está conectado mecánicamente a la placa del acelerador. El elemento sensor tiene un brazo que gira con la placa del acelerador. El brazo tiene un punto de contacto en el potenciómetro que actúa como un divisor de voltaje. El potenciómetro tiene un suministro de +5V y retorno a tierra. El punto medio es el punto de tensión de salida. El voltaje es proporcional al ángulo de rotación de la placa del acelerador, en la siguiente imagen se muestra la gráfica del sensor. (controllers, 2019)

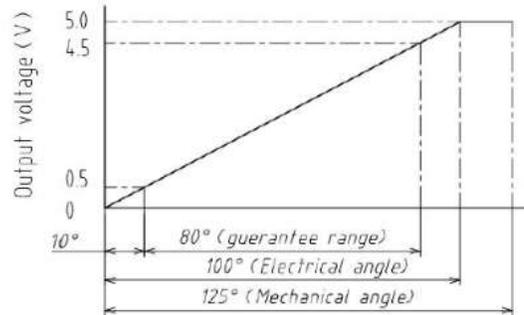


Figura 4: Porcentaje de apertura Vs Voltaje de sensor

### WSS (Wheel Speed Sensor)

Los sensores WSS tienen la función de detectar en tiempo real el estado de rotación de las ruedas del vehículo y también se pueden utilizar para detectar la velocidad y la distancia recorrida.

Para poder implementar este sensor se incorporan un circuito electrónico conocido como “encoder en cuadratura”. Para obtener una señal PWM a través de la lectura de estas señales por medio de un microcontrolador, es posible conocer la velocidad de giro de la rueda. A continuación, se muestra la señal del sensor.

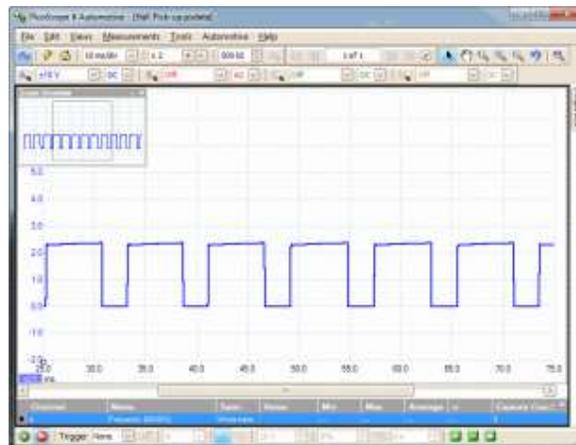


Figura 5: Gráfica de la señal del sensor

**Termistor**

Para la lectura de temperatura del habitáculo se logra con un transistor con el LM35, es un circuito electrónico sensor que puede medir temperatura. Su salida es analógica, es decir, te proporciona un voltaje proporcional a la temperatura. El sensor tiene un rango desde  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $150^{\circ}\text{C}$ . Su popularidad se debe a la facilidad con la que se puede medir la temperatura. Incluso no es necesario de un microprocesador o microcontrolador para medir la temperatura. Dado que el sensor LM35 es analógico, basta con medir con un multímetro, el voltaje a salida del sensor. a continuación, se muestra la gráfica del LM35 y el número de mediciones.

**Caudalímetro**

Este sensor contiene un molinete para medir cuánto líquido se ha movido a través de él. Hay un sensor de efecto hall magnético integrado que genera un impulso eléctrico con cada revolución. El sensor viene con tres cables: rojo (alimentación de 5-24 V CC), negro (tierra) y amarillo (salida de pulso de efecto Hall). Al contar los pulsos desde la salida del sensor, puede calcular fácilmente el flujo de agua. Cada pulso es de aproximadamente 2.25 mililitros. Tenga en cuenta que este no es un sensor de precisión, y la frecuencia del pulso varía un poco dependiendo del caudal, la presión del fluido y la orientación del sensor. A continuación, se muestra la señal del sensor.

**2.2 DISEÑO LAS PLACAS EMISOR RECEPTOR**

El sistema de telemetría debe incorporarse a las conexiones del vehículo, y debe ser considerado en el diagrama de conexiones, como parte de los requisitos solicitados por los organizadores de la competencia. El sistema consta de un emisor y un receptor. El emisor es quien va incorporado al vehículo, y se detalla en la siguiente figura.

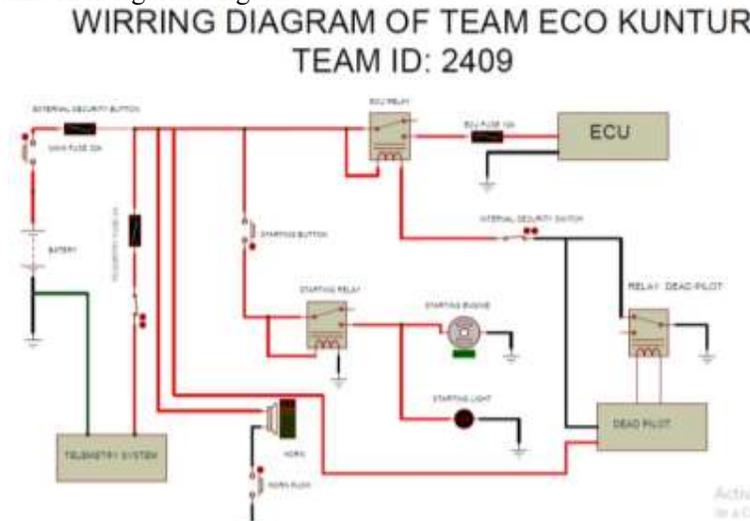


Figura 6 diagrama de conexión en el prototipo

**Emisor**

El trabajo del emisor consiste en procesar cada uno de los datos extraídos del vehículo esto gracias a microcontroladores que permiten monitorear cada una de las variables. EL sistema realiza el procesamiento por secciones separadas de cada sensor mediante un Arduino nano, la información es enviada a un Arduino Mega central el cual está programado para enviar la señal a un

receptor mediante el uso de un módulo NRF que nos permite enviar la información a la base de control ubicada estratégicamente a los alrededores de la pista con un alcance máximo de 1km de distancia. A continuación, se muestra el diseño y conexiones de la placa emisor del sistema de telemetría.

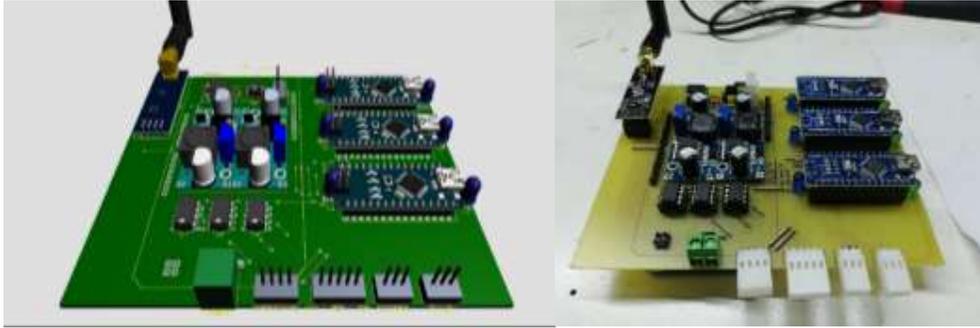


Figura 7: Diseño y montaje de la placa PCB del emisor

Adicional al procesamiento y envío de los valores de cada sensor se instaló una pantalla LCD que permitirá al piloto visualizar la información procesada.

### Receptor

Para el diseño de la placa receptor se lo hace mediante el uso de un Arduino nano el cual es el encargado de procesar la información que recibe el módulo NRF, dicha información es procesada y visualizada mediante una interfaz gráfica diseñada por medio del software LABWIEV la cual es posible apreciarle mediante la conexión a un ordenador. En las siguientes imágenes se muestra el diseño de la placa receptora y la interfaz gráfica que nos permite visualizar los datos obtenidos.

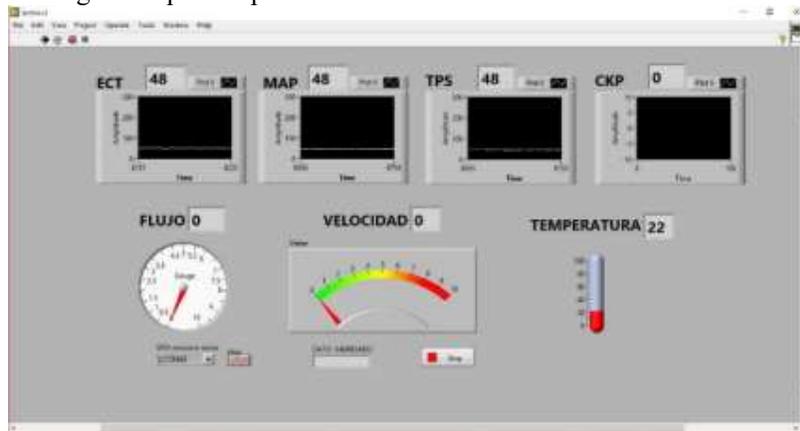


Figura 8 interfaz grafica

Por último, se prosigue al diseño y elaboración de las cajas protectoras diseñadas utilizando herramientas CAD para proceder a realizar mediante impresión 3D, a continuación, se muestra la cada placa con su respectiva caja protectora.



Figura 9 caja protectora del emisor y receptor

### 3 RESULTADOS

Se realizaron distintas pruebas de funcionamiento en la ciudad de Riobamba para lo cual se estableció un recorrido simulando la pista de la competencia con lo que se obtuvo los siguientes resultados.

Tabla 2: Pruebas en pista

Sensor	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3
CKP (RPM)	3500	4100	3800
ECT (°C)	93	90	95
MAP (kPa)	26	28	27
TPS (%)	50	52	60
WSS (Km)	22	20	25
TERMISTOR (°C)	20	22	23
CAUDALIMETRO (Lt)	0,72	0,67	0,89

Elaborado por: Autores

Fuente: Datos provenientes del sistema

Los resultados obtenidos en la prueba que se lo realizó en una pista de tenía 780 m de perímetro con lo cual se obtuvo un consumo de 0.89 Lt en 5 vueltas de la pista con lo cual se obtuvo un recorrido de 390 km.



Las pruebas se realizaron con un tanque de combustible de 250 ml el cual es otorgado y establecido por la competencia para obtener el equivalente de la distancia recorrida por litro de combustible consumido. Para ello los técnicos de la competencia realizan el siguiente cálculo para poder tener este equivalente.

$$\text{distancia resultante/litro} = \frac{1\text{Lt} \times \text{distancia recorrida}}{0.25\text{Lt}}$$

Ecuación 1: Cálculo de consumo Shell-Eco Marathon

en la siguiente tabla se indica los resultados de las 4 últimas competencias.

	1° Lugar (Km/Lt)	2° Lugar (Km/Lt)
shell-eco marathon 2016	190,2	166,11
shell-eco marathon 2017	525,7	311,9
shell-eco marathon 2018	424,9	413,6
shell-eco marathon 2019	542,4	167,6

Elaborado por: Autores  
Fuente: Eco-shell Marathon statistics

Mediante la toma de datos obtenidos se puede calcular el equivalente de la distancia recorrida por litro de combustible consumido.

$$\text{distancia resultante} = \frac{1\text{Lt} \times 109.55\text{Km}}{0.25\text{Lt}}$$

$$\text{distancia resultante/litro} = 438.20 \text{ km/Lt}$$

Con lo que llegamos a conclusión que mediante el uso de la telemetría llegamos a tener resultados bastantes favorables con respecto a los resultados finales de la competencia anterior.

#### 4 CONCLUSIONES

Mediante la implementación del sistema de telemetría en el prototipo participante en la competencia shell-eco marathon se logró obtener los datos necesarios que fueron útiles para tener una valoración del comportamiento del motor en cuanto al consumo de combustible.

Con la ayuda de dicho sistema se pudo apreciar la operación del piloto y el comportamiento del prototipo en tiempo real de funcionamiento con lo cual se pudo formular estrategias de conducción más eficientes

Gracias al uso de este sistema de telemetría y en las pruebas realizadas se pudo apreciar que existe una mejora en cuanto al consumo de combustible en comparación a la participación de la competencia shell-eco marathon 2018 que tenía un consumo alrededor de 350 km/Lt, estos datos son de gran para la programación de la ECU y para la formulación de estrategias de conducción.

#### 5 AGRADECIMIENTOS

Un agradecimiento especial a todos quienes conforman el equipo Eco-Kuntur ESPOCH, estudiantes, docente y autoridades de la Facultad de Mecánica y la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, gracias por permitir que el equipo siga mejoran cada año.

#### 6 REFERENCIAS

**Acosta, Bryand. 2012.** SHELL ECO-MARATHON. [En línea] 2012. <http://www.mme.fiu.edu/wp-content/uploads/2013/04/R-T1-ShellEcoMarathon.pdf>.

- Alves, Jericho y Kurtz, Benjamin. 2013.** *Shell Eco-marathon*. Northern Arizona : Northern Arizona University , 2013.
- An Inter-disciplinary Approach to the Development of a Low-consumption Prototype for the European Shell Eco-marathon. In Advanced Materials Research. Donateo, T, y otros. 2014.* 2014, Trans Tech Publications., págs. 977-982.
- Carbon fiber monocoque for a hydrogen prototype for low consumption challenge. Airale, A, Scattina, Alessandro y Carello, Massimiliana . 2011.* 2011, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, págs. 386-392.
- Carello, M, Filippo, N y d'Ippolito, R. 2012.** *Performance optimization for the XAM Hybrid Electric Vehicle prototype* . s.l. : SAE Technical Paper, 2012.
- Chamba, Jhefferson y Jaramillo, Diego. 2016.** *Sistema de Dirección y Frenos para Vehículo de competencia Shell Eco Marathon. BS thesis.* Cuenca : Universidad del Azual, 2016.
- controllers, auto electronics and. 2019.** *ecotrons. ecotrons.* [En línea] 12 de 10 de 2019. <https://www.ecotrons.com>.
- Descartes , Rene y Caimi, Mario. 2009.** *Discurso del Metodo.* Buenos Aires : Ediciones Colihue S.R.L., 2009.
- Frías, Paul César. 2017.** *Configuración del tren motriz para un vehículo Shell Eco-Marathon. MS thesis.* Cuenca : Universidad del Azuay, 2017.
- J. Herrera, M. Barrios,S.Pérez. 2014.** *Diseño e implementación de un sistema scada inalámbrico.* Colombia : s.n., 2014.
- Jiménez, J. Pablo Angulo. 2006.** *Maestro en Ciencias con Especialidad en Sistemas de.* Mexico : s.n., 2006.
- Marathon, Shell Eco. 2019.** *Shell Eco Marathon.* [En línea] 2019. <https://www.shell.com/make-the-future/shell-ecomarathon.html>.
- Mora De Labastida, Natalia.** Universidad de Palermo. [En línea] [http://fido.palermo.edu/servicios\\_dyc/////blog/docentes/trabajos/17306\\_55962.pdf](http://fido.palermo.edu/servicios_dyc/////blog/docentes/trabajos/17306_55962.pdf).
- Royal Dutch Shell . 2018.** *About Shell Eco-marathon* . [En línea] 22 de Marzo de 2018. <https://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/about.html>.
- Royal Dutch Shell. 2018.** *SHELL ECO-MARATHON 2018 OFFICIAL RULES CHAPTER I* . 2018.
- Shell International Petroleum Company Limited. 2017.** *Shell Global. Shell Eco-marathon.* [En línea] 17 de 11 de 2017. <http://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/about.html>.
- Tanner, Keith. 2005.** *How to build a cheap sports car.* St. Paul, Mn : Motorbooks, 2005.
- Título artículo. Apellido, Nombre. Año. Número, Ciudad : Editorial, Año, Vol. Volumen.*

## 7 BIBLIOGRAFIA

- Acosta, Bryand. 2012.** *SHELL ECO-MARATHON.* [En línea] 2012. <http://www.mme.fiu.edu/wp-content/uploads/2013/04/R-T1-ShellEcoMarathon.pdf>.
- Alves, Jericho y Kurtz, Benjamin. 2013.** *Shell Eco-marathon*. Northern Arizona : Northern Arizona University , 2013.
- An Inter-disciplinary Approach to the Development of a Low-consumption Prototype for the European Shell Eco-marathon. In Advanced Materials Research. Donateo, T, y otros. 2014.* 2014, Trans Tech Publications., págs. 977-982.
- Carbon fiber monocoque for a hydrogen prototype for low consumption challenge. Airale, A, Scattina, Alessandro y Carello, Massimiliana . 2011.* 2011, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, págs. 386-392.
- Carello, M, Filippo, N y d'Ippolito, R. 2012.** *Performance optimization for the XAM Hybrid Electric Vehicle prototype* . s.l. : SAE Technical Paper, 2012.
- Chamba, Jhefferson y Jaramillo, Diego. 2016.** *Sistema de Dirección y Frenos para Vehículo de competencia Shell Eco Marathon. BS thesis.* Cuenca : Universidad del Azual, 2016.
- controllers, auto electronics and. 2019.** *ecotrons. ecotrons.* [En línea] 12 de 10 de 2019. <https://www.ecotrons.com>.
- Descartes , Rene y Caimi, Mario. 2009.** *Discurso del Metodo.* Buenos Aires : Ediciones Colihue S.R.L., 2009.

- Frías, Paul César. 2017.** *Configuración del tren motriz para un vehículo Shell Eco-Marathon. MS thesis.* Cuenca : Universidad del Azuay, 2017.
- J. Herrera, M. Barrios,S.Pérez. 2014.** *Diseño e implementación de un sistema scada inalámbrico.* Colombia : s.n., 2014.
- Jiménez, J. Pablo Angulo. 2006.** *Maestro en Ciencias con Especialidad en Sistemas de.* Mexico : s.n., 2006.
- Marathon, Shell Eco. 2019.** Shell Eco Marathon. [En línea] 2019. <https://www.shell.com/make-the-future/shell-ecomarathon.html>.
- Mora De Labastida, Natalia.** Universidad de Palermo. [En línea] [http://fido.palermo.edu/servicios\\_dyc////////blog/docentes/trabajos/17306\\_55962.pdf](http://fido.palermo.edu/servicios_dyc////////blog/docentes/trabajos/17306_55962.pdf).
- Royal Dutch Shell . 2018.** About Shell Eco-marathon . [En línea] 22 de Marzo de 2018. <https://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/about.html>.
- Royal Dutch Shell. 2018.** *SHELL ECO-MARATHON 2018 OFFICIAL RULES CHAPTER I.* 2018.
- Shell International Petroleum Company Limited. 2017.** Shell Global. *Shell Eco-marathon.* [En línea] 17 de 11 de 2017. <http://www.shell.com/energy-and-innovation/shell-ecomarathon/about.html>.
- Tanner, Keith. 2005.** *How to build a cheap sports car.* St. Paul, Mn : Motorbooks, 2005.
- Título artículo. Apellido, Nombre. Año. Número, Ciudad : Editorial, Año, Vol. Volumen.*

## PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ENSEÑANZA DE CALIBRADOR, MICRÓMETRO Y GONIÓMETRO A NIVEL SUPERIOR CON LA UTILIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA SYVEM DESARROLLADA EN EL OSS P5.JS

Mayorga, Diego <sup>1</sup>; Viteri, Edwin<sup>1</sup>; Salazar, Mauro <sup>1</sup>; Varela, Ariel <sup>1</sup>

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

Autor de correspondencia: dmayorga@epoch.edu.ec

### RESUMEN

Este documento presenta una propuesta pedagógica para la enseñanza de los principales instrumentos de medición a un nivel superior a través del uso de software de uso libre aplicado a la simulación de dichos instrumentos, y la creación de un programa interactivo para el aprendizaje "SyVem", además de cambios en la metodología de enseñanza y las formas de impartir clases técnicas que fomenten a los estudiantes a pensar de manera intuitiva, para esto se implementó la propuesta durante un semestre en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en la materia de Taller Mecánico: Metrología y ajuste, y se evaluó posteriormente los resultados obtenidos mediante evaluaciones directas a los estudiantes, las cuales demostraron que la pedagogía aplicada resulta atractiva para los mismos, y favorece su aprendizaje.

Palabras clave: Calibrador, micrómetro, goniómetro, reloj comparador, software.

### ABSTRACT

This document presents a pedagogical proposal for teaching the calibrator, micrometer and goniometer at a higher level through the use of free-use software applied to the simulation of these instruments, and the creation of an interactive program for learning "SyVem", in addition to changes in the teaching methodology and the ways of teaching technical classes that encourage students to think differently, for this the proposal was implemented during a semester at the Polytechnic School of Chimborazo, in the subject of Mechanical Workshop: Metrology and adjustment, and the results obtained were then evaluated through direct evaluations of the students, which demonstrated that the applied pedagogy is attractive to them, and favors their learning.

Keywords: Calibrator, micrometer, goniometer, comparator clock, software

### 1 INTRODUCCIÓN

Tradicionalmente la enseñanza de la toma de medidas con los principales instrumentos de taller de metrología son procesos metódicos y repetitivos en los cuales la mayoría de los estudiantes logran un aprendizaje esencial y básico, es por esta razón que se busca la enseñanza de los mismos principios teóricos desde otra perspectiva.

Bajo esta premisa se buscará implementar una metodología que ayude a mejorar las experiencias tanto de la enseñanza como del aprendizaje de Taller Mecánico: Metrología y Ajuste, y en especial el capítulo de los principales instrumentos de medición y sus ejercicios propuestos correspondientes.

En el pasado a los estudiantes se les enseñaba teoría básica sobre los instrumentos y sobre cómo usarlos, sus cuidados y la forma correcta de toma y lectura de medidas, pero las notas reflejaban que esta metodología no producía el rendimiento esperado en el alumnado, por lo cual se optó por buscar otras maneras de llegar a los estudiantes. La base de la nueva metodología es el método deductivo, en donde se parte de una medida planteada con el fin de llegar a un instrumento que sea capaz de alcanzar esa medida o aproximarse y representarlo a través de un gráfico teórico e intuitivo.

La pieza clave dentro de la metodología es el uso de la herramienta “SyVem”, un emulador del esquema teórico – real de los principales instrumentos de medición con el cual los estudiantes interactúan desarrollando cuestionarios propuestos con el objetivo de practicar y afianzar sus conocimientos en metrología.

## 1.1 Calibrador

El calibrador es un instrumento usado para medir las dimensiones lineales internas, externas, de profundidades y de peldaños. Se compone de una regla graduada con tope fijo sobre el que se desliza un cursor. (Mariscal, 2015)

Se trata de un instrumento de amplia utilización en los talleres, concretamente en lo que pueden considerarse mediciones de pequeña y mediana precisión: los analógicos suelen presentarse con precisiones de 0,1 mm, 0,05 mm, 0,02 mm y hasta 0,01 mm, mientras que los digitales se logran precisiones de hasta 0,001 mm y en pulgadas en 1/128 in, 1/64 in e incluso 1/1000 in. Un calibrador consta de dos partes bien definidas:

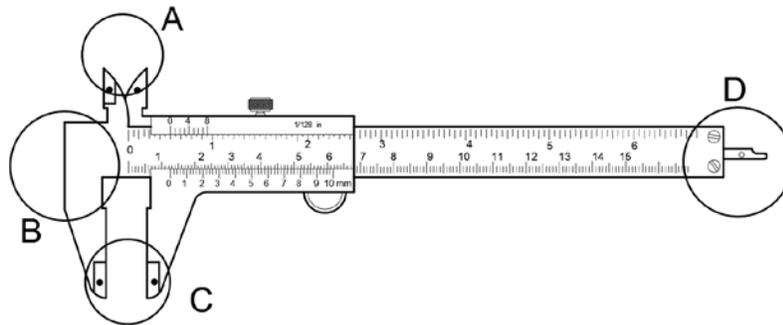


Figura 1: Esquema de un calibrador 1/20 mm y 1/128 in

Una parte fija, sobre la que se halla xerografiada una regla graduada en milímetros por el lateral inferior y en pulgadas por el lateral superior; además consta de una cuchilla y patilla fijas en un extremo (la inferior para llevar a cabo el apoyo sobre la pieza en el caso de mediciones exteriores y la superior para mediciones de interiores).

Una parte móvil, donde lleva xerografiado una graduación especial denominada nonio, dicha parte móvil también incorpora una cuchilla y patilla para mediciones exteriores e interiores, así como una varilla que se desplaza longitudinalmente y que actúa como una sonda para medición de profundidades. Pueden incorporarse tornillos de apriete (que dejan la parte móvil fija, sin posibilidad de deslizamientos no deseados tras la medición). (Martínez, 2016)

### Principio del nonio

La escala del cursor se denomina Vernier o nonio, en honor al portugués Pedro Nunes y el francés Pierre Vernier, considerados sus inventores. (Gandara, 2014)

El nonio tiene una división más que la unidad usada en la escala fija.

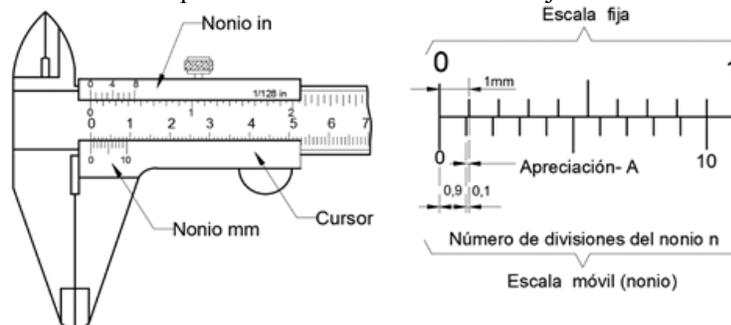


Figura 2: Nonio con diez divisiones

En el sistema métrico, existen calibradores en que el nonio posee 10 divisiones equivalentes a nueve milímetros (9 mm) en la escala fija.

Por tanto, existe una brecha de 0,1 mm entre el primer trazo de la primera escala fija y el primer trazo de la escala móvil (nonio), lo que se define como apreciación del instrumento. Esta diferencia es de 0,2 mm entre el segundo trazo de la escala fija; 0,3 mm entre el tercer trazo de la escala fija y así sucesivamente hasta que la décima línea coincide con 9 mm, teniendo una diferencia de un milímetro. (González, 2015)

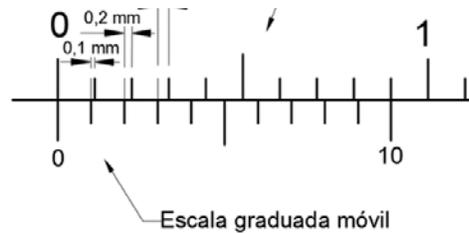


Figura 3: Diferencia de cada trazo del nonio con el de la escala fija

**Principio de funcionamiento**

El sistema consiste en una escala fija sobre la que se han grabado una serie de divisiones de unidades, y un cursor, con un nonio (cero) que se mueve a lo largo de la escala fija.

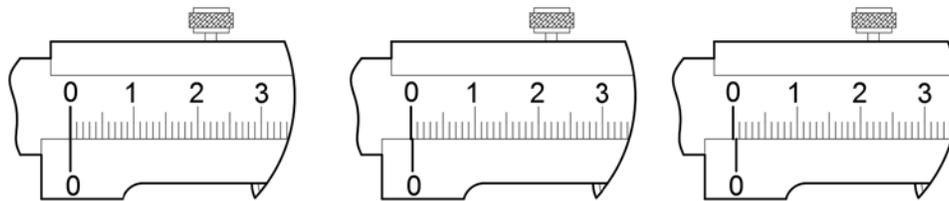


Figura 4: Principio de funcionamiento del nonio

El Vernier es una escala auxiliar que se desliza a lo largo de la escala principal para permitir en ésta lecturas fraccionales exactas de la mínima división. (Mirandés, 2018)

Para conseguir lo anterior, una escala Vernier está graduada en un número de divisiones iguales en la misma longitud que  $n - 1$  de la escala principal como se observó en la figura 4; ambas escalas están marcadas en la misma dirección. Una fracción de  $1/n$  de la mínima división de la escala principal, puede observarse en la figura 5:

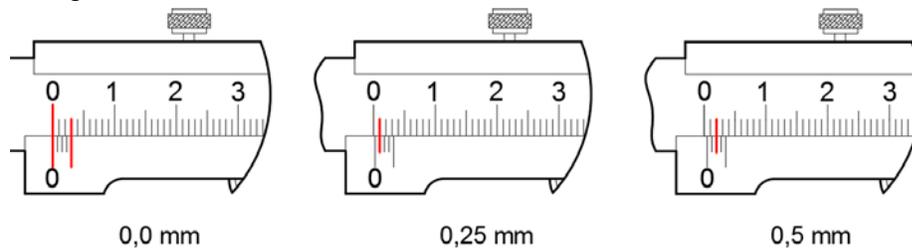


Figura 5: Lectura del Calibrador (1/4 mm) al desplazarse el nonio sobre la regla graduada

Los calibradores Vernier, en milímetros según su configuración tienen 20 divisiones que ocupan 19 divisiones de la regla graduada cada 1 mm, o 25 divisiones que ocupan 24 divisiones sobre la regla graduada cada 0,5 mm, por lo que se tiene una apreciación de 0,5 mm y 0,02 mm, respectivamente.

La siguiente tabla muestra diferentes tipos de graduaciones sobre la escala principal o fija y el nonio o vernier. Hay 5 tipos para la primera y ocho tipos para la segunda, incluyendo los sistemas métricos e inglés. (D'Addario, 2018)

Tabla 1: Graduaciones de las escalas principales y Vernier de un calibrador

Mínima división escala principal	Graduaciones escala del nonio	Lecturas del nonio	Mínima división escala principal	Graduaciones escala del nonio	Lecturas del nonio
0,5 mm	25 divisiones en 12 mm 25 divisiones en 24,5 mm	0,02 mm 0,02 mm	1/16 in	8 divisiones en 7/16 in	1/128 in
1 mm	50 divisiones en 49 mm	0,02 mm	1/40 in	25 divisiones en 1,225 in	1/1000 in
	20 divisiones en 19 mm	0,05 mm	1/20 in	50 divisiones en 2,45 in	1/1000 in
	20 divisiones en 39 mm	0,05 mm			

Elaborado por: Gonzales C, Zeleny Ramón. Metrología

Fuente: origen de los datos

### Cálculo de la resolución – apreciación

El tipo de Vernier es el más comúnmente utilizado, tiene  $n$  divisiones iguales que ocupan la misma longitud que  $n - 1$  divisiones sobre la escala principal. (Vargas, 2017)

Donde:

$u$  = Es la menor división en la escala principal.

Una escala nonio se caracteriza por dos valores fundamentales:

$n$  = número de divisiones del nonio.

$k$  = Constante de extensión.

Donde  $n$  y  $k$  son números enteros adimensionales,  $k$  mayor o igual que 1, normalmente 1 o 2 cuando se quiere facilitar la lectura.

Y podemos ver otras características (derivadas de las anteriores):

$S$  = Separación entre dos divisiones sucesivas del nonio, medida en unidades de la regla

$A$  = Apreciación, medida más pequeña que puede representar.

$L_n$  = Longitud del nonio, distancia entre la primera y última división del nonio, medida en la misma unidad de la regla. (Goldstein, 2014)

Una escala nonio se basa en dos principios fundamentales que la definen en la figura 6:

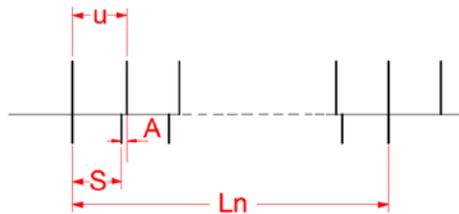


Figura 6: Principio fundamental del nonio

La apreciación se obtiene como sigue:

1. la longitud del nonio es:

$$L_n = (nk - 1) u$$

2. La separación entre dos divisiones sucesivas del nonio es:

Por lo que tenemos; reemplazando 2 en 1:

Obteniéndose la apreciación;

Cumpléndose que:

$$S = ku - A, \text{ o también;}$$

Así, cada división sobre el nonio es menor, a veces una división de la escala principal en  $u/n$ .

### Influencia de $k$

Tabla 2: Influencia de k en la separación de las divisiones del nonio

$u = 1$ $n = 3$ $k = 1$ $L_n = (nk - 1) u$ $L_n = (3.1 - 1).1$ $L_n = 2 \text{ mm}$	$u = 1$ $n = 3$ $k = 2$ $L_n = (nk - 1) u$ $L_n = (3.2 - 1).1$ $L_n = 5 \text{ mm}$	$u = 1$ $n = 3$ $k = 3$ $L_n = (nk - 1) u$ $L_n = (3.3 - 1).1$ $L_n = 8 \text{ mm}$

Elaborado por: Autores  
 Fuente: origen de los datos

**Ejercicios razonados de calibrador**

Se tienen calibradores estandarizados con u, n definidos y con sus respectivos coeficientes de extensión k implícitos, el objetivo de esta clase es resolver ejercicios de calibrador que no estén estandarizados con u, n y K diferentes a los de la tabla 1, demostrando que se podrían fabricar cualquier tipo de calibrador, con los siguientes pasos tanto para milímetros como para pulgadas.

Tabla 3: Tabla de datos iniciales del problema propuesto

DATOS			
Medida Planteada (MP)			
MILIMETROS		PULGADAS	
u		u	
n		n	
k		k	

Elaborado por: Autores  
 Fuente: origen de los datos

**1. Apreciación:**

$$A = \frac{u}{n}$$

**2. Cero del nonio con respecto a la regla graduada:**

$$\text{Cero} = \frac{(MP)}{u}$$

Cero = líneas

Cero = líneas \* u

Sobra = MP - Cero

**3. Nonio**

$$N = \frac{\text{Sobra}}{A}$$

**4. Lectura final**

Lectura = Cero + Nonio \* Apreciación

**5. Separación entre dos divisiones sucesivas del nonio (S)**

$$L_n = (nk - 1) * u$$

$$S = \frac{L_n}{n}$$

**6. Nonio - regla graduada**

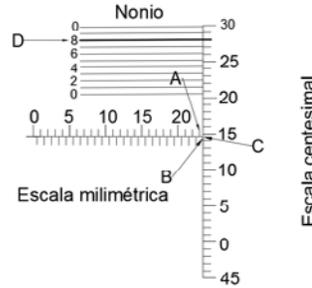
RG = lectura + N \* S

En la resolución de ejercicios razonados se presentan dos casos bien definidos de calibradores, un teórico que se plantea en función de los datos obtenidos en la resolución de los cálculos y un real que vendría a ser el calibrador fabricado para las condiciones pedidas en el ejercicio razonado.

**1.2 Micrómetro**

Palmer, presentó por primera vez, un micrómetro para registrar su patente, este instrumento permitía lecturas de centésimas de milímetro de manera muy simple.

Con el transcurso del tiempo, el micrómetro se fue perfeccionando y ha permitido mediciones más fiables y precisas que un calibrador. (Garavito, 2017)



Apreciación:  

$$Ap = \frac{0,01 \text{ mm}}{10} = 0,001 \text{ mm}$$
 Lectura:  
 23,000 mm    A (Escala en mm del cilindro)  
 0,000 mm    B (Escala en medios milímetros del cilindro)  
 0,140 mm    C (Escala centesimal del tambor)  
 0,008 mm    D (Escala milésima del nonio)  
 -----  
 23,148 mm    Lectura total

Figura 7: Instrumento de Metrología: Micrómetro 2 nonios real medida propuesta 23,148 mm

**PASOS PARA RESOLVER UN EJERCICIO RAZONADO DE MICRÓMETRO**

**1. Condiciones**

- a)  $n_1 < 2Ln_2$  No se puede dibujar
- b)  $\frac{n_1}{4} \geq Ln_2 \rightarrow \frac{n_1}{2}$  Se dibuja la mitad de las líneas del nonio 1 que es igual a la distancia
- c)  $\frac{n_1}{4} < Ln_2 \rightarrow n_2$  Se dibuja todo el diámetro

**1.3 Goniómetro**

Es un instrumento de medición con forma de semicírculo o círculo graduado en 180° o 360°, utilizado para medir o construir ángulos. Este instrumento permite medir ángulos entre dos objetos. (Rodriguez, 2014)

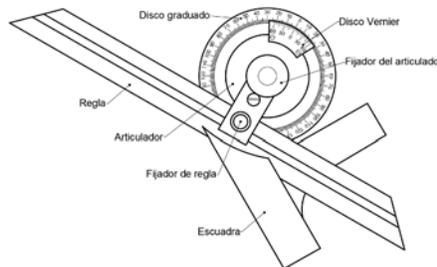


Figura 8: Instrumento de Metrología: Goniómetro 1 nonio real medida propuesta 45 grados

**PASOS PARA RESOLVER UN EJERCICIO RAZONADO DE GONIOMETRO**

**1. Condiciones para Dibujar**

- a)  $n_1 \geq Ln_2$
- b)  $K_2 \leq \frac{n_1+1}{n_2}$

## 1.4 Propuesta pedagógica

Se trata de aquella acción que promueve una aplicación de la didáctica para el desarrollo de ciertos conocimientos. Una propuesta pedagógica debe tener en cuenta el marco en el que se desarrollará y debe partir de un diagnóstico específico. Estas cuestiones permiten justificar la propuesta y sientan las bases para el cumplimiento de los objetivos estipulados.

Entre las características fundamentales que se considera que debe tener toda propuesta pedagógica o sobre las que esta debe sustentarse se encuentran la calidad educativa, la atención a la diversidad, la globalidad y la interacción. (Castillo, 2018)

## 1.5 Propuestas pedagógicas con el uso de OSS.

En las distintas etapas educativas se requiere el uso de propuestas pedagógicas, las cuales van avanzando según la complejidad de la etapa de desarrollo del estudiante, y estas propuestas necesitan adaptarse a los nuevos tiempos, por lo cual el uso de la tecnología accesible para todos, como los softwares de uso libre, se vuelve sumamente necesarios, en especial en el ámbito de la educación universitaria, donde se pueden utilizar tecnologías más avanzadas. (Roberto Aparici Marino, 2014)

Propuesta pedagógica basada en el aprendizaje interactivo orientada a la Educación Superior

La mayoría de las propuestas actuales se basan en las Tics, y fundamentalmente en el aprendizaje interactivo, ya que este genera una alta asimilación de conocimiento en los estudiantes, y capta su atención de manera óptima.

El uso de programas es habitual en cualquier campo de la educación, para el caso de las ingenierías, es aún más usual el uso de simuladores, los cuales son esenciales para enseñar ciertos aspectos que no se pueden entender simplemente con el conocimiento teórico, y mediante su uso se consigue percibir de mejor manera ciertos aspectos que omite una clase teórica. (Jimenez, 2014)

El software SyVem es una herramienta que busca que estos conocimientos omitidos por las doctrinas más ortodoxas sean la principal manera de aprender de un estudiante, ya que estos espacios faltantes en la educación son los que verdaderamente representan un reto tanto para el docente como para el estudiante, y al asimilarlos se obtiene un aprendizaje más variado, complejo y razonado.

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 Principios teóricos y prácticos de la herramienta pedagógica SyVem

#### Principios de programación de la herramienta

Para la elaboración de un simulador de los principales instrumentos de medición, se eligió el lenguaje de programación JavaScript, ya que como lenguaje de uso libre tiene muchas librerías desarrolladas por la comunidad, las cuales permiten especializar el lenguaje para proyectos orientados a diferentes ámbitos de la investigación y desarrollo, entre estos se escogió la librería P5.js ya que nos ofrece un conjunto de funciones complementarias al lenguaje nativo que favorecen el desarrollo de entornos gráficos. (Shiffman, 2018)

El lenguaje ofrece además una sintaxis muy intuitiva, que permite que los estudiantes comprendan la mayoría de los procesos insertados en el código sin la necesidad de tener altos conocimientos en programación. Así, mediante el editor de texto Atom, que también es un software de uso libre, con un soporte de bibliotecas hecho por la comunidad, se desarrolló la herramienta.

#### Aplicación de las fórmulas encontradas

El principio de la mayoría de los instrumentos de medición es una regla graduada sobre la cual se establecen la posición del cero el cual brinda la toma de medida, y una regla superior a esta, denominada nonio, que permita que la apreciación del instrumento mejore, este principio es necesario para poder

simular los instrumentos de manera gráfica, en un esquema que presenten ambas reglas y sus líneas coincidentes.

Para el desarrollo de la herramienta SyVem, el principal reto es llevar estas escalas graduadas al lenguaje de programación, y controlar mediante variables, los parámetros de posición, longitud y cantidad de las líneas que conforman las diferentes reglas graduadas, para lograr que el simulador sea funcional con cualquier ejercicio de los diferentes instrumentos de medición.

### **Interfaz orientada al aprendizaje interactivo**

Una vez obtenido un programa funcional para la generación del esquema de un ejercicio razonado, se buscó que la interfaz del programa que interactúe con el estudiante sea didáctica, y esté orientada a que sea una herramienta de verificación de los datos necesarios para la resolución de los ejercicios.

Se añadió colores en las líneas notables del esquema, las cuales también deberán resaltarse en el esquema realizado por el estudiante, movimiento en los ejes para poder observar gráficos que por su tamaño se salgan del encuadre o cuyo, y escala para poder apreciar los detalles de las líneas que no se aprecien normalmente, además de una tabla que muestre los resultados de los cálculos de la misma manera en la que los estudiantes realizan los trabajos.

## **2.2 Estrategias Pedagógicas que Sustentan la Metodología Aplicada**

### **Clases Enfocadas a Desarrollar la Creatividad de los Estudiantes**

En la búsqueda de una mejora considerable en el aprendizaje y reconociendo que el impartir el conocimiento de manera magistral es efectivo, se estableció un modelo de clase con menores limitaciones en su estructura, y con mayor libertad de enseñanza para el docente. Clase normal de metrología.

Antes de cada clase, los estudiantes consultarán los conceptos previos, los cuales serán reforzados posteriormente durante la clase, los primeros minutos de cada clase son para verificar cuánto han asimilado de los conceptos base del tema a desarrollar, consecuentemente se aclaran ciertas dudas y se explica lo que no está claro, después se aplican los conocimientos a las prácticas con los instrumentos de medición.

El software SyVem se utilizará como pilar fundamental de la metodología de enseñanza, y su implementación al estudio en clase será un proceso secuencial de aprendizaje. La primera parte del plan de trabajo será incorporar este software en las clases magistrales, con un uso único del docente para que los alumnos se familiaricen con la interfaz del software, el docente utilizará el simulador para ofrecer ejercicios de práctica en clase, ampliando por las características del software la cantidad y complejidad de estos.

Después de que los estudiantes se hayan acostumbrado a la parte visual del software, y se hayan dado cuenta de las bondades que presenta, el mismo será presentado a los alumnos, y durante una clase de tipo explicativa, se explicará de manera detallada su uso y todas las herramientas que posee, una vez los estudiantes tengan el software en sus manos, se realizaran tareas dirigidas a afinar su manejo.

Luego de esto, se espera una mejoría en el aprendizaje de los estudiantes, y una disminución significativa de errores comunes que suelen verse con frecuencia en los estudiantes que están aprendiendo a usar los instrumentos de medición, mejoría que se espera, se vea reflejada en las evaluaciones pertinentes.

### **Evaluaciones teórico-prácticas que incentiven a los estudiantes a pensar de manera diferente**

Normalmente una evaluación de los principales instrumentos de medición conlleva procesos mecánicos, los cuales resultan tediosos para los estudiantes, y no representan en verdad un reto mayor para los mismos, lo que se busca con esta pedagogía es amenizar las evaluaciones a realizar, y a su vez, ofrecer un examen que sea capaz de retar al intelecto del estudiante.

Para lograr esto las preguntas convencionales se cambiarán por preguntas que estén orientadas a que el estudiante razone las respuestas, y los motivos por los cuales los instrumentos de medición tienen tales estructuras, aplicando para esto lo aprendido en clases y su conocimiento propio sobre ingeniería. Lo efectivo de este método, es que con la herramienta SyVem el profesor podrá evaluar de mejor manera a sus alumnos, haciendo más sencillos, tanto la preparación de la prueba, como su posterior calificación.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Comparación de resultados obtenidos con el software SyVem.

##### Ejercicio de Calibrador 1

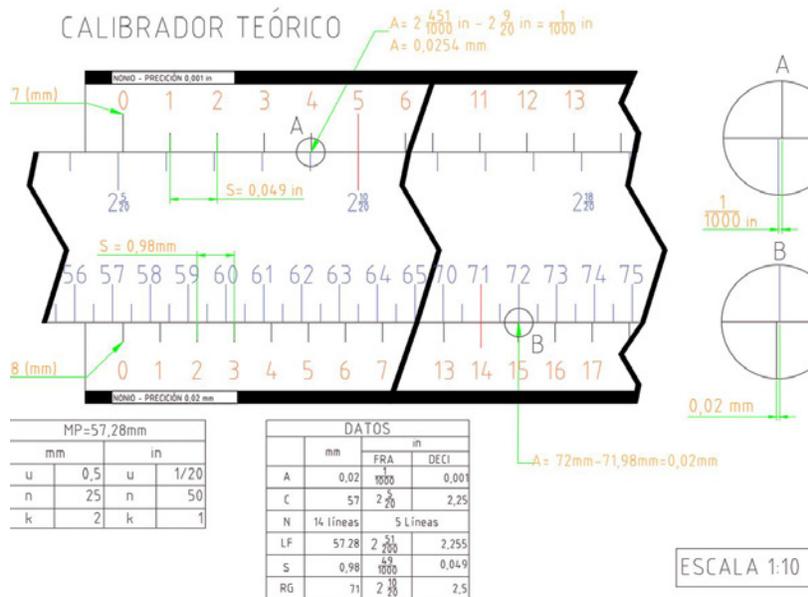


Figura 9: Calibrador resuelto en clases con la ayuda de AutoCAD.

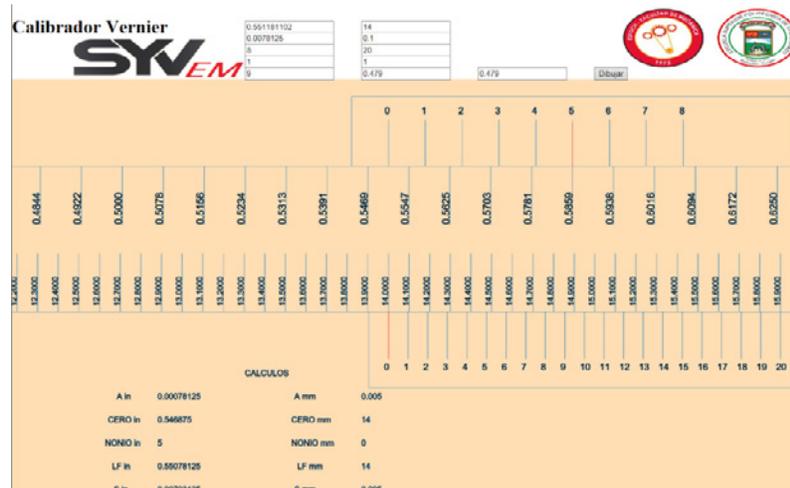


Figura 10. Calibrador planteado en clases resuelto en el simulador SyVem

### Ejercicio Calibrador 2:

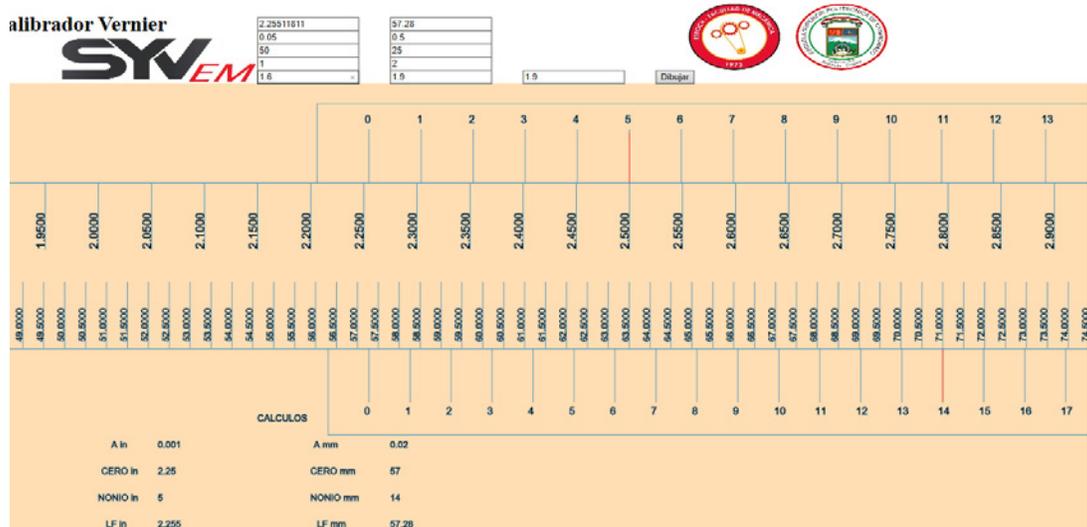


Figura 11: Simulador SyVem Calibrador 1/128 in 0.1 mm real medida propuesta 14 mm

### Ejercicio de Micrómetro 1:

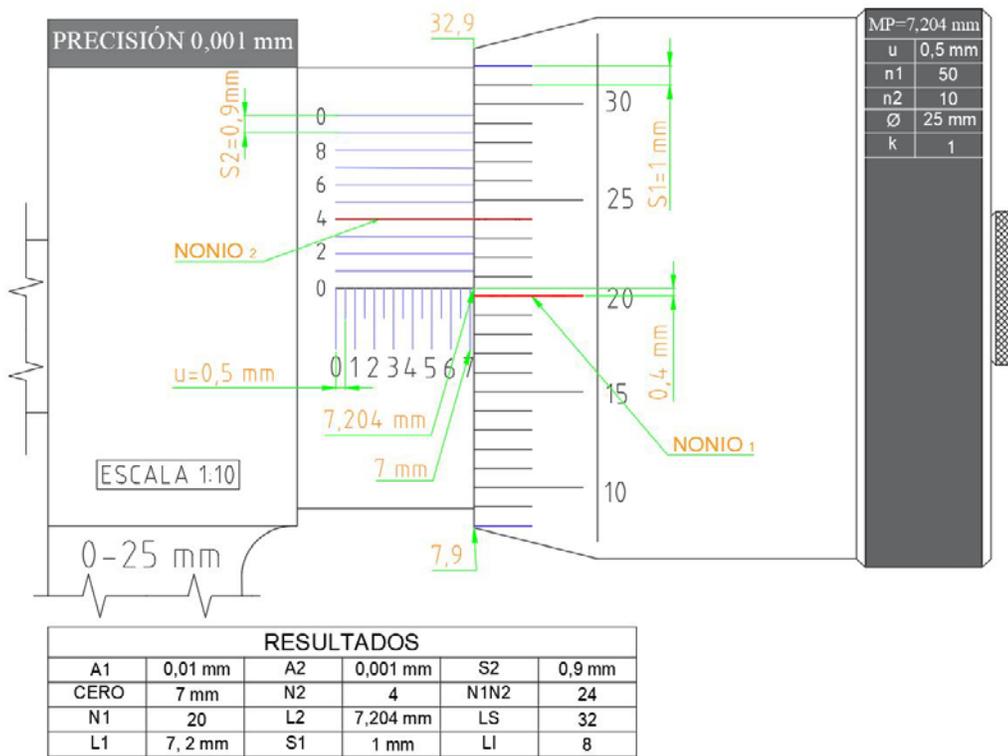


Figura 12. Ejercicio de Micrómetro resuelto en clases con la ayuda de AutoCAD.

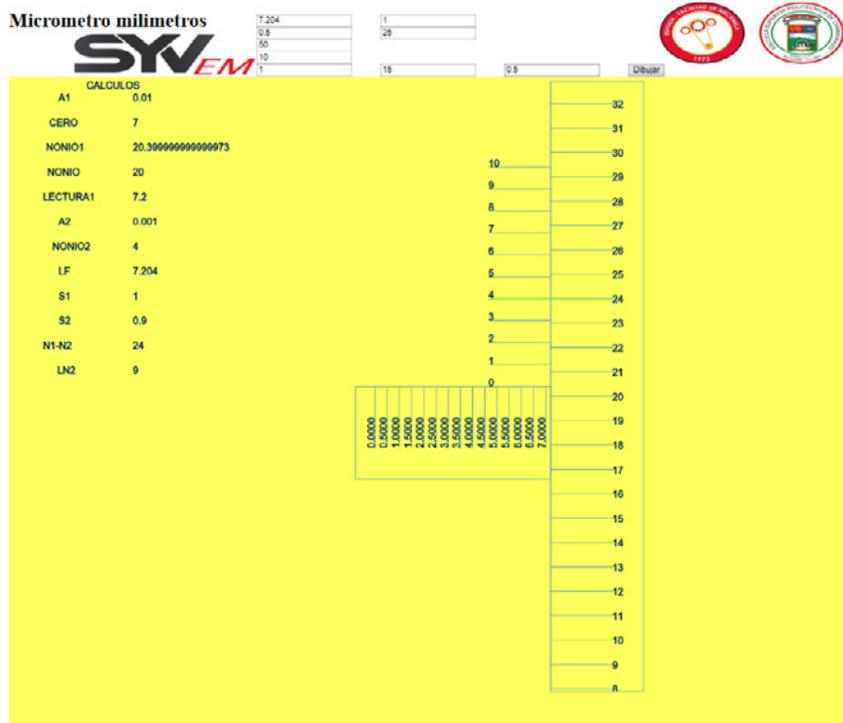


Figura 13. Micrómetro planteado en clases resuelto en el simulador SyVem

**Ejercicio de Micrómetro 2:**

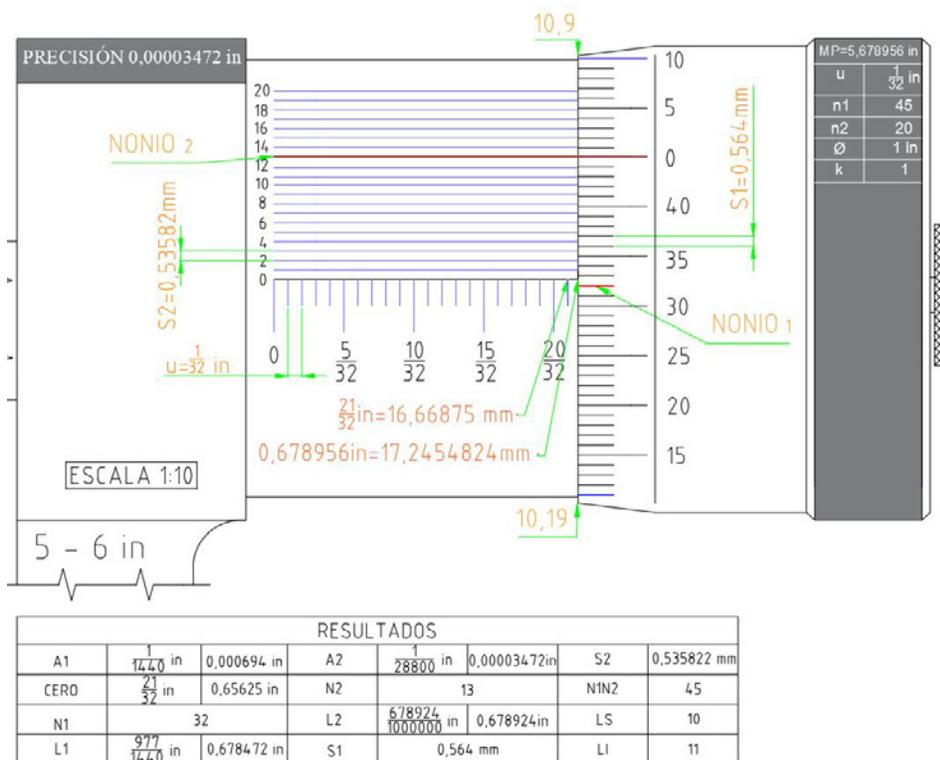


Figura 14. Ejercicio de Micrómetro resuelto en clases con la ayuda de AutoCAD.

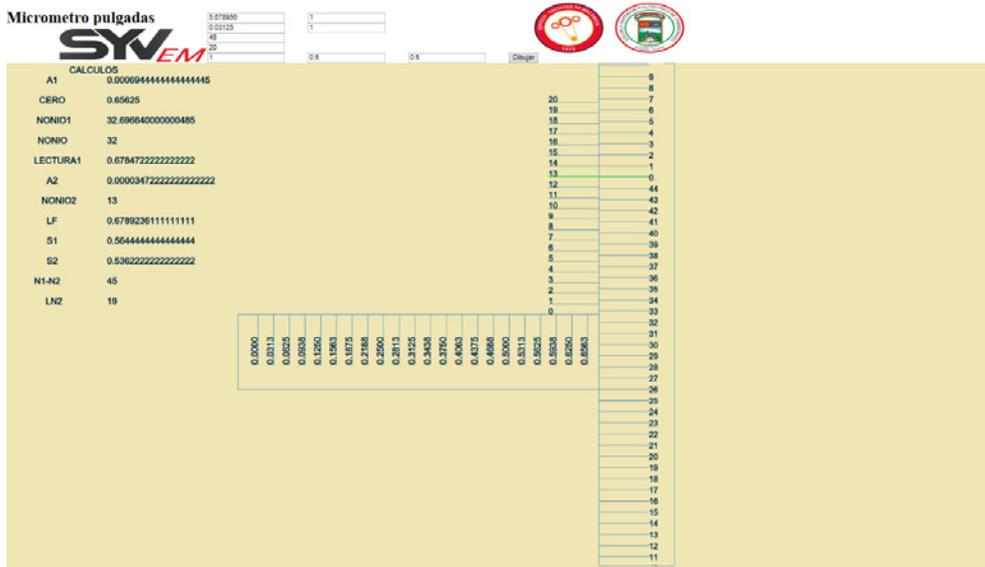


Figura 15. Micrómetro planteado en clases resuelto en el simulador SyVem

**Ejercicio de Goniómetro:**

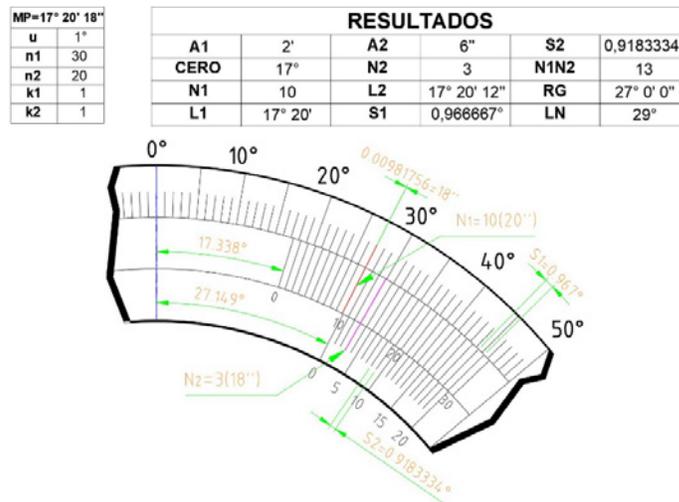


Figura 16. Ejercicio de Goniómetro resuelto en clases con la ayuda de AutoCAD.

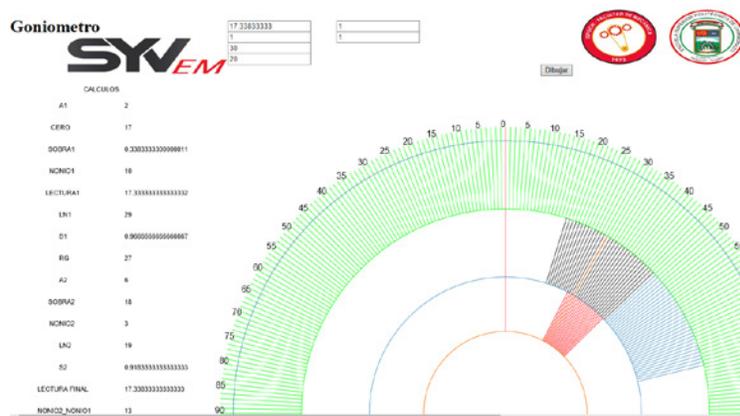


Figura 17. Goniómetro planteado en clases resuelto en el simulador SyVem

### 3.2 Desempeño del Aprendizaje Tras la Propuesta Metodológica

Una vez implementada nuestra propuesta metodológica, podemos observar de manera cuantitativa los resultados obtenidos en los estudiantes, y si estos han asimilado de la mejor forma el conocimiento requerido, o si por el contrario ofusca más su aprendizaje.

Para esto, lo que se mide en los estudiantes es el conocimiento obtenido mediante la metodología habitual, sin la herramienta SyVem, mediante una evaluación inicial, como se muestra en la tabla 4 y 5, y eventualmente otra evaluación, en la cual los estudiantes ya han interactuado con la nueva propuesta, como se muestra en la (Fig. 18).

Tabla 4: Tabla Porcentual del Rendimiento Académico de los estudiantes antes de la aplicación metodológica

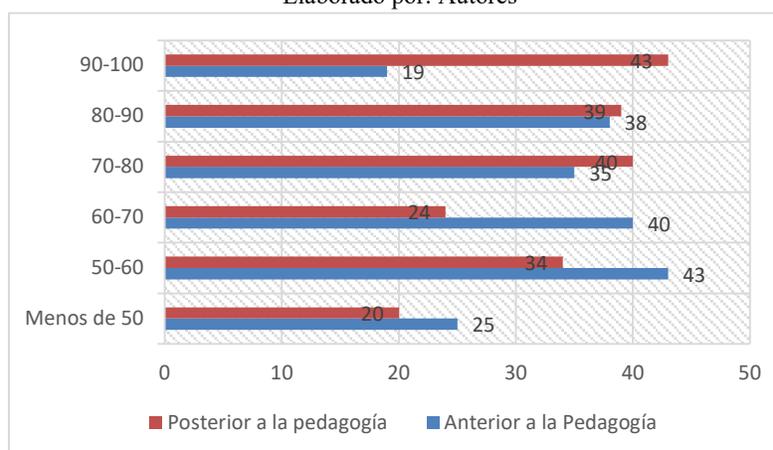
Pocentaje (%)	Vernier	Micrómetro	Goniómetro	Reloj Comparador
90 – 100	5	3	4	7
80 – 90	6	12	11	9
70 – 80	8	11	5	11
60 – 70	13	9	10	8
50 – 60	10	8	13	12
Menos de 50	8	7	7	3

Elaborado por: Autores  
Fuente: origen de los datos

Tabla 5: Tabla Porcentual del Rendimiento Académico de los estudiantes tras la aplicación metodológica

Pocentaje (%)	Vernier	Micrómetro	Goniómetro	Reloj Comparador
90 – 100	13	8	7	15
80 – 90	11	12	9	7
70 – 80	9	9	12	10
60 – 70	6	7	7	4
50 – 60	8	8	9	9
Menos de 50	3	6	6	5

Elaborado por: Autores



Fuente: origen de los datos

Figura 18: Índice de Desempeño de los estudiantes

## 4 CONCLUSIONES

Como hemos podido ver, el uso de software siempre genera el interés de los estudiantes, y esto es lo que hace que logren aprender, en una asignatura fundamentalmente técnica, lo más común es que las clases alcancen una monotonía que repele al estudiante y hace que su atención se pierda, las nuevas propuestas pedagógicas deberán luchar contra estos problemas, en nuestra propuesta lo que se buscó es enseñar de

otra manera a los estudiantes, cambiando los paradigmas de la propia materia, y saliendo de lo que se enseñaría normalmente en un semestre en el que se toma Metrología, y se consiguió una respuesta positiva en los estudiante, en parte gracias a esta nueva forma de enseñar con el uso de la herramienta SyVem, por lo que invitamos a otros docentes entusiastas a romper esta misma monotonía, y enseñar de manera diferente, solo así los estudiantes pensarán de manera diferente.

## 5 REFERENCIAS

- Castillo, Sandra. 2018.** Propuesta pedagógica basada en el constructivismo para el uso óptimo de las TIC en la enseñanza y el aprendizaje de la matemática. *Revista latinoamericana de Investigación en matemática educativa*. 2018, Vol. 11, 2.
- D'Addario, Miguel. 2018.** *MECATRÓNICA, Procesos, Métodos y Sistemas*. España, Madrid : Comunidad Europea, 2018. ISBN: 978-0-244-11145-8.
- Gandara, Martin. 2014.** *Academia.edu*. [En línea] 13 de Marzo de 2014. [Citado el: 13 de Abril de 2019.] [https://www.academia.edu/11210485/2\\_1\\_antecedente\\_metrologia](https://www.academia.edu/11210485/2_1_antecedente_metrologia).
- Garavito, Julio. 2017.** Metrología y Mecánica de Banco Protocolo. *Escuelaing.edu.co*. [En línea] 11 de Enero de 2017. [Citado el: 23 de Mayo de 2019.] [https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2733\\_metrologia.pdf](https://www.escuelaing.edu.co/uploads/laboratorios/2733_metrologia.pdf).
- Goldstein, Bernard R. 2014.** *The astronomy of Levi Ben Gerson (1288-1344)*. New York : Springer-Verlag, 2014. ISBN-13: 978-1-46-13-8571-4.
- . **2014.** *The Astronomy of Levi ben Gerson (1288-1344)*. New York : Springer-Verlag, 2014. ISBN-13: 978-1-4613-8571-4.
- Gonzalez Carlos, Zeleny Ramón.** Metrología. México, McGraw – Hill Interamericana de México, Octubre de 1995. ISBN: 970 – 10 – 0370 - 5
- González, Juan José Sánchez. 2015.** *UF1669: Mantenimiento preventivo de equipos y procesos de plantas de tratamiento de agua y plantas depuradoras*. Marzo : 22, 2015. ISBN: 978-84-16360-13-0.
- Jimenez, Cherlys Infante. 2014.** Propuesta pedagógica para el uso de laboratorios virtuales como actividad complementaria en las asignaturas teórico-prácticas. 2014, Vol. 19, 62.
- Low, A.D. Morrison. 2016.** *Making Scientific Instruments in the Industrial Revolution*. New York : British library Cataloguing, 2016. ISBN-13: 978-0-7546-5758-3.
- Mariscal, Ricardo. 2015.** *Issuu.com*. [En línea] 8 de Septiembre de 2015. [Citado el: 5 de Marzo de 2019.] [https://issuu.com/mariscalchuscano/docs/metrologia\\_y\\_mecanica\\_de\\_banco\\_udi](https://issuu.com/mariscalchuscano/docs/metrologia_y_mecanica_de_banco_udi).
- Martínez, Héctor Letelier. 2016.** *Calameo.com*. [En línea] 9 de Enero de 2016. [Citado el: 8 de Marzo de 2019.] <https://es.calameo.com/read/0037961273026fcf317da>.
- Mirandés, Estafanía de. 2018.** La revisión del sistema internacional de unidades. *Cem.es*. [En línea] 18 de Mayo de 2018. [Citado el: 27 de Marzo de 2019.] [https://www.cem.es/sites/default/files/cem\\_revisionsi\\_edem\\_18mayo2018.pdf](https://www.cem.es/sites/default/files/cem_revisionsi_edem_18mayo2018.pdf).
- Roberto Aparici Marino, Marco Silva. 2014.** Pedagogía de la Interactividad. *Dialnet Plus*. 2014, 38.
- Rodríguez, Felipe Díaz del Castillo. 2014.** Metrología Dimensional. *Unam.mx*. [En línea] 23 de Octubre de 2014. [Citado el: 1 de Junio de 2019.] [http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina\\_ingenieria/mecanica/mat/mat\\_mec/m2/ME](http://olimpia.cuautitlan2.unam.mx/pagina_ingenieria/mecanica/mat/mat_mec/m2/ME).
- Shiffman, Daniel. 2018.** *The Nature of Code*. Mountain View, California : GNU Lesser General Public License, 2018. ISBN-13: 978-0985930806.
- 2015.** *UF1669: Mantenimiento Preventivo de Equipos y Procesos de Plantas de Tratamientos de Agua y Plantas Depuradoras*. España, Madrid : ELEARNING S.L., 2015. ISBN: 978-84-16360-13-0.
- Vargas, Mauricio. 2017.** Laboratorio de Metrología: centro industrial y desarrollo tecnológico. *Vdocuments.site*. [En línea] 23 de Febrero de 2017. [Citado el: 21 de Julio de 2019.] <https://vdocuments.site/curso-de-metrologia.html>.
- Vernier, Pierre. 1631.** *La Construction, l'usage et les propriétés du quadrant nouveau de mathématique*. Nantes, Au Bon Pasteur : Brvsselles, 1631.

## **Mejoramiento del proceso de producción de losas alveolares bajo metodología Lean Six Sigma en la Empresa Pública Cementera EPCE (Improvement of the alveolar slab production process under Lean Six Sigma methodology in the EPCE Cement Public Company)**

Raúl Marcelo Carrera Cabezas<sup>1</sup>

1. Facultad de Posgrados, Universidad de las Américas, Quito, Ecuador, 170124
2. Gerencia Tecina, Empresa Pública Cementera del Ecuador, Riobamba, Ecuador, 060152  
marcc\_2218@hotmail.es;

### **RESUMEN**

La generación de producto no conforme, tiempos de espera y sobreproducción de hormigón en la línea de fabricación de losas alveolares, son la problemática que está generando pérdidas. Surge la necesidad de encontrar la solución para dichos problemas empleado herramientas y metodología Lean Six Sigma, con la finalidad de mejorar el proceso productivo al eliminar la problemática. La metodología está compuesta por cinco etapas, las cuales son: Definir, Medir, Analizar, Mejorar y Controlar, misma que se complementa con la utilización de las herramientas de manufactura esbelta. Se diagnosticó la problemática en la fase de definición. Se tomó datos a partir del 2016, se muestreo y se determinó el desempeño del proceso y la aceptación del sistema de medición mediante un estudio de Estadísticas Kappa de Fleiss, estas actividades se las ejecuto en la fase de medir. La causa principal encontrada en la fase de analizar fue la operación, verificación y calibración de la maquina deslizando, definiendo como variables que afectan a la generación de producto no conforme, a la frecuencia de vibración y temperatura de losa previo al corte de cables de la cabeza de tensión. TPM, JIT y KANBAN fueron las herramientas utilizadas para la mejora, y para la eficacia de las acciones tomadas se definieron controles necesarios para mantener la los resultados obtenidos. Con la implantación de las mejoras, se evidencio que en la línea de producción de losas alveolares disminuyo el desperdicio, minimizando así los costos de mala calidad con una inversión baja para él proyecto.

**Palabras clave:** Defectos, Lean Six Sigma, Losas alveolares, Mejora, Productividad.

### **ABSTRACT**

The generation of non-compliant product, waiting times and overproduction of concrete in the alveolar slab manufacturing line, are the problem that is generating losses. The need arises to find the solution for these problems using Lean Six Sigma tools and methodology, in order to improve the production process by eliminating the problem. The methodology consists of five stages, which are: Define, Measure, Analyze, Improve and Control, which is complemented by the use of lean manufacturing tools. The problem was diagnosed in the definition phase. Data were taken from 2016, it was sampled and the performance of the process and the acceptance of the measurement system was determined through a study of Fleap's Kappa Statistics, these activities were executed in the measurement phase. The main cause found in the analysis phase was the operation, verification and calibration of the sliding machine, defining as variables that affect the generation of non-conforming products, the frequency of vibration and temperature of the slab prior to the cable cutting of the tension head TPM, JIT and KANBAN were the tools used for improvement, and for the effectiveness of the actions taken, necessary controls were defined to maintain the results obtained. With the implementation of the improvements, it was evidenced that in the alveolar slab production line the waste decreased, thus minimizing the costs of poor quality with a low investment for the project.

**Keywords:** Alveolar Slabs, Defects, Improvement, Lean Six Sigma, Productivity.

## 1 INTRODUCCIÓN

La satisfacción del cliente en cualquier organización es la prioridad número uno, el éxito de cualquier empresa depende de la calidad y la fijación de precios de productos competitivos. Hoy en día el mercado globalizado no permite espacio para el error. Por lo tanto, Six Sigma es necesaria para todas las organizaciones. La teoría de Six Sigma demuestra un beneficio económico y la mejora de la satisfacción del cliente. A diferencia de otros programas que se centran sólo en la calidad, Six Sigma se enfoca en la satisfacción del cliente y en los problemas de fondo (1).

La filosofía Lean identifica y elimina ineficiencias como el costo sin valor añadido (desperdicio) o el tiempo de espera innecesario dentro del proceso causado por defectos, producción excesiva y otros procesos para expandir cualquier organización. Lean se asocia con velocidad, eficiencia y aceleración del proceso. Por lo tanto, al integrar elementos de la metodología de la empresa Lean con Six Sigma, que carece de herramientas que controlan y reducen el tiempo de entrega, la retroalimentación será más rápida de lo planeado (2).

La combinación de estas dos poderosas herramientas, la fabricación Lean y la estrategia Six Sigma, dará como resultado una reducción de la variación del proceso y una mejora dramática en la economía de la empresa (3). Dado que todas las empresas están en el negocio de lograr un retorno más rápido de las inversiones, en particular para sus accionistas, el uso de principios Lean en Six Sigma es extremadamente importante.

Ahora es necesario implementar los conceptos de Lean Six Sigma, definiéndolo más como una estrategia. Lean Six Sigma es una estrategia que se enfoca en reducir costos y aumentar la satisfacción del cliente. La filosofía Six Sigma es coherente con el control estadístico de procesos, el control estocástico y el control de ingeniería (4)

El presente trabajo se enfoca en mejorar el proceso productivo de la línea de producción de losas alveolares en la Empresa Publica Cementera del Ecuador, EPCE, aplicando la metodología Lean Six Sigma, a fin de reducir la generación de desperdicios y producto no conforme.

La investigación se desarrolla bajo el modelo DMAIC que define los cinco pasos de la metodología: Six-Sigma. Los pasos son definir, medir, analizar, mejorar y controlar. DMAIC es frecuentemente empleado por equipos de proyectos Six Sigma, y es el acrónimo de: Define: Definir oportunidades; Measure: Medir el desempeño; Analyze: Analizar oportunidades; Improve: Mejorar el desempeño; Control: Controlar el desempeño (5)

## 2 MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología six sigma desarrollada por Motorola en los años 80, se basa en el enfoque al cliente. Esta metodología utiliza métodos estadísticos y DMAIC, a fin de:

- Definir los problemas y escenarios a mejorar
- Medir para generar información y datos
- Analizar la información obtenida
- Implementar las mejoras a los procesos y finalmente
- Controlar los procesos o productos para alcanzar resultados.

Esto nos llevara a un ciclo de mejoramiento continuo (6). Para alcanzar un aumento en la productividad se pretende levantar la información de la empresa para así generar un diagnóstico y un punto de partida de las posibles soluciones que se podrán ejecutar (7). Una vez hecho este análisis se aplicará la herramienta lean sigma como solución para el incremento de la productividad, si esta herramienta se adapta al proceso se habrá cumplido con los objetivos.

El proyecto surge por la identificación de tiempos muertos, desperdicio y presencia de defectos en el producto en proceso y terminado. Debido a que el producto es nuevo en el mercado la empresa busca lo mejor para sus clientes. La situación actual de la empresa requiere la creación de un proyecto que solucione la problemática (8).

El plan del proyecto LSS, fue presentado en reunión a la coordinación de prefabricados generándose un gran interés en la propuesta y la aceptación de esta. El proyecto tiene una duración de 6 meses.

### 2.1 Estimación de los Costos.

Al definir los costos se basó en la cantidad de producto no conforme que se genera por mes, así como la producción mensual, el desperdicio de hormigón y el costo de este. La sobreproducción de hormigón genera un costo representativo y que es objeto de análisis, no influye directamente en la disminución de producto no conforme, pero aporta al costo de la producción. Generar producto no conforme es crítico para la empresa debido a que no se puede tomar acciones como reprocesar o realizar concesión, debido a que las especificaciones de las losas para el proyecto no pueden variar ya que son únicas para cada proyecto y se lo deposita en la escombrera.

En la tabla 1, se muestran los rubros considerados para estimar los costos de calidad.

Tabla 1. Costos de calidad situación actual.

Costo de losa por m <sup>2</sup> (\$/m <sup>2</sup> )	Producción Mensual (m <sup>2</sup> )	Producto no conforme	Costo de m <sup>3</sup> de hormigón (\$/m <sup>3</sup> )	Sobreproducción de hormigón (m <sup>3</sup> )
75	4240	3.8%	94	1.78
			<b>MENSUAL</b>	<b>ANUAL</b>
		<b>Costo desperdicio producto no conforme (\$)</b>	US\$12,084.00	<b>US\$108,756.00</b>
		<b>Costo de sobreproducción de hormigón (\$)</b>	US\$167.32	<b>US\$1,505.88</b>

### 2.2 Definir

Para mejorar la productividad en la línea de losas alveolares, el proyecto se enfocará en minimizar los defectos del producto, identificando las causas de tales defectos y las soluciones para las mismas (9).

#### Definición de las Características Críticas

Uno de los puntos fundamentales en la etapa Definir, es el entendimiento de que afecta y es crítico para la calidad del producto, es indispensable identificada las variables de entrada o variables del proceso con las cuales se relaciona (10).

En la siguiente figura se puede observar un diagrama de árbol el cual permite identificar los CTQ (*critical to quality-característica*) claves para los clientes.

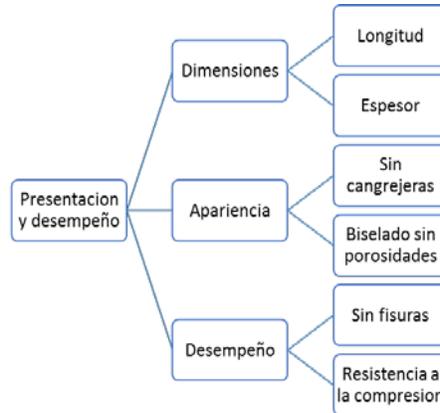


Fig. 1. Definición de características críticas

Para determinar las características más relevantes de debe priorizar los criterios, Índice de importancia del cliente (IIC); y el Grado de no conformidad (GNC). A continuación, se detalla el resultado de la aplicación del análisis en la matriz CTS:

Tabla 2. Resultado matriz CTS.

	Características	IIC	GNC	CTS
1	Longitud	9	3	27
2	Espesor	3	1	3
3	Sin cangrejas	7	5	35
4	Biselado sin porosidades	5	3	15
5	Sin fisuras	9	7	63
6	Resistencia a la mecánica	9	1	9

Las características críticas con alto puntaje son:

1. Sin fisuras
2. Sin cangrejas

### 2.3 Medir

#### Diagrama VSM

En el mapa de flujo de valor actual, el proceso tiene un lead time de 40.5 días, el mayor tiempo empleado se encuentra al final de la línea. Además, se determinó el tiempo que agrega valor siendo estas 29,75 horas, se evidencia que en la etapa de tendido de cables no se tiene la herramienta adecuada para el tender varios cables a la vez, ya que el diámetro de las estructuras portables no coincide con el diámetro de los rollos de cable. Para las demás etapas de producción se tiene tiempos no planificados que aumentan el tiempo de producción y generan horas extras.

#### Recopilación de datos

Se utilizaron los siguientes lineamientos para recolectar la información:

- Se medirá el número de defectos en losas de lotes de producto terminado. Se recolectará datos referentes el año 2016.
- La información se obtendrá de los reportes de las inspecciones realizadas por el técnico de control de calidad de enero a noviembre 2016. En observaciones de los registros de inspección

de producto terminado se encuentra el número de defectos en las muestras inspeccionadas de cada lote.

- El número de defectos se medirá mediante la inspección final realizada a los lotes de producto terminado por parte del técnico de control de calidad.

Para identificar el tamaño de la muestra se utilizó un muestreo aleatorio definido y el departamento de calidad. A continuación, se detalla los datos recopilados de los registros:

- Tamaño de la muestra: 279
- Numero de oportunidades por defecto de unidad: 10
- Numero de defectos observados: 56

#### *Determinación del desempeño del proceso y nivel sigma*

Para calcular el nivel sigma, o capacidad del proceso, se utilizó una calculadora del Nivel Seis Sigma y DPMO. Esta es una herramienta que permite ingresar información sobre los defectos hallados, oportunidades y losas muestreadas a fin de emitir un resultado del nivel sigma del proceso:

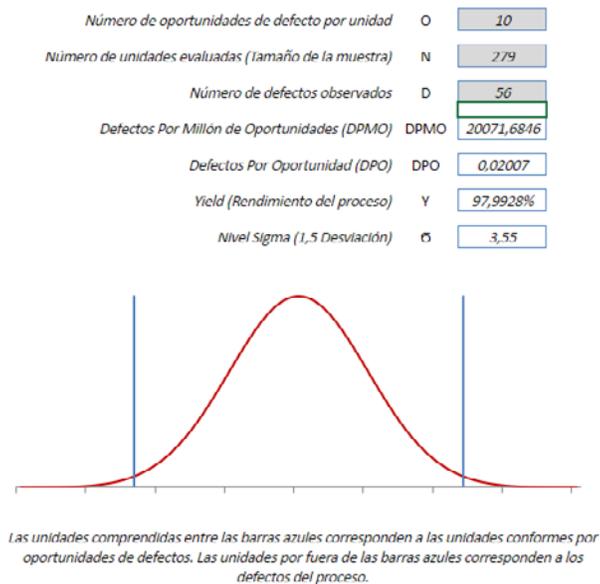


Fig. 2. Cálculo del Nivel Sigma y DPMO, IngenieríaIndustrialonline.com.

El estado actual del proceso y la primera aproximación utilizando esta métrica nos da un nivel sigma de 3,55. Se espera una vez implementada la metodología obtener un nivel sigma de 4,5.

#### *Análisis del sistema de medición aplicado.*

Para validar el sistema de medición se utilizó las Estadísticas Kappa de Fleiss.

Kappa mide el grado de concordancia de las evaluaciones nominales u ordinales realizadas por múltiples evaluadores cuando se evalúan las mismas muestras (Mena Arrata, 2013).

Para el análisis, se tomaron 10 losas con defecto y 10 sin defecto, fueron enumerados de 1 a 20 para llevar control del estándar correcto.

El análisis del sistema empleado de medición es confiable de acuerdo las directrices de la AIGA en su manual de *Measurement Systems Analysis - MSA* cuarta edición, sugieren que “valores de Kappa

mayores que 0.75 indican una concordancia de buena a excelente (con un Kappa máximo = 1); los valores menores que 0.40 indican poca concordancia”.

## 2.4 Analizar

### Identificación de causas potenciales.

En esta parte se busca determinar razones por las cuales se producen los defectos en el producto terminando, para esto hay varias herramientas tales como Diagrama de Ishikawa, Árbol de Causa y Efecto entre otros.

Durante una reunión convocada entre los involucrados del proyecto se realizó una lluvia de ideas para identificar la posible causa raíz del porque se presentan defectos en las losas. Al organizar todas las ideas lo más óptimo es utilizar el diagrama de causa-efecto para el análisis de la presencia de defectos en las losas.

Tabla 3. Matriz causa efecto

Ratio de importancia para el cliente	10	9	5	TOTAL
	1	2	3	
CTQ Relacionados	Sin fisuras	Sin cangrejeras	Longitud	
CAUSAS				
Falta de precisión en el marcado para corte	1	1	4	39
Falta de control de la producción	3	4	2	76
Agregados no cumplen con la granulometría optima	1	2	1	33
Agregados contaminados	1	1	1	24
Falta de personal	4	2	2	68
Falta de capacitación	4	2	1	63
Limpieza deficiente del sistema de moldeado	3	1	1	44
Mala maniobra al movilizar losas al acopio	10	3	1	132
Baja temperatura ambiente al curarse las losas	5	1	1	64
Falta de instructivos y procedimientos de trabajo específicos.	4	2	1	63
Falta de comunicación	1	1	1	24
Falta de instructivos de mantenimiento autónomo.	2	3	1	52
Configuración de maquina deslizando inadecuada	7	8	1	147
Falta de verificación y calibración de maquina deslizando	7	9	1	156

De acuerdo con la gráfica y a la experiencia del equipo, se decidió dar tratamiento a las siguientes:

- Falta de verificación y calibración de maquina deslizando
- Configuración de maquina deslizando inadecuada
- Mala maniobra al movilizar losas al acopio

### Análisis de datos.

Se analizarán estadísticamente cuales son las variables que influyen significativamente en la aparición de defectos en las losas.

Ya identificados los defectos en el proceso de fabricación de losas, en la tabla 4 se detallan las variables vitales que pueden provocar defectos.

Tabla 4. Variables que generan defectos.

Defecto	Variable de entrada	Variable de Salida
Cangrejeras	Hz vibrador delantero y posterior de alta frecuencia	Numero de losas con cangrejeras
Fisuras	Temperatura de losas en el corte de cables	Numero de losas fisuradas.

#### Evaluación del defecto de las cangrejeras en las losas.

Se utilizará un Análisis de Varianza “ANOVA” como herramienta estadística, la misma que evalúa la importancia de uno o más factores al comparar las medias de la variable de respuesta en los diferentes niveles de los factores.

Para el análisis de esta variable se fabricó una pista losas con frecuencia de vibración de 78 Hz y la otra pista con una frecuencia de vibración de 87 Hz durante 5 días de producción días de producción, 1 diaria. En la figura 34 se evidencia el análisis de varianza obteniendo así los siguientes datos:

#### ANOVA de un solo factor: Respuesta vs. Frecuencia(Hz)

##### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Frecuencia(Hz)	2	78, 87

##### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Frecuencia(Hz)	1	1,6000	1,6000	16,00	0,004
Error	8	0,8000	0,1000		
Total	9	2,4000			

##### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,316228	66,67%	62,50%	47,92%

##### Medias

Frecuencia(Hz)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
78	5	0,200	0,447	(-0,126, 0,526)
87	5	1,000	0,000	(0,674, 1,326)

Desv.Est. agrupada = 0,316228

Fig. 3. Análisis ANOVA para defecto de las cangrejeras.

Los resultados de informe ANOVA que el Minitab arroja, al interpretarlo mediante el valor de P, se dice que si es menor 0.05 en valor P, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir la frecuencia de vibración influye en la presencia de cangrejeras.

#### Evaluación del defecto de fisuras en las losas.

Una vez culminado el proceso de curado antes de la liberación de la pista, se controla la temperatura de la losa previo al corte de cables sujetos a la cabeza de tensión. Esta temperatura tiene que estar cerca a la temperatura ambiente, para esto el equipo de trabajo en reunión planifico liberar la pista

entre una temperatura de 20-35° C. Mediante este análisis se buscó identificar si existe relación estadística entre la variable y el efecto.

Para esta evaluación realizo 4 corridas en 4 días de producción, 1 cada día, liberando cada pista a diferente temperatura, se presenta los siguientes resultados.

#### ANOVA de un solo factor: Respuesta vs. Temperatura de Losa (°C)

##### Información del factor

Factor	Niveles	Valores
Temperatura de Losa (°C)	4	20, 25, 30, 35

##### Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Temperatura de Losa (°C)	3	1,688	0,5625	3,86	0,038
Error	12	1,750	0,1458		
Total	15	3,438			

##### Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,381881	49,09%	36,36%	9,49%

##### Medias

Temperatura de Losa (°C)	N	Media	Desv.Est.	IC de 95%
20	4	1,000	0,000	(0,584, 1,416)
25	4	1,000	0,000	(0,584, 1,416)
30	4	0,500	0,577	(0,084, 0,916)
35	4	0,250	0,500	(-0,166, 0,666)

Desv.Est. agrupada = 0,381881

Fig. 4. Análisis ANOVA para presencia de fisuras.

Los resultados de informe ANOVA que el Minitab arroja, al interpretarlo mediante el valor de P, se dice que si es menor 0.05 en valor P, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir la temperatura de losas en el cotee de cables influye en la en la generación de fisuras.

## 2.5 Mejorar

La generación de soluciones en el proceso, se las realizo levantando un mapeo de Flujo Futuro a través del análisis correspondiente los defectos producidos en las losas.

De acuerdo al mapeo de flujo de valor, entre las soluciones planteadas tenemos:

- Modificación de carretes porta cables,
- Implementación Kanban,
- Implementación JIT,
- Implementación TPM,
- Elaboración de procedimiento de izaje seguro.
- Capacitación izaje seguro de losas.

*Métrica Seis Sigma del proceso mejorado.*

Una vez implementado las mejoras, se identificará si el proceso productivo genero cambios al aumentar el nivel sigma determinando, se consideró todos los defectos identificados en los muestreos del departamento de control calidad durante un periodo de análisis de dos meses, siendo estos del mes de abril y mayo de 2017, obteniendo así lo siguiente:

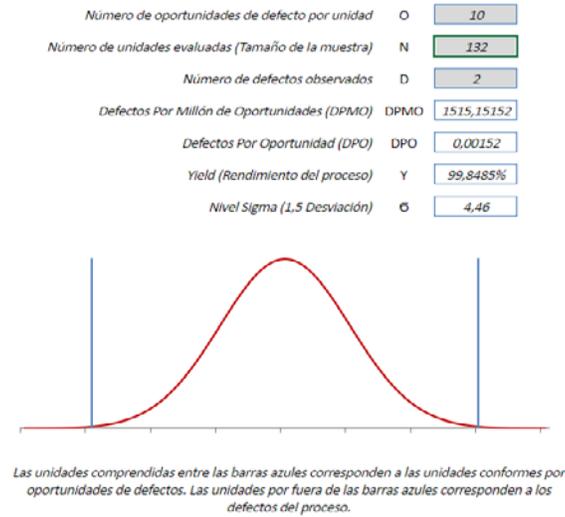


Fig. 5. Calculo de Nivel sigma y DPMO del proceso mejorado. IngenieriaIndustrialonline.com.

### 2.6 Controlar

Una vez implementado las mejoras, se debe definir una metodología que permita que los resultados obtenidos se mantengan con la misma eficacia a lo largo del tiempo. También será importante contar con herramientas que alerten cuando ocurra una desviación o error en el proceso establecido. En esta fase para concluir un proyecto DMAIC, se estandariza, documenta y monitorea los controles con el fin de lograr una permanencia en el tiempo de los resultados obtenidos.

Tabla 4. Propuesta de indicadores para el control del proyecto.

No.	Indicador	Fórmula de cálculo	Unidad de medida	Responsable de medición	Frecuencia de medición
1.	Productividad Losas	Kilos producidos/ kilos programados	Producto Terminado	Coordinadora de prefabricados	Mensual
2.	Desperdicio	Restos y desperdicios / insumos	Kg	Coordinadora de prefabricados	Mensual
3.	Tiempo de producción	Tiempo real / tiempo programado	Horas producción	Coordinadora de prefabricados	Mensual
4.	OEE	Disponibilidad*Rendimiento*Calidad	Tiempo	Coordinadora de prefabricados	Mensual

## 3 RESULTADOS

La productividad mejorada se evidencia en la reducción de producto no conforme, espera y sobreproducción de hormigón. Una vez implementado el proyecto, diariamente se produce 263 m<sup>2</sup> de losas, en comparación con la producción antes de la mejora de 249 m<sup>2</sup>.

Las mejoras realizadas se aplicaron en la línea de producción de losas alveolares. En la tabla 5, se muestra el cuadro de resumen de mejoras, donde se encuentran los valores estimados después de la mejora. Los datos presentados a continuación para compararlos se tomaron los meses que los que fue implementado el proyecto y los mismos meses antes del proyecto a fin de relacionarlos, teniendo en cuenta que equipo del proyecto daría seguimiento para que le mejora se evidencie y se mantenga a largo plazo.

Tabla 5. Resumen de mejoras

		Producto no conforme (m <sup>2</sup> )	Sobreproducción de hormigón (m <sup>3</sup> )	Tiempo de proceso(horas)
<b>Actual 2016</b>	Febrero	343.47	1.98	
	Marzo	818.994	2.95	
	Abril	73.89	1.18	
	Mayo	37.53	2.6	29.75
<b>Mejorado 2017</b>	Febrero	18	0.09	
	Marzo	2.5	0.06	
	Abril	4.8	0.08	
	Mayo	1	0.1	22.58

### Evaluación económica.

Como respuesta a la implantación se evalúa el estado económico-financiero de las soluciones y las mejoras propuestas. El proyecto LSS se ha implementado en la línea de losas alveolares. En la Tabla 6, se muestra los costos generados por problemas definidos y solventados utilizando la metodología, donde se evidencia una disminución de los costos de los problemas detectados.

Tabla 6. Costos situación actual y mejorada

Situación	Costo de losa por m <sup>2</sup> (\$/m <sup>2</sup> )	Producción Mensual (m <sup>2</sup> )	Producto no conforme	Costo de m <sup>3</sup> de hormigón (\$/m <sup>3</sup> )	Exceso de hormigón (m <sup>3</sup> ) *	Costo desperdicio producto no conforme (US\$)	Costo exceso de hormigón (US\$)	Costos totales por pérdidas (US\$)
<b>Actual</b>	75	4240	3.60%	94	1.78	12,084	167.32	12,251.32
<b>Mejorado</b>	75	4240	0.40%	94	0.08	1,272	7.52	1,279.52
<b>AHORRO</b>							<b>US\$10,971.80</b>	

En la tabla 6, se observa como la implementación de la metodología fue favorable y se lo evidencia en el análisis financiero, por mes se produce 4240 m<sup>2</sup>, el costo de \$ 75 es el valor estandarizado luego de haber analizado todos los costos que se generan para producir 1 m<sup>2</sup> de losa. Comparando el costo total de producir producto no conforme y sobreproducción de hormigón una vez mejorado el proceso se tiene un ahorro de \$10,971.80 por mes.

La inversión requerida para el proyecto LSS, es \$ 6720, durante 6 meses que fue el tiempo de duración del proyecto. Los costos para capacitación, el caso de TPM en temas de operación de máquinas fue realizado por la empresa proveedora de las máquinas, el costo no resulto alto debido a que la empresa planifico asesoramiento de otras líneas de producción y se aprovechó la presencia de los asesores para el adiestramiento del personal para la línea de fabricación de losas.

Para cada una de las herramientas lean utilizadas, las realizo el Black belt en este caso el autor del proyecto que solo requirió costos de material de difusión y de transporte. En la capacitación de izaje seguro de losas se determinó que era de vital importancia que las personas involucradas en dicha actividad tengan licencia en prevención de riegos, ya que los mismo trabajan en el montaje de losas en obra, adicionalmente se los capacito en manejo de puentes grúa y adiestramiento en acopio de producto terminado.

## 4 CONCLUSIONES

Se ha demostrado la mejora en la línea de producción de losas alveolares, evidenciado en la disminución de producto no conforme, tiempos de espera y sobreproducción de hormigón, generando una disminución en los costos por desperdicios.

La situación actual del proceso productivo de losas está generando pérdidas a la empresa, al diagnosticar el problema en la fase de definición, se identificó como principal problema la generación de producto no conforme debido a que un promedio de 3.8% de la producción al día estaba fuera de especificación, para lo cual se genera el Project charter que establece como se va desarrollar el proyecto, además se plantea el VSM donde se visualiza el proceso productivo identificando el tiempo de proceso.

El desempeño del proceso fue evaluado mediante el cálculo del nivel sigma en la fase de medición, obteniéndose un nivel de 3.5 mismo que define la capacidad del proceso, concluyendo que está dentro de especificación, pero se requiere mejorarlo a 4.5, para tener confiabilidad en la medición y determinar que el sistema de medición es aceptable se realizó un estudio de Estadísticas Kappa de Fleiss.

Las variables susceptibles al proceso de mejora se las establece la fase de análisis, identificando cuales son las causas a los problemas presentados en la primera fase de la metodología, se analizó todas las causas posibles siendo la principal la operación, verificación y calibración de la maquina deslizante, definiendo como variables que afectan a la generación de producto no conforme a la frecuencia de vibración y temperatura de losa previo al corte de cables de la cabeza de tensión.

Se estableció como herramientas lean para mejora al TPM, JIT y KANBAN las mismas que implementadas generaron en la etapa de mejora en el proceso productivo tanto en la disminución de producto no conforme, tiempos de espera y sobreproducción de hormigón.

Se evaluó financieramente el proyecto LSS, con una duración de 6 meses, evidenciándose una inversión relativamente pequeña en comparación a los gastos por desperdicios, definiendo así que las mejoras generaron un impacto económico positivo al generar un ahorro a la empresa.

### **Conflicto de Intereses**

Se expresa de manera libre y voluntaria que en el desarrollo del presente artículo no existen conflictos de interés personales por parte de ninguno de los autores por lo que se autoriza la publicación del trabajo.

## **5 REFERENCIAS**

1. Arbulo López Patxi Ruiz. (2013). La gestión de costes en Lean manufacturing: cómo evaluar las mejoras en costes en un sistema lean. La Rioja: Universidad Internacional de La Rioja, S. A. (UNIR). Recuperado el 5 de septiembre de 2017 de <http://site.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/lib/udlasp/reader.action?docID=11230932>
2. Arnau, H. S. (2015). Optimización De Losas Alveolares Pretensadas En Situación Accidental De Incendio. Tesis Doctoral. Valencia, España: Universitat Politècnica de València. Recuperado el 24 de octubre de 2017 de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/57954/Saura%20-%20OPTIMIZACI%3%93N%20DE%20LOSAS%20ALVEOLARES%20PRETENSADAS%20EN%20SITUACI%3%93N%20ACCIDENTAL%20DE%20INCENDIO.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
3. Bhote, K. R. (2001). Ultimate Six Sigma. Saranac Lake: AMACOM. Recuperado el 25 de abril de 2017 de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/udlap/detail.action?docID=3001730>

4. Felizzola Jiménez, H., & Luna Amaya, C. (2014). Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico. *Ingeniare. Revista chilina de ingeniería*, 22(2), 263-277. Recuperado el 5 de mayo de 2017 de <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052014000200012>
5. Gancedo, A. E. (2007). *Implantación de la Filosofía TPM en una Planta de Producción y Envasado. Proyecto de fin de carrera*. Madrid: UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS.
6. Raton, US: J. Ross Publishing, Incorporated. Recopilado el 11 de julio de 2017 de <http://www.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec>
7. Jiménez, H. F., & Amaya, C. L. (2014). Lean Six Sigma en pequeñas y medianas empresas: un enfoque metodológico/Lean Six Sigma in small and medium enterprises: a methodological approach. *Ingeniare : Revista Chilena de Ingeniería; Arica*, 22(2), 263-277.
8. Lefcovich, & Mauricio León. (2009). Seis SIGMA "Hacia un nuevo paradigma en gestión. El Cid Editor | apuntes. Recuperado el 25 de abril de <http://site.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/lib/udlasp/reader.action?docID=10312014>
9. Mantilla Celis, O. L., & Sánchez García, J. M. (2012). Modelo tecnológico para el desarrollo de proyectos logísticos usando Lean Six Sigma. *Estudios Gerenciales*, 28(124), 23-43. Recuperado el 28 de agosto de 2016 de [https://doi.org/10.1016/S0123-5923\(12\)70214-0](https://doi.org/10.1016/S0123-5923(12)70214-0)
10. Mehrjerdi, Y. Z. (2011). Six-Sigma: methodology, tools and its future. *Assembly Automation*, 31(1), 79-88. Recuperado el 25 de abril de 2017 de <https://doi.org/http://dx.doi.org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/10.1108/01445151111104209>
11. Membrado Martínez. (2013). *Metodologías avanzadas para la planificación y mejora*. Ediciones Díaz de Santos. Recuperado el 25 de abril de 2017 de <http://site.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/lib/udlasp/reader.action?docID=10862444>
12. Mena Arrata, C. (2013). *Aplicación de la metodología seis sigma para la reducción de las variaciones de calidad en el proceso de fabricación de pañales desechables para bebé. caso máquina 8. Tesis pregrado*. Quito, Ecuador: Universidad de las Americas.
13. Nofuentes Pérez Santiago. (2013). *Más calidad menos coste: la vía Lean Healthcare*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos. Recuperado el 9 de mayo de 2017 de <http://site.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/lib/udlasp/reader.action?docID=10862153>
14. Powell Jacquier a. (2010). *Losas y Paneles Alveolares Prefabricados Pretensados*. Recuperado el 21 de julio de 2016 de [http://www.weilerprecast.com/docs/LosasAlveolaresPretensadas\\_Ventajas\\_Ejemplos\\_Weiler.pdf](http://www.weilerprecast.com/docs/LosasAlveolaresPretensadas_Ventajas_Ejemplos_Weiler.pdf)
15. Rajadell Carreras Manuel, & Sánchez García José Luis. (2009). *Lean Manufacturing, la evidencia de una necesidad*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos. Recuperado el 21 de julio de 2016 de <http://site.ebrary.com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/lib/udlasp/reader.action?docID=10526533>
16. Reference Manual,. (2010). *AIAG Measurement System Analysis (MSA) (4ta edition)*. Automotive Industry Action Group. Recuperado el 2 de noviembre de 2017 de <https://es.slideshare.net/aniuxppi/aiag-msa-4th-ed>
17. Thomas Pyzdek, & Paul Keller. (2014). *The Six Sigma Handbook*. McGraw-Hill Education. Recuperado el 26 de abril de 2017 de [http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/41061193/The\\_six\\_sigma\\_handbook.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1493251471&Signature=dWY5xgd6T%2BjHpn18jfWh4hdQcuo%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DThe\\_Six\\_Sigma\\_Handbook.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/41061193/The_six_sigma_handbook.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A&Expires=1493251471&Signature=dWY5xgd6T%2BjHpn18jfWh4hdQcuo%3D&response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DThe_Six_Sigma_Handbook.pdf)



Con la finalidad de establecer una tradición académica que permita ser el espacio para la presentación de los diferentes resultados de investigación generados desde los espacios de la docencia y la industria, la Facultad de Mecánica de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo desarrolló del 21 al 24 de octubre de 2019 su “III Congreso Internacional de Ingeniería”. El evento congregó a investigadores de la academia italiana, española y ecuatoriana, con un total de 17 ponencias aceptadas relacionadas con el desarrollo de nuevas tecnologías, diseño, producción, gestión, nuevos materiales, eficiencia energética y reducción de emisiones.

ISBN: 978-9942-40-065-9



9 789942 400659