

INGENIUS

Revista de Ciencia y Tecnología



- Diseño de una maquina para cortar y doblar estribos en serie para columnas de hormigon armado
pág. 5
- Fomento del metabolismo energético circular mediante generación eléctrica proveniente de rellenos sanitarios: estudio de caso, Cuenca, Ecuador
pág. 36
- Desempeño ante la corrosión y tribocorrosión de aleaciones comerciales de aluminio anodizadas
pág. 64

INGENIUS

INGENIUS • Número 16 • Julio/Diciembre 2016. Revista semestral de Ciencia y Tecnología de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Publicación dedicada a estudios relacionados con las Ciencias de la Ingeniería Mecánica, Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Ingeniería de Sistemas, Ingeniería Civil e Ingeniería Industrial.

Consejo Editorial

Rafael Antonio Balart Gimeno, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia – España (Editor en jefe).

John Calle Sigüencia, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador (Editor responsable).

Juan López Martínez, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia – España.

Gustavo A. Rovelo Ruiz, Hasselt University, Diepenbeek – Bélgica.

Julio César Viola, Universidad Simón Bolívar, Caracas – Venezuela.

Paulo Peña Toro, Ministerio de Industrias y Productividad, Quito – Ecuador.

Franklin Gavilánez Álvarez, American University, Washington D. C. – Estados Unidos.

Piedad Gañán Rojo, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín – Colombia.

José Alex Restrepo, Universidad Simón Bolívar, Caracas – Venezuela.

Sergio Luján Mora, Universidad de Alicante, Alicante – España.

Martha Lucía Zequera Díaz, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá – Colombia.

Grover Zurita Villarroel, Universidad Privada Boliviana, Cochabamba – Bolivia.

Mariela Cerrada Lozada, Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela.

Vladimir Robles Bykbaev, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

Pablo Parra Rosero, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil – Ecuador.

Germán Arévalo Bermeo, Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador.

Diego Peñaloza Rivera, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

Luis Garzón Muñoz, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

Tiraje: 3600 ejemplares

Indización. INGENIUS está indizada en el catálogo Latindex, Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal. El acceso a la versión electrónica se encuentra en www.latindex.unam.mx

Copyright. INGENIUS 2016, Universidad Politécnica Salesiana. Se permite la reproducción total o parcial de esta revista citando la fuente.

INGENIUS

REVISTA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Número 16, julio – diciembre 2016

ISSN impreso 1390-650X / ISSN electrónico 1390-860X

Indexada en:



Sistema Regional de Información en línea para Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal.

La administración de INGENIUS se realiza a través de los siguientes parámetros:

La revista utiliza el sistema antiplagio académico



Los artículos cuentan con código de identificación (*Digital Object Identifier*)



El proceso editorial se gestiona a través del *Open Journal System*



Es una publicación de acceso abierto (*Open Access*) con licencia *Creative Commons*



Las políticas *copyright* y de uso *postprint*, se encuentran publicadas en el Repositorio de Políticas de Autoarchivo *Sherpa/Romeo*.

Los artículos de la presente edición pueden consultarse en <http://revistas.ups.edu.ec/index.php/ingenius>



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Rector

Javier Herrán Gómez, sdb
Turuhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla Postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

Vicerrector General Académico

Luis Tobar Pesántez

Vicerrector Docente

Fernando Pesántez Avilés

Vicerrector de Investigación

Juan Salgado Guerrero

Vicerrectores de Sede

César Vásquez Vásquez (Cuenca)
José Juncosa Blasco (Quito)
Andrés Bayolo Garay (Guayaquil)

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología, publicación semestral, N.º 16, Julio-Diciembre 2016.

Editor responsable: John Calle Sigüencia. ISSN: 1390-650X. Domicilio de la publicación: Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador. Casilla postal 2074, Cuenca, Ecuador. Centro Gráfico Salesiano, Calle Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres. Teléfono: (+593 7) 283 17 45, Cuenca, Ecuador.

Correo electrónico: revistaingenius@ups.edu.ec

©INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología.

Impreso en Ecuador.

Los conceptos expresados en los artículos competen a sus autores. Los artículos de la presente edición pueden consultarse en la página web de la revista.

Tiraje: 3600 ejemplares

Consejo de Publicaciones

Javier Herrán Gómez, sdb
PRESIDENTE

Juan Bottaso Boetti, sdb
Teodoro Rubio Martín
José Juncosa Blasco
Jaime Padilla Verdugo
Floralba Aguilar Gordón
Sheila Serrano Vicenti
Fabricio Freire Morán
John Calle Sigüencia
Armando Grijalva Brito
Alexandra Martínez Flores
Mónica Ruiz Vásquez

Luis Álvarez Rodas
EDITOR GENERAL

Estimadas y estimados lectores:

INGENIUS en su afán de fortalecer su equipo editorial ha buscado involucrar a investigadores de alto nivel para acompañarnos en este proceso; en esta ocasión nos place dar a conocer que el Dr. Rafael Antonio Balart Gimeno, profesor titular de la Universidad Politécnica de Valencia, se integra al equipo de trabajo como Editor en jefe de la publicación; también en esta misma línea el Dr. Juan López Martínez, catedrático de la Universidad Politécnica de Valencia se incorpora como miembro del Consejo Editorial. Son grandes investigadores con un significativo número de publicaciones indexadas en bases de datos de alto prestigio, las que avalan la calidad de sus trabajos y fortalecen la calidad científica del Equipo Editorial.

En este número existe la participación de grupos de investigadores que asociados bajo la figura de redes de investigación dan a conocer trabajos que se han desarrollado de forma sinérgica, demostrando que el trabajo en equipo unido a las nuevas tecnologías de la información y de la comunicación fortalece las actividades investigativas, fomenta el desarrollo científico y tecnológico y aporta de manera significativa a la innovación.

Se encuentran artículos donde investigadores de países como España, Cuba, Venezuela, Panamá, y Ecuador se unieron; aportes en el área de diseño de máquinas como el presentado por Pérez – Silva que nos da a conocer el diseño de una máquina para cortar y doblar estribos en serie para columnas de hormigón armado. En esta misma línea Pino, Beltrán, Mena y otros realizan

el análisis comparativo de los indicadores técnicos explotativos en dos tipos diferentes de cosechadoras de caña para establecer procesos que permitan una selección adecuada en función de parámetros técnicos e indicadores específicos.

En el área de las energías renovables, Arroyo y Reina presentan el aprovechamiento del recurso de biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor; Barragán, Arias y Terrados analizan el fomento del metabolismo energético circular mediante generación eléctrica proveniente de rellenos sanitarios en un caso puntual en Cuenca Ecuador; estos aportes establecen la necesidad de la diversificación de la matriz energética y las ventajas que estas presentan para la sociedad en general.

En lo referente a modelado y simulación; Ordóñez y Oñate nos dan a conocer un detector de borde de imágenes usando un microcontrolador Arm; Fajardo y Páez exponen la simulación del tiempo de calentamiento del fueloil para determinar viscosidad óptima de bombeo; Cordero Chacón y otros estructuran un modelo de procesos para la automatización del área de producción en el sector de la Industria cementera pública del Ecuador, temas de gran interés que aportan ideas para favorecer la innovación y el desarrollo.

Finalmente, Rodríguez, Carrasquero y otros realizan un importante aporte en el área de materiales analizando el desempeño ante la corrosión y tribocorrosión de aleaciones comerciales de aluminio anodizado y definiendo variables de gran importancia para mejorar el comportamiento ante este agresivo proceso que está presente en todos los niveles industriales.

John Calle Sigüencia, M. Sc.
Editor responsable

ÍNDICE

Diseño de una máquina para cortar y doblar estribos en serie para columnas de hormigón armado. Design a machine to cut and bend brackets in a serial order for reinforced concrete pillars.	5
José Olger Pérez-Silva.	
Análisis comparativo de los indicadores técnicos explotativos en las cosechadoras de caña KTP-2M y KTP-3000S. Comparative analysis of technical indicators of explotative in the cane harvesters KTP-2M and KTP-3000S.	12
Julio C. Pino-Tarragó, Roberto F. Beltrán-Reyna, Euro R. Mena-Mena, Yoandrys Morales-Tamayo, José A. Martínez-Grave de Peralta, Joao L. Bárzaga-Quesada, Rolando E. Simeón-Mone.	
Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor. Exploitation of biomass resources in the form of wood waste for steam boiler.	20
Juan Sebastián Arroyo-Vinueza, Washington Salvatore Reina-Guzmán.	
Detector de bordes de imágenes usando un microcontrolador arm. Edge detection image using arm microcontroller.	30
Juan Francisco Ordóñez, Luis Oñate.	
Fomento del metabolismo energético circular mediante generación eléctrica proveniente de rellenos sanitarios: Estudio de caso, Cuenca, Ecuador. Promoting Circular Energy Metabolisms through Electricity Generation from Landfills: Case study Cuenca, Ecuador.	36
Edgar A. Barragán, Pablo D. Arias, Julio Terrados.	
Simulación del tiempo de calentamiento del fueloil para determinar viscosidad óptima de bombeo. Fuel Oil heating time simulation to determine optimal pumping viscosity.	43
Sandra Elvira Fajardo-Muñoz, Galo Jaime Páez-Fajardo.	
Modelo de procesos para la automatización del área de producción en el sector de la industria cementera pública del Ecuador (MPIC) Model processes to automate the production in cement public industry of Ecuador (MPIC)	51
Diego Cordero-Guzmán, Edgar Chacón, Isael Sañay, Deysi Criollo-Delgado	
Desempeño ante la corrosión y tribocorrosión de aleaciones comerciales de aluminio anodizadas Corrosion and Tribocorrosion Performance of Commercial Anodized Aluminum Alloys.	64
Samantha Rodríguez, Edwuin J. Carrasquero, Luis M. López y Jorge I. Fajardo	
Normas editoriales.	73
Guidelines	77

DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA CORTAR Y DOBLAR ESTRIBOS EN SERIE PARA COLUMNAS DE HORMIGÓN ARMADO

DESIGN A MACHINE TO CUT AND BEND BRACKETS IN A SERIAL ORDER FOR REINFORCED CONCRETE PILLARS

José Olger Pérez-Silva^{1,*}, Oscar Paul Trujillo-Zurita²

Resumen

En este artículo se presenta el diseño y construcción de una máquina para cortar y doblar estribos para columnas de hormigón armado. Esta es una solución que busca reemplazar el trabajo manual que realiza una persona para la fabricación de estos elementos. Parte desde el análisis del índice RULA, (Rapid Upper Limb Assessment) que determina la carga de afectación ocupacional a la salud del operario, quien de forma artesanal produce 600 estribos diarios. El resultado obtenido fue de 7 y ante esta situación se plantea una alternativa de trabajo al diseñar y posteriormente construir un equipo que realice las mismas operaciones reemplazando el esfuerzo humano. Se describe cómo fue el proceso de diseño y fabricación de la máquina que permitió obtener los mismos 600 estribos en 2 horas de funcionamiento y sin causar un alto grado de agotamiento físico en la persona, situación que se hace notoria cuando el índice RULA baja de 7 a 3.

Palabras clave: enfermedad ocupacional, estribo, estructura, mecanismo, productividad. RULA (Evaluación Rápida de los Miembros Superiores).

Abstract

This article presents the design and construction of a machine that is used to cut and bend braces for reinforced concrete columns. This is a solution to replace the manual work carried out by a person during the manufacturing of these elements. This project is based on analyses of R.U.L.A (Rapid Upper Limb Assessment) that determines the occupational affections in the worker's health who produces about 600 braces daily in a traditional way. The result obtained was 7. This proposal shows an alternative to design and build equipment that will realize the same operations, so that the human effort will be reduced. This article describes the process of the design and construction of the machine, the result shows the benefit of the machine that will avoid the physical effort of the worker, which is evident applying the R.U.L.A that is from 7 – 3 when we obtained 600 braces in only two hours.

Keywords: Occupational safety and health, reinforcement bar, Structure, Mechanism, Productivity, R.U.L.A (Rapid Upper Limb Assessment).

^{1,*}Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: jperez@ups.edu.ec

²Departamento de Proyectos y Mejoras Industriales, Zaimella del Ecuador.

Recibido: 02-02-2016, aprobado tras revisión: 19-09-2016

Forma sugerida de citación: Pérez, J. (2016). «Diseño de una máquina para cortar y doblar estribos en serie para columnas de hormigón armado». INGENIUS. N.º16, (Julio-Diciembre). pp. 5-11. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

El crecimiento de la construcción civil donde se utilizan columnas de hormigón armado aumenta cada año (Figura 1) según el índice general de la construcción publicado por el INEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos).

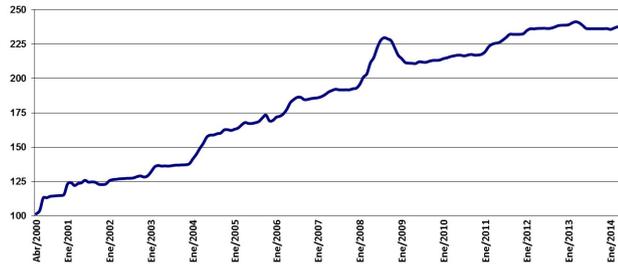


Figura 1. Censo del crecimiento anual de la construcción civil en general [1]

El principio de estabilidad y firmeza de las columnas se basa en la unión de los estribos con las varillas longitudinales, los mismos que se colocan en una cantidad aproximada de veinte por cada 2,5 metros de columna, que es la altura más común entrepisos y la medida más vendida en el mercado.

Las columnas de hormigón armado son elementos que se forman a partir de la unión de varillas largas con estribos o refuerzos (según norma internacional ACI318) que se cruzan transversalmente (Figura 2), estos elementos generalmente se los realiza en obra, lo que incrementa el tiempo de trabajo del obrero y disminuye tiempo en la construcción, situación que afecta directamente a los proyectos finales, además, causa cansancio y agotamiento en quién realiza esta operación.

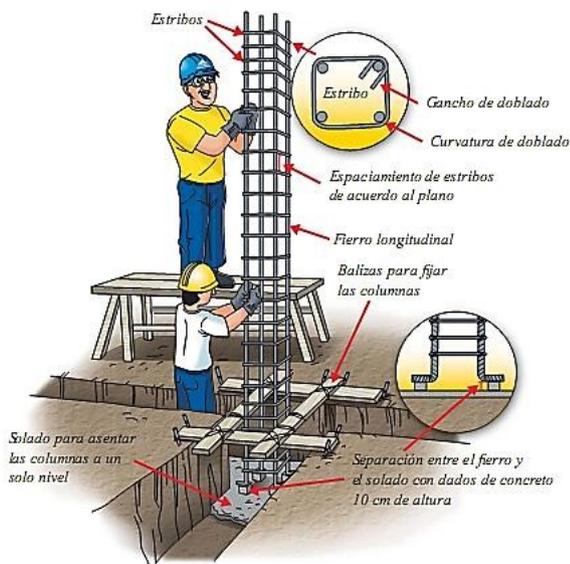


Figura 2. Armazón de hierro para columna de hormigón armado [2]

Generalmente, estos estribos los realiza un obrero en forma manual (Figura 3) con una producción aproximada de 600 unidades en una jornada laboral de 8 horas, lo que implica materia prima para 30 columnas diarias. Al ser este un proceso repetitivo y continuo puede provocar enfermedades ocupacionales al trabajador como tenosinovitis, bursitis, trastornos musculares, etc.



Figura 3. Producción manual [3]

Según análisis realizado aplicando el método RULA (Rapid Upper Limb Assessment, que en español quiere decir Evaluación Rápida de los Miembros Superiores) se ha determinado que este procedimiento de trabajo da una puntuación final de 7 (Figura 4) que interpretado recomienda estudiar y modificar inmediatamente el proceso operativo.

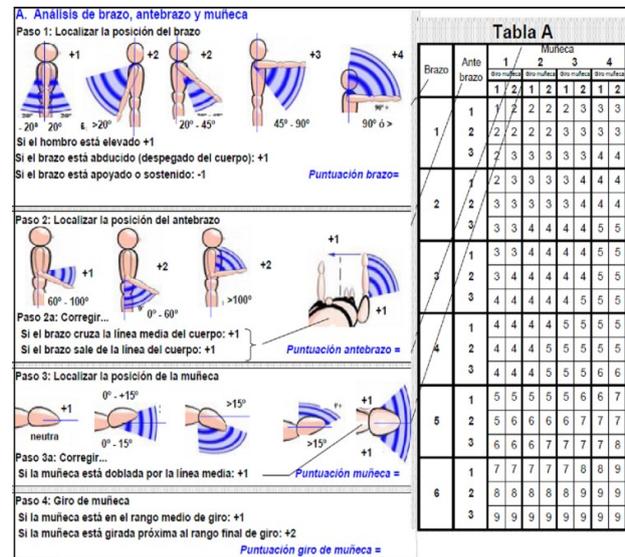


Figura 4. Hoja de análisis Método RULA [4]

Analizando esos resultados que afectan directamente a la salud del operario y en busca de la solución a esas condiciones extremas de trabajo, se propuso investigar una forma alternativa de realizar dicha labor y se obtuvo como resultado, el diseño y la posterior construcción de una máquina (Figura 5) para cortar y doblar estribos en serie, con lo que se disminuiría el mencionado índice y que, además, se incrementaría

la producción diaria cual lo cual se traduciría tanto en beneficio social como económico al disminuir enfermedades profesionales y costos de producción respectivamente.



Figura 5. Máquina para cortar y doblar estribos

2. Desarrollo

2.1. Varilla corrugada

Una varilla corrugada es una aleación de acero y otros componentes químicos que le dan a esta características especiales, formada por corrugas o resaltos que son necesarios para la adhesión del hormigón, no tienen una capa protectora ante la corrosión u oxidación ya que el mismo concreto se encarga de revestirla y darle un tiempo de vida extendido.

Esta tiene características especiales, muy buena ductilidad, gran límite de fluencia y un alto grado de resistencia sísmica. Datos reales de ensayos realizados por la fábrica ANDEC en sus laboratorios (Tabla 1) han sido utilizados para el desarrollo del proyecto.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de la varilla corrugada

PROPIEDADES MECÁNICAS				
GRADO DE ACERO	FLUENCIA (kg/cm ²)	TRACCIÓN (kg/cm ²)	ALARGAMIENTO (diámetro)	%
A-42 DE TRACCIÓN	4200 min	5600 min	8 - 20	14
CONTROLADA	5500 máx		22-36	12
			40	10

2.2. Diseño y construcción

El diseño de la máquina inicia con el cálculo de la fuerza necesaria para doblar la varilla corrugada (1),

para lo cual se utilizó la fórmula de flexión (2) y se la combinó con el factor plástico (3), ya que se desea deformar totalmente el elemento.

$$F = \frac{4 \cdot K \cdot \sigma_{m\acute{a}x} \cdot I}{L \cdot c} \quad (1)$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M \cdot c}{I} \quad (2)$$

$$K = \frac{M_p}{M} \quad (3)$$

Donde las principales variables son el esfuerzo máximo de fluencia, la inercia, longitud de apoyos, distancia del eje neutro y el factor K, el cual está definido como el factor plástico de una sección transversal. Con esta fórmula se determina inicialmente la fuerza de doblado, pero no se consigue el resultado esperado. Realizando un experimento que consiste en la aplicación de pesos a un mecanismo de palanca, se determina el factor de doblado (fd = 1,32), definiendo así la fuerza total.

El corte de la varilla se deduce realizando una analogía del cálculo de pernos en cortante directo (4), interpretando que el esfuerzo no será el de fluencia, sino el de tracción ya que se requiere la falla del material. Para lo cual se comprueba con la fórmula de corte de chapa (5) cambiando la longitud y sección de corte por el diámetro de la varilla.

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (4)$$

$$F = \sigma_c \cdot e \cdot l \quad (5)$$

Realizado el cálculo de corte y doblado se procede con el diseño del mecanismo (Figura 6) y el cálculo de fuerzas y reacciones que se denotan en el cuerpo libre que este describe (Figura 7), determinando así las fuerzas más importantes que serían la motriz y la de corte, concluyendo que la fuerza de corte satisface la necesidad y la motriz es proporcional al torque que provee el motor reductor.

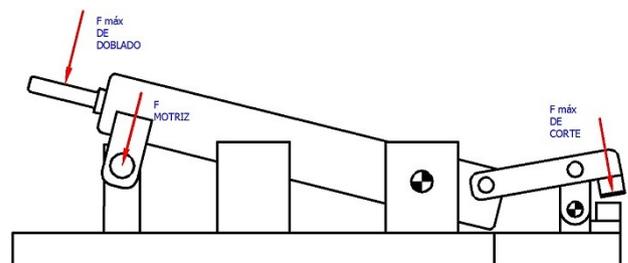


Figura 6. Mecanismo de trabajo y fuerzas significativas

puede simular la carga y obtener el esfuerzo necesario para determinar el material de construcción.

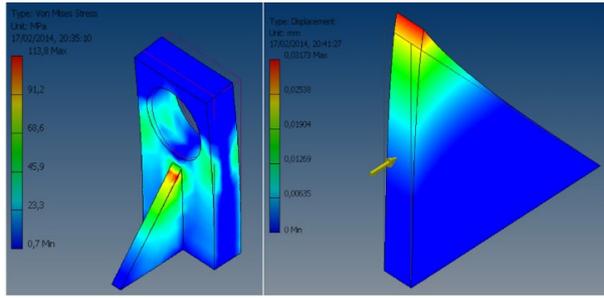


Figura 11. Simulación de esfuerzos en triángulos soporte

Como un plus al cálculo de elementos especiales como el mencionado, se realiza una combinación de cálculos tomando como referencia una viga empotrada en su extremo (Figura 12), con sección rectangular, pero analizada por puntos críticos.

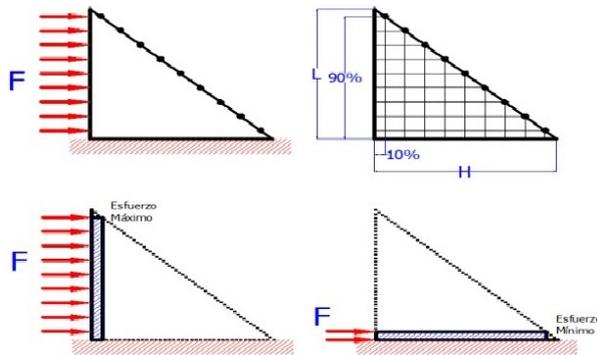


Figura 12. Análisis matemático por puntos críticos

La simulación se comprueba mediante una tabla (Tabla 4) de Excel que hace referencia a los porcentajes en distancia de los dos esquemas de viga empotrada.

Tabla 4. Tabla de cálculo porcentual combinado para una simulación de triángulos

CÁLCULO DE ESFUERZOS EN UNA PIEZA TRIANGULAR				
CARGA [N]	DIST "L" [m]	DIST H [m]		
2830	0,035	0,035		
DISTRIBUCIÓN [%]	DIST "L" [m]	DIST H [m]	ESPESOR [m]	ESFUERZO [Pa]
90	0,0315	0,0035	0,005	275.076.000,0
80	0,028	0,007	0,005	54.336.000,0
70	0,0245	0,0105	0,005	18.489.333,3
60	0,021	0,014	0,005	7.641.000,0
50	0,0175	0,0175	0,005	3.396.000,0
40	0,014	0,021	0,005	1.509.333,3
30	0,0105	0,0245	0,005	623.755,1
20	0,007	0,028	0,005	212.250,0
10	0,0035	0,0315	0,005	41.925,9

Las partes restantes y piezas normalizadas se determinaron bajo parámetros estandarizados que facilitan el cálculo y la fiabilidad de los elementos en estudio. Todos los elementos y partes se diseñaron con un factor de seguridad de dos (2) por cuanto se trabaja con cargas dinámicas [6], para evitar los altos incrementos de costo por sobremedidas y mecanizados, garantizando la funcionalidad y durabilidad. Así, por ejemplo, se determina para el cálculo de pernos (Figura 13) todas las variables necesarias, desde las características del elemento hasta la carga final que puede soportar en tracción y el factor de seguridad que garantiza la junta.

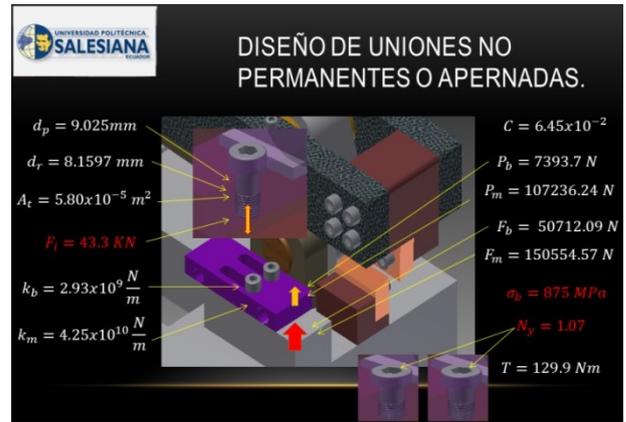


Figura 13. Referencias necesarias para el cálculo de pernos [7]

2.3. Funcionamiento y partes

La máquina que se ha diseñado y construido para cortar y doblar estribos consta de un motor con potencia de 2,2 kW que entrega un torque de (670 Nm) mediante un reductor de velocidad cuya relación de transmisión es de 1/56. Este torque, que genera un movimiento rotativo es convertido a un movimiento lineal gracias a un mecanismo denominado cigüeñal-biela (Figura 14).

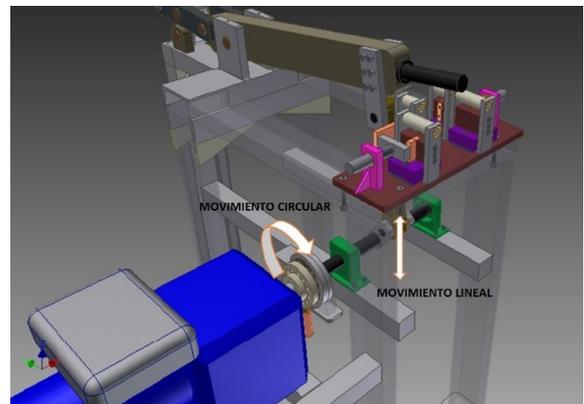


Figura 14. Mecanismo cigüeñal-biela que transforma el movimiento circular en lineal

La fuerza es transmitida hacia el brazo de doblado y este a su vez genera movimiento en los eslabones posteriores, los cuales se mueven y crean reacciones necesarias para cortar la varilla corrugada en el extremo posterior de la máquina (Figura 15).

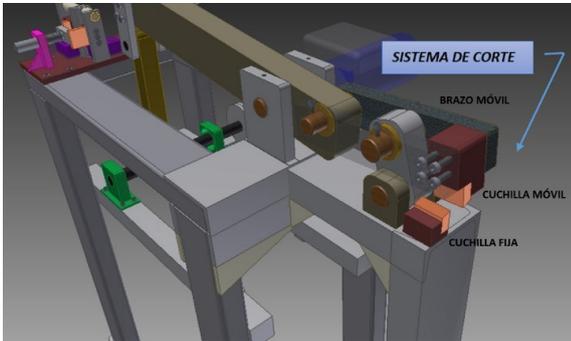


Figura 15. Sistema de corte

Las principales partes de la máquina son los sistemas de corte y doblado (Figura 16), los cuales son regulables a las distancias necesarias, pero limitadas. El proyecto concluye realizando las pruebas extremas para cortar y doblar varilla de diámetro 8 mm obteniendo productos con mejores acabados que los hechos a mano.

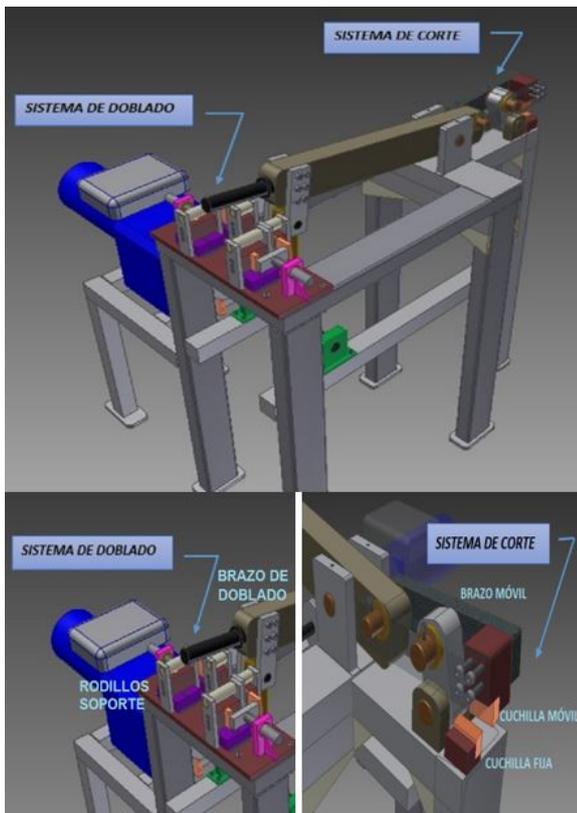


Figura 16. Mecanismo de doblado y corte

3. Resultados y discusión

La máquina cumple el objetivo principal que está planteado, cortar y doblar varilla corrugada para realizar estribos en serie de diámetro 8 mm.

En pruebas de funcionamiento, se obtuvieron 600 estribos en aproximadamente dos horas de trabajo lo que incrementa la producción en un 400 %, además, con una mejora notable en acabados y formas, que superaron ampliamente a los obtenidos manualmente (Figura 17), también implica que el obrero puede aprovechar alrededor de 6 horas en otra actividad, evitando así la fatiga laboral y disminuyendo costos de operación.



Figura 17. Estribo realizado con máquina y estribo realizado a mano respectivamente

Mediante el análisis RULA se verifica que los índices de esfuerzos bajan de 7 a 3 en los operarios que realizaban el trabajo manual, evitando así una enfermedad ocupacional.

4. Conclusiones

Emprender un proyecto es buscar la solución a un problema que inicia con la necesidad de ingeniar algo nuevo o cambiar algo que ya está definido, el segundo paso es analizar todo lo ya existente dándole un giro de 360 grados. Cuando se da sentido a una idea se la define y limita, de manera que las metas sean cuantitativas y cualitativas y todo proyecto se encamine en una misma línea de acción.

Realizar maquetas y pruebas con elementos reales y a escala es parte de la investigación experimental y se constituye en gran ayuda para despejar dudas que los cálculos y simulaciones nos suelen proponer.

El uso de tablas de cálculo iterativas y nuevos *softwares* facilitan la definición de una forma constructiva así como garantizan el material que se debe utilizar bajo ciertas cargas de trabajo.

Dar solución a problemas prácticos de la vida cotidiana contribuye al desarrollo ingenieril y tecnológico del país, ya que disminuye tiempo que se traduce en dinero y apoya al desarrollo de las actividades productivas.

Referencias

- [1] INEC. Instituto ecuatoriano de estadísticas y censos. [Online]. Available: www.inec.gob.ec
- [2] A. Arequipa. (2014) Manual para propietarios. Aceros Arequipa S. A. [Online]. Available: <http://www.acerosarequipa.com/manual-para-propietarios.html>
- [3] C. D. I. D. Ejército. [Online]. Available: www.cuerpodeingenierosdelejercito.mil.ec
- [4] O. Ergonomics. Osmond Group Limited. [Online]. Available: <http://www.rula.co.uk>
- [5] R. Timoshenko, *Mecánica de Materiales*. México: Pearson Education, 2011.
- [6] R. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*. México: Pearson Education, 2006.
- [7] R. Norton, *Diseño de máquinas*. México: Pearson Education, 2011.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS INDICADORES TÉCNICOS EXPLOTATIVOS EN LAS COSECHADORAS DE CAÑA KTP-2M Y KTP-3000S

COMPARATIVE ANALYSIS OF TECHNICAL INDICATORS OF EXPLOTATIVE IN THE CANE HARVESTERS KTP-2M AND KTP-3000S

Julio C. Pino-Tarragó¹, Roberto F. Beltrán-Reyna^{2,*}, Euro R. Mena-Mena², Joao L. Bárzaga-Quesada², Yoandrys Morales-Tamayo³, José A. Martínez-Grave de Peralta⁴,
Rolando E. Simeón-Monet⁵

Resumen

Los procesos de diseño, fabricación y explotación de la maquinaria agrícola están estrechamente relacionados con el aumento de los niveles de productividad, consumo de combustible y mejoramiento de las cosechas de caña. La presente investigación tiene como objetivo realizar un análisis comparativo de los indicadores técnicos explotativos en las cosechadoras de caña KTP-2M y KTP-3000S. En el análisis se demostró que el desempeño de la cosechadora KTP-3000S es superior a la KTP-2M, alcanzando valores significativos en cuanto a tiempo, eficiencia en el campo, coeficiente de seguridad técnica, materias extrañas durante el corte y valores de producción total, no teniendo este mismo comportamiento con los indicadores de consumo de combustible y valores de las pérdidas en cosecha de todo el período.

Abstract

The processes of design, manufacture and operation of agricultural machinery are closely related to increased levels of productivity, fuel consumption and improving cane crops. This research aims to make a comparative analysis of the exploitative technical indicators cane harvesters KTP-2M and KTP-3000S. In the analysis it was demonstrated that the performance of the KTP-3000S harvester exceeds the KTP 2M, achieving significant values in terms of time, field efficiency, coefficient of technical safety, foreign matter field during cutting and values of total production not having this same behavior with fuel consumption indicators and values of crop losses throughout the period.

¹Carrera de Ingeniería Civil, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Manabí – Ecuador.

^{2,*}Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Latacunga – Ecuador.
Autor para correspondencia ✉: rbeltrnr@espe.edu.ec

³Unidad Académica Ciencia de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA), Universidad Técnica de Cotopaxi, Extensión La Maná – Ecuador.

⁴Facultad de Ingeniería, Universidad de Holguín «Óscar Lucero Moya» Holguín – Cuba.

⁵Centro de estudios CAD – CAM, Universidad de Holguín «Óscar Lucero Moya» Holguín – Cuba.

Recibido: 12-04-2016, aprobado tras revisión: 21-10-2016

Forma sugerida de citación: Pino, J.; Beltrán, R.; Mena, E.; Morales, Y.; Bárzaga, J. y Simeón, R. (2016). «Análisis comparativo de los indicadores técnicos explotativos en las cosechadoras de caña KTP-2M y KTP-3000S». *INGENIUS*. N.º16, (Julio-Diciembre). pp. 12-19. ISSN: 1390-650X.

Por lo que se puede afirmar que la cosechadora cañera KTP-3000S presentó un mejor desempeño durante el cumplimiento de su destino de servicio.

Palabras clave: cosechadoras cañeras; indicadores técnicos explotativos; KTP.

So we can say that the KTP-3000S sugar cane harvester, presented a better performance during the fulfillment of its service destiny.

Keywords: Cane harvesters; Technical indicators exploitative; KTP.

1. Introducción

El hombre, desde el inicio de su historia, ha intentado facilitar su trabajo con la ayuda de máquinas o herramientas.

Debido al crecimiento de las fronteras agrícolas y al incremento en el volumen de producción, se genera la necesidad de aumentar la velocidad de trabajo. Con la aparición de las máquinas agrícolas, se abrió un campo infinito de desarrollo de máquinas para cada función: labranza del suelo, siembra, cosecha, recolección y carga de productos, transporte, etc.

En muchos países, la cosecha de caña todavía se realiza de forma manual, utilizando diversos tipos de herramientas de corte, requiriendo operarios hábiles, pues una cosecha inadecuada causa pérdidas de caña y de azúcar [1], dando un jugo de mala calidad y causando problemas en la planta procesadora para retirar los cuerpos extraños.

La cosecha mecanizada de caña de azúcar representa una gran oportunidad de reducir costos, hace más eficiente la operación de cosecha y garantiza los estándares requeridos por el central azucarero, rentabiliza la operación de transporte y minimiza los impactos negativos al medioambiente, contribuyendo a la productividad de los ingenios.

Una vía para garantizar una producción cañera de gran magnitud es elevar la eficiencia de la maquinaria [2], y su perfeccionamiento a través de modelos y proyectos cada día más fiables. El desarrollo de nuevas máquinas cosechadoras de mayor potencia fue un paso significativo en este sentido.

Como consecuencia de este lógico desarrollo que ha sufrido la industria azucarera, sobre todo en su eslabón de cosecha, se ha continuado el perfeccionamiento de los sistemas de equipos, específicamente en lo referente a las cosechadoras de caña, que, por la complejidad de la labor que realizan, al estar sometidas a altas y variables cargas, así como a un régimen de trabajo en condiciones muy duras, han llevado a estudios de perfeccionamiento, para sustituir las máquinas por otras más eficientes; de ahí, la importancia de definir sus principales índices de calidad y de economía.

Para lograr este objetivo, se hace indispensable realizar investigaciones que incluyan pruebas de laboratorio y de campo, que permitan establecer las características principales (explotativas, ergonómicas y agrotécnicas) y, a través de ellas, valorar si se ha cumplido el objetivo trazado de lograr una máquina superior.

Los estudios integrales de evaluaciones alrededor de las máquinas cosechadoras de caña permiten la corrección de posibles deficiencias de diseño, evitando que se generen errores en la etapa de producción en serie, o que sean adquiridas máquinas que no se adaptan a las condiciones reales del país.

La cosechadora se dedica a la recolección mecanizada de la caña de azúcar tanto verde como quemada, en cualquier forma que esta se encuentre: levantada, encamada, entrelazada, etc.

La cosechadora también se denomina combinada porque la cosecha, la limpieza y el desmenuzamiento han sido integrados en una sola máquina. [3,4]

Estructura general de las cosechadoras

La máquina combinada cosechadora de caña de azúcar está destinada a la recolección de esta gramínea, tanto vertical como encamada, que se cultiva en campos típicos mecanizables [5]. La combinada corta la caña, la secciona en partes y elimina la materia extraña que la acompaña, para luego descargar su parte aprovechable limpia en el medio de transporte que marcha junto a la cosechadora. [6]

1.1. Partes principales que conforman la máquina

- Estructura portante.
- Sección receptora con el mecanismo de corte inferior.
- Sección troceadora y separadora (transportadores y ventiladores).
- Mecanismo cortacogollos (opcional).
- Fuente energética y tren de rodadura.
- Accionamientos (hidráulicos y mecánicos).
- Cabina del operador con los mandos de accionamiento y los instrumentos de control.

El incremento del nivel técnico y la efectividad económica de las máquinas depende sustancialmente de la rigurosidad de los experimentos que se realicen [7]. A través de ellos, se obtiene la información experimental necesaria para comprobar las soluciones técnicas, tanto por métodos de cálculo (modelos matemáticos) como en bancos de pruebas aceleradas [8], de modo que, con los resultados aportados, podemos tomar decisiones técnicamente correctas.

Para perfeccionar el diseño de las máquinas, los elementos que la conforman deben cumplir en la práctica las exigencias propuestas en la tarea técnica en cuanto a la obtención de los mejores índices de calidad y económicos. [1]

La valoración sobre los índices de calidad, económicos y ergonómicos de las cosechadoras, aunque se realizan primeramente mediante métodos teóricos, no son de mucha fiabilidad [9], a pesar de contar con información previa. La práctica ha demostrado que la valoración más efectiva de estos índices, durante la etapa de desarrollo de la máquina, se consigue con

el empleo de métodos experimentales de cálculo. De ahí que, para obtener información experimental, sea necesario realizar varios tipos de evaluaciones en condiciones reales de explotación.

De forma general se pueden encontrar como principales problemas [10], que afectan significativamente la realización exitosa de las pruebas de las cosechadoras, [7]:

1. Ausencia de la tarea técnica según lo establecido en la norma cubana al respecto, donde participen de manera activa el cliente y las entidades encargadas del diseño y construcción de los nuevos prototipos.
2. Falta de definición de los índices de calidad y económicos específicos de las cosechadoras cañeras y las diferentes etapas donde deberán ser evaluados los mismos.
3. No hay un sistema integrador de pruebas, donde de manera científica se plantee la secuencia a seguir en las mismas.
4. En la etapa de discusión de las diferentes proposiciones técnicas, no se tiene establecido qué índices de calidad y económicos permiten una discusión objetiva de la mejor variante técnica.
5. Existen problemas organizativos que atentan contra la búsqueda de soluciones a partir de los resultados obtenidos en las pruebas, así como en la veracidad de los resultados de algunas de ellas.
6. Aún no existe una aceptación por parte de la entidad fabricante sobre la necesidad de la aplicación de métodos científicos durante el diseño y desarrollo del nuevo equipo, utilizándose actualmente en lo fundamental el método de prueba-error.
7. No está claro cuáles son las etapas en que deben intervenir el diseñador, el cliente y el fabricante en el sistema de pruebas, lo que tiene como consecuencia que se interfiera el normal desarrollo de las mismas.

1.2. Materiales y métodos

En la realización de este trabajo se utilizaron diversos materiales y métodos, los cuales se describen a continuación, comenzando con el material primario en este proceso, que es la caña de azúcar; en la Tabla 1, se muestra las variedades de caña que se cultivan en Cuba, y el porcentaje en área cultivadas.

Tabla 1. Variedades de caña cultivadas en Cuba y porcentaje del área total

Variedades	Área cultivada %
Cuba 120-78 (C 120-78)	43
Cuba 323-68 (C 323-68)	21
Jaronu 60-15 (J 60-5)	12
Cuba 87-51 (C 87-51)	8
Canal Point (C P)	6
Otras	10

La caña de azúcar desarrolla dos tipos de tallos: el subterráneo, denominado rizoma, que es de tipo definido, y el aéreo, que es el que se aprovecha para la extracción de azúcar; este último es de forma cilíndrica y está dividido en nudos y entrenudos, formando de este modo el canuto; sus hábitos de desarrollo son diferentes, pero en general producen tallos de 2 a 3 m de longitud por año, formando tres canutos por mes, con un número aproximado de tallos de 1 a 23 por macolla o cepa, según la variedad [1].

Caracterización general de las cosechadoras (KTP)

El primer modelo de máquina fue desarrollado en cooperación con la antigua URSS, recibiendo el nombre de KTP-1, al igual que el segundo modelo, denominado KTP-2. En 1997, se introduce en la línea de producción el modelo KTP-2M, una cosechadora con mejoras técnicas con respecto a las antecesoras. Los cambios fundamentales se desarrollaron en cuanto a estructura y componentes:

- Motor MERCEDES BENZ OM 442 A potencia 198 kW a 2100 r. p. m.
- Sistema de traslación hidrostático con bomba y motor hidráulico SAUER SUNSTRANDS.
- Sistema hidráulico, con bombas y motores DANFOSS para accionar cilindros sinfines y transportador de descarga.
- Sección receptora, que consta de dos discos con 6 cuchillas cada una que cortan la caña y la dirigen a los 6 tambores alimentadores que las conducen al picador.
- Conjunto picador, formado por dos tambores con cuchillas a ambos lados que cortan la caña en trozos de 30-40 cm.
- Sistema de limpieza por soplado mediante la actuación de dos ventiladores.
- Cabina opcional con aire acondicionado.

- Cortacogollos (opcional), compuesto por dos tambores giratorios, disco de corte y cilindro hidráulico para la regulación de la altura de corte.
- Capacidad de corte de 35 t/ha.

Después de los estudios realizados surge una cosechadora con mayor eficiencia en cuanto a fiabilidad técnica, tecnológica y capacidad de corte, el prototipo de la KTP-3S, que se continuó perfeccionando para dar lugar al modelo KTP-3000S, que se prueba como prototipo.

Esta cosechadora consta de:

- Motor MERCEDES BENZ o SCANIA de 224 kW a 2100 r. p. m.
- Sistema hidráulico en un 80 % de los mecanismos, con hidráulica DANFOSS o COMMERCIAL.
- Sección receptora, con modificaciones en cuanto a estructura y fiabilidad de sus elementos.
- Conjunto picador, con dos tambores y tres pares de aletas a 120º con cuchillas que cortan la caña en trozos comprendidos entre 25 y 30 cm.
- Sistema de limpieza por soplado de ventiladores accionados, el primero por un motor hidráulico que, a su vez, acciona el segundo mediante transmisión por correas.
- Cabina climatizada con excelente confort, además de señalización interior (lumínica y sonora) para detectar cualquier interrupción o avería en sus órganos de trabajo.
- Cortacogollos, con opción del tipo convencional o desfibrador.
- Capacidad de corte de 45 t/ha.

Caracterización agrícola de los campos

En la Tabla 2, se exponen las características agrícolas principales de las variedades cosechadas durante las pruebas.

Tabla 2. Características agrícolas de los campos

Caracterización de los campos según la variedad de caña					
Indicadores	U	J-60-5	C-120-78	C-323-68	Promedio
Cantidad de cañas acostadas	%	55,8	22,8	51,9	30,1
Cantidad de cañas por metro	U	17,5	13,13	18,5	14,11
Peso de las cañas	kg	134	878	117	376,3
Caña limpia	%	73,2	60,8	70	62,9
Materia extraña	%	26,8	39,6	30	37,1

2. Resultados y discusión

Los rendimientos agrícolas o producción de los campos fueron bajos en forma general, aunque se cosecharon campos de más de 68 t/ha. Los campos no se encontraban en condiciones agrotécnicas idóneas, lo que provocó interrupciones en las máquinas y dificultó el cumplimiento del proceso tecnológico.

Indicadores productivos

1. Producción

Las máquinas permanecieron cosechando bajo cronometraje durante 20 días; los resultados alcanzados se muestran a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados productivos alcanzados

Indicador	Unidades	KTP-2M	KTP-3000S
Tiempo de observación	Días	20	20
Producción total	t	3096,6	4641,3
Producción promedio	Mg/días	153,5	232,1

La KTP-3000S durante el desarrollo de las pruebas de campo alcanzó mayor volumen de cosecha, con una producción de 4641,3 t, durante el período cronometrado, con un promedio diario 232,1 t de caña. La KTP-2M (patrón) solo logró cosechar 3069,6 t bajo cronometraje, promediando 153,5 t/día.

Indicadores de calidad

1. Pérdidas en cosecha

Las muestras para determinar las pérdidas durante la cosecha se tomaron antes de que los recogedores realicen su labor. En la Tabla 4 se muestran los valores porcentuales de las pérdidas en cosecha de todo el período.

Tabla 4. Valores de las pérdidas en cosecha de todo el período

Pérdidas de caña durante la cosecha					
Indicador	Unidad	KTP-2M	KTP-3000S		
Pérdidas totales	%	Plan	Real	Plan	Real
		5-7	6,6	4-5	8,4
Desglose					
Pérdidas por corte alto	%	20,1		12,78	
Pérdidas por caña en el cogollo	%	***		4,52	
Pérdidas en caña larga	%	34,83		33,24	
Pérdidas por trozos caídos	%	45,07		49,46	

*** La máquina KTP-2M no presentan sistema cortacogollos.

Al analizar estos resultados, se evidencia que la cosechadora KTP-3000S sobrepasa el límite superior del rango asignado a esta máquina, que es de 4 a 5 %. Esta situación guarda una estrecha relación con el funcionamiento y regulación de los ventiladores del sistema neumático de limpieza. Por condiciones de diseño, la regulación de la velocidad de los ventiladores se tiene que efectuar manualmente por el operario, en un rango que varía desde 380 hasta 980 r. p. m.

Probablemente, esta nueva posibilidad de trabajo del ventilador se realizó con el objetivo de lograr una correspondencia favorable entre pérdidas y materias extrañas mediante la aplicación de la velocidad óptima para cada tipo de variedad de caña y rendimiento de los campos. En la práctica se pudo comprobar que, al no existir experiencia en este tipo de regulación, la misma se hace operativamente, sin tener en cuenta las características de la masa vegetal a que se enfrenta la máquina durante su trabajo. Al desglosar las pérdidas que se produjeron en la KTP-3000S, se observa que el 49,46 % de las pérdidas que se produjeron fueron como trozos caídos, producto del flujo de aire, lo que confirma el análisis anterior.

2. Materias extrañas

La calidad del material cosechado se determinó con el muestreo realizado a cada una de las máquinas. En la Tabla 5, se muestran los resultados de esta evaluación.

Tabla 5. Materias extrañas

Materias extrañas en la cosecha					
Indicador	Unidad	KTP-2M		KTP-3000S	
Materia extraña total	%	Plan 12-14	Real 13,08	Plan 8-9	Real 12,58
Desglose					
Caña limpia en el transporte	%	86,92		87,42	
Cogollos y hojas verdes	%	65,49		69,85	
Paja seca	%	34,51		30,15	

Al analizar los resultados se observa que la máquina, objeto de investigación, mantuvo un nivel de 12,58 % de materias extrañas, por lo que no cumplió con lo previsto en la tarea técnica, a pesar de encontrarse dentro del rango permisible. No obstante, aventajó al modelo patrón, que alcanzó un 13,08 %.

Al desglosar los resultados, se observa claramente la contradicción, en la KTP-3000S (con mecanismo cortacogollos), donde el 69,85 % de la materia extraña corresponde a cogollos y hojas verdes, lo que demuestra lo ineficaz de dicho mecanismo; cuando la caña está encamada, la plantación no crece uniformemente y la altura de corte se regula adecuadamente.

Indicadores técnicos y tecnológicos

1. Coeficientes de seguridad tecnológica y técnica

Estos indicadores expresan el grado de confiabilidad tecnológica y técnica de los modelos de máquinas experimentados cuando son sometidos a condiciones reales de trabajo. Los mismos se obtienen dividiendo el tiempo de cosecha (T1) entre la suma de este y el tiempo de fallo tecnológico (T41) o técnico (T42), según corresponda, en la Tabla 6 se muestran estos coeficientes.

Tabla 6. Coeficientes de seguridad

Indicador	KTP-2M		KTP-3000-S	
	Plan	Real	Plan	Real
Coefficiente de seguridad tecnológica	0,85	0,97	0,99	0,97
Coefficiente de seguridad técnica	0,8	0,8	0,95	0,94

El coeficiente de seguridad tecnológica, en la KTP-3000S, a pesar de haber alcanzado buenos resultados (0,97), no llegó a lo previsto en la tarea técnica (0,99); por su parte, la KTP-2M logró el mismo resultado; pero, como se esperaba el 0,85 que se le asignó en el plan de diseño, superó, desde este punto de vista, a la KTP-3000S.

Sin embargo, el coeficiente de seguridad técnica para la KTP-3000S registró los mejores resultados, con 0,94, contra un 0,80 de la KTP-2M; aunque la máquina objeto de investigación no llegó a lo planificado, el resultado obtenido es bueno, lo que demuestra que la introducción de mecanismos hidráulicos en la máquina reduce la pérdida de tiempo por concepto de eliminación de fallos técnicos. La máquina patrón cumplió con lo establecido en la tarea técnica, por lo que los resultados fueron buenos.

Consumo de combustible

Los resultados del consumo de combustible promedio en todo el período de prueba se relacionan en la Tabla 7.

Tabla 7. Consumo de combustible

Consumo de combustible				
Unidad	KTP-2M		KTP-3000S	
	Plan	Real	Plan	Real
l/t	1,4	1,2	1,4	1,6

Como se observa, la KTP-3000S tuvo un exceso de consumo respecto a lo establecido por los fabricantes en la tarea técnica; sin embargo, este valor se encuentra dentro del rango de consumo para el motor

MB - 404 de 220 kW. La máquina patrón está por debajo de lo indicado por en el proyecto.

Eficiencia de campo de las máquinas

La eficiencia de campo es un indicador porcentual que refleja la utilización de la cosechadora; expresa el porcentaje de tiempo en que la máquina realiza su tarea fundamental dentro del período de explotación (tiempo explotativo). En la Tabla 8, se expresa el comportamiento general de este indicador.

Tabla 8. Eficiencia de campo

Eficiencia de campo		
Unidad	KTP-2M	KTP-3000S
%	48,45	67,67

Al analizar esta tabla, se observa que la cosechadora más eficiente en el campo fue la KTP-3000 S, con más del 50 % de tiempo de explotación dedicado al proceso de cosecha.

Comportamiento de los tiempos

El análisis de los tiempos durante el trabajo de las cosechadoras proporciona una visión sobre la labor en el campo de las máquinas y su aprovechamiento, lo que permite definir donde se encuentran las principales causas que dificultan el trabajo eficiente de las cosechadoras.

La representación de estos tiempos se muestra en la Tabla 9, mientras que en la Tabla 10 se desglosan las pérdidas de tiempo que son causadas por la máquina y las no imputables a esta.

Tabla 9. Tiempos por máquinas

Indicadores	Indicadores			
	KTP-2M		KTP-3000S	
Tiempo	hora	%	hora	%
Limpio	96,353	37,7	136,7	52,6
Auxiliar	18,64	7,3	26,8	10,3
Operaciones tecnológicas	15,54	6,1	14,43	5,6
Eliminación de fallos	53,315	20,8	14,7	5,7
Necesidades personales	5,234	2	1,32	0,5
Traslados	9,801	3,8	8,04	3,1
Causas ajenas a la explotación	56,91	22,3	57,67	22,2
Tiempo general de la observación	255,8	100	259,69	100

Tabla 10. Pérdidas de tiempo

Indicadores	Indicadores	
	KTP-2M	KTP-3000S
Tiempos	%	%
Pérdida de tiempo imputable a las máquinas		
Fallos tecnológicos	5,4	30,1
Fallos técnicos	41,8	58,9
Búsqueda y solución de los fallos	46,6	8,9
Traslados a causa de los fallos	6,2	2,1
Pérdida de tiempo no imputable a las máquinas		
Mantenimiento técnico diario	18,4	17,6
Regulación de los órganos de trabajo	0,2	0,2
Necesidades personales	6,3	1,6
Traslados, excepto los causados por fallos	7,4	9,5
Falta de transporte	25,8	19,4
Otras causas ajenas al proceso explotativo	41,9	51,7

Análisis del comportamiento de los tiempos por máquinas

Modelo KTP-2M

Esta máquina estuvo el 37,7 % del tiempo total de la jornada cosechando. Comparándola con la KTP-3000S, la 2M trabajó menos tiempo limpio y presentó mayor pérdida de tiempo por fallos técnicos y tecnológicos, con 53 horas y 18 minutos de interrupciones. Además, en el tiempo perdido por causas ajenas a la explotación de la máquina con relación al tiempo total, el valor fue del 22,3 % (56 horas con 18 minutos); solo por falta de transporte, se perdieron 21 horas y 40 minutos (8,5 %); el resto correspondió a la falta de piezas de repuesto y falta de combustible.

Considerando el valor de la productividad horaria (T1) de esta máquina en el período bajo cronometraje, puede estimarse que, por falta de transporte, la máquina dejó de cosechar 698,6 t.

Modelo KTP-3000S

Al comparar el trabajo de esta máquina con la KTP-2M, se puede afirmar que estuvo realizando su actividad por un mayor tiempo (136 horas con 42 minutos), correspondiendo al 52,6 %. Esta máquina se observó durante más tiempo, aunque la diferencia no resulta significativa (3 horas con 53 minutos); esto se debió a la acumulación de tiempo en los cierres del cronometraje, sin embargo, estuvo sometida al mismo rigor que la máquina patrón, por lo tanto, esta máquina gana tiempo al presentar menos fallos y tener un operador que hacía un uso racional de su tiempo.

- Las principales causas de las pérdidas de tiempo en ambos modelos fueron las siguientes:

- Fallos en la llegada a tiempo del transporte de tiro.
- Fallos en el suministro de combustible.
- Malas condiciones agrotécnicas de los campos (obstáculos y mala preparación de los campos).

3. Conclusiones

Los resultados muestran que existen grandes deficiencias en la forma de realizar las evaluaciones a las máquinas cosechadoras de caña y que el desempeño de la cosechadora KTP-3000S es superior a la KTP-2M, alcanzando valores significativos en cuanto a tiempo, eficiencia en el campo, coeficiente de seguridad técnica, materias extrañas durante el corte y valores de producción total, no teniendo este mismo comportamiento con los indicadores de consumo de combustible y valores de las pérdidas en cosecha de todo el período. Por lo que se puede afirmar que la KTP-3000S, presenta mejor cumplimiento de su destino de servicio.

Referencias

- [1] M. Zaldívar and H. Pupo, "Determinación de los índices técnico-explotativos y de productividad de la cosechadora de caña KTP-2 en el CAI Fernando de Dios," *Revista Construcción de Maquinaria*, Las Villas, Cuba, Mayo-Agosto 2006.
- [2] F. Lebeque and R. Guethón, "Programa y metodología para la realización de las pruebas a los segmentos de corte inferior instalados en las cosechadoras cañeras KTM-2M," Holguín, CEDEMA, 2013.
- [3] —, "Metodología para la determinación de los parámetros cinemáticos de las cosechadoras cañeras KTP-3S," Holguín, CEDEMA, 2010.
- [4] F. Lebeque, "Programa y metodología para la realización de las evaluaciones agrotécnicas a las cosechadoras cañeras KTP-3," CEDEMA, 2011.
- [5] F. Lebeque and R. Guethón, "Programa y metodología para la realización de las pruebas a los elementos de corte," Holguín, CEDEMA, 2015.
- [6] M. Zaldívar, "Cuestiones referentes a la necesidad real en la nomenclatura de piezas de repuestos para las cosechadoras de caña KTP," *Rostov del Don. Moscú*, Serie monotemática. 2007.
- [7] H. Pupo, "Necesidad de la evaluación a las máquinas agrícolas," *Revista Construcción de Maquinaria*, Las Villas, Cuba, 2004.
- [8] F. Lebeque, "Programa y metodología para la realización de las pruebas al cortacogollo instalado en las cosechadoras cañeras KTP-2M," Holguín, CEDEMA, 1996.
- [9] A. E. A. Batista, "Valoración del diseño de la cosechadora cañera KTP-3000S," Primera Reunión Nacional de Mejoramiento de Diseño Mecánico, ACIM, La Habana, UNAIC, 2005.
- [10] F. Lebeque and J. Pino, "Las evaluaciones a las cosechadoras cañeras," *Revista Mecanización y Desarrollo Cuba*, pp. 34–38, 2014.

APROVECHAMIENTO DEL RECURSO BIOMASA A PARTIR DE LOS DESECHOS DE MADERA PARA UNA CALDERA DE VAPOR

EXPLOITATION OF BIOMASS RESOURCES IN THE FORM OF WOOD WASTE FOR STEAM BOILER

Juan Sebastián Arroyo-Vinueza^{1,*}, Washington Salvatore Reina-Guzmán²

Resumen

Este artículo describe el potencial energético de la biomasa residual que proviene de la madera al ser utilizado en una caldera de vapor como combustible sustitutivo; esto con el fin de proporcionar una alternativa de energía limpia diferente a la actual dependencia del petróleo usado en estos dispositivos. Además, la información detalla la industria que proporciona los desechos de madera y sus diferentes formas de presentación, sus propiedades físicas y energéticas; tales como el poder calorífico, valor de acuerdo con el contenido de humedad de cada muestra de biomasa, y la equivalencia de peso de los combustibles fósiles utilizados actualmente por las calderas de vapor. Finalmente, basados en los resultados obtenidos, se realiza el análisis termodinámico que se produce en la caldera con el uso de biomasa residual, dando a conocer su balance energético, exergético y el cálculo de la entropía; lo que proporciona datos de referencia para utilizar la biomasa como una alternativa válida al uso de nuevas fuentes de energía renovables, como la biomasa residual.

Palabras clave: biomasa, caldera de vapor, combustible fósil, contaminación, madera.

Abstract

This article describes the energy potential of residual biomass from wood to be used in a steam boiler as substitute fuel; resulting in a clean energy alternative against dependence on oil use in these devices. Further, information details the industry that provides wood waste, its varying forms of presentation, their physical and energetic properties; such as: the calorific value according to the moisture content and weight equivalence of each biomass sample to replace the fossil fuels currently used by steam boilers. Finally, based on the results obtained, a thermodynamic analysis is performed on the occurrences in the boiler when used with residual biomass, giving us answers to its energy balance, exergy balance and entropy calculation; thus providing reference data to the use of residual biomass as a valid alternative in new sources of renewable energy.

Keywords: Biomass, wood, pollution, fossil fuel, steam boiler.

^{1,*}Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: jsav187@hotmail.com

²Docente de la carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador.

Recibido: 26-05-2016, aprobado tras revisión: 06-10-2016

Forma sugerida de citación: Arroyo, J. y Reina, W. (2016). «Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor». INGENIUS. N.º 16, (Julio-Diciembre). pp. 20-29. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

Desde el auge del petróleo y la consecuente quema de combustibles fósiles, las emisiones de gases que provocan el efecto invernadero han aumentado. Teniendo en cuenta este punto de vista, el uso de energía renovable es necesario; por ejemplo, podemos aprovechar el potencial de la energía térmica de la biomasa residual utilizando equipos tales como una caldera de vapor, que son de gran demanda en muchos procesos dentro de la industria.

Para la puesta en marcha de una caldera de vapor se utiliza regularmente como fuente de energía combustibles fósiles que contribuyen significativamente a la contaminación ambiental. Una alternativa a este proceso es utilizar biomasa residual como combustible para la caldera de vapor, pero garantizando que las condiciones de funcionamiento sean similares a las de equipos convencionales. [1]

La biomasa en nuestro medio representa una alternativa viable para el uso energético en calderas de vapor, esta aseveración se realiza considerando que existen entidades que llevan a cabo investigaciones sobre este recurso, tal es el caso de la Corporación para la Investigación Energética (CIE) y el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER); un ejemplo de lo antes expuesto es el proyecto denominado *El aprovechamiento energético de biomasa residual del piñón* [2], que pretende utilizar este tipo de biomasa en la producción de biodiésel, para de esta manera suprimir paulatinamente el uso de derivados de petróleo en la Región Insular de nuestro país. En la misma línea de investigación la CIE ha realizado un inventario en la provincia de Pichincha de la biomasa proveniente de fuente agrícolas y animales [3], demostrando el potencial energético que posee este recurso.

Este artículo pretende entregar datos e información de la importancia de los desechos de madera, como un recurso renovable para ser utilizado como combustible en una caldera de vapor considerando las propiedades energéticas que posee.

1.1. Biomasa residual

La transformación de energía a partir de la biomasa representa un rendimiento idóneo neto de energía al año, y al mismo tiempo un crecimiento gradual promoviendo como un recurso sustitutivo para la generación.

No obstante, en términos de almacenamiento y transporte, la biomasa con una humedad al 50 % presenta una desventaja en comparación con los combustibles derivados del petróleo; la madera presenta una baja densidad 8 GJ/t. [4]

Tabla 1. Comparison of biomass and fossil fuel energy densities [4]

Biomass (wood, 50 % moisture)	8 GJ/t
Liquefied natural gas	56 GJ/t
Mineral oil	42 GJ/t
Coal	28 GJ/t

1.2. Tipos de madera trabajada

Una de las principales especies que son utilizadas en las industrias, de acuerdo con el catastro facilitado por la Dirección Nacional Forestal (DNF) son eucalipto (*Eucalyptus globulus*), pino (*Pinus radiata*) y laurel (*Cordia alliodora*).

Tabla 2. Especies más comerciales utilizadas en la industria maderera [1]

Nombre científico	Volumen movilizado (m ³)
Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	87123,82
Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	63552,96
Pino (<i>Pinus radiata</i>)	76069,22

1.2.1. Usos y procesos de la madera

En la provincia de Pichincha existen empresas que fabrican productos a base de biomasa, citando los más solicitados: tableros MDF, tríples y aglomerados.

La elaboración de estos productos, que son los de mayor demanda, es a base de biomasa previamente tratada y combinada con aditivos. El tratamiento que recibe la madera una vez cortada y convertida en astillas, aserrín o virutas (Figura 1), depende de la finalidad; debe ser secada y en algunos casos lavada para eliminar hongos e impurezas, asegurando la calidad de la materia prima y el producto final. [1].



Figura 1. Formas de Biomasa: a) aserrín, b) virutas y c) astillas

1.3. Destino de los desechos madereros, biomasa

Los residuos obtenidos, derivan principalmente del volumen de madera trabajada, es así, que la producción puede ser estimada según la siguiente tabla. [1]

Tabla 3. Consumo de madera por trozas de plantaciones forestales por tipo de industria y especie en Ecuador [5]

Tipo de industria	Consumo (1000 m ³)	Participación (%)	Especie principal
Aserradero	420	39,6	pino
Tableros reconstruidos			
Aglomerados	188	17,7	pino
MDF	139	13,1	pino
Astilladora	288	27,2	eucalipto
Otros	25	2,4	eucalipto
Total	1060	100	-

Cabe señalar, que el Ministerio del Ambiente a través de su Dirección Nacional Forestal regula la procedencia legal del producto forestal existente en los centros de destino final, como son los aserraderos, más no la utilización de los residuos como tal. [1]

1.4. Almacenamiento y transporte

La biomasa al ser un residuo, la mayoría de aserraderos tienen apilado a la intemperie, es decir, no hay un adecuado control ni manejo, no obstante, entidades como Aserradero San Alfonso, poseen un sistema centralizado de recolección mediante tubos de aspiración (Figura 2). La funcionalidad de esta técnica es de recolectar en el momento que se procesa las trozas de madera y posterior ser despachada mediante gravedad en camiones u otro medio de transporte de carga.

**Figura 2.** Recipiente vertical tipo tanque de 9 m³ para la recolección centralizada de aserrín mediante aspiración [1]

Otros aserraderos realizan la recolección de manera manual-artesanal: acumulan los residuos con una herramienta para luego entregarlos a gestores ambientales o intermediarios. De la misma manera, no existe un dato exacto de cuál es el promedio de emisión de desechos madereros, en peso o volumen, debido a que el comercio se lo realiza de un modo informal.

2. Materiales y métodos

2.1. Toma de muestras de biomasa

Las muestras de biomasa se tomaron en campo, en el Aserradero San Alfonso de la parroquia de Tumbaco,

a 20 km al nororiente de Quito. Se recogieron 300 g de desechos de madera; siendo las más comerciales: pino, laurel y eucalipto.

Adicionalmente, se agregó una especie más de gran demanda como es el colorado, que también es usada en aserraderos, pero su cultivo se lleva a cabo en la zona oriental del país.

Tabla 4. Condiciones ambientales, para toma de muestras

Humedad relativa	25 %
Temperatura	22 °C
Altitud	2387
Ubicación	La Morita, Tumbaco

Muestra 1: Pino (*Pinus radiata*) Muestra 2: Eucalipto (*Eucalyptus globulus*) Muestra 3: Colorado (*Guarea kunthiana*) Muestra 4: Laurel (*Cordia alliodora*)

2.2. Propiedades fisicoquímicas y energéticas

2.2.1. Contenido de humedad

La humedad representa una variable muy importante en la biomasa, pues está relacionada con el contenido de agua que posee una muestra en función de su peso. El poder calorífico que contiene este recurso es dependiente del porcentaje de humedad, en términos energéticos. Para ser determinada, se toma en cuenta en base seca o en base húmeda, siendo así CH_x la humedad en base húmeda y CH_u la humedad en base seca; las fórmulas para su cálculo son:

$$CH_u(\%) = \frac{Ph - Po}{Po} \quad (1)$$

$$CH_x(\%) = \frac{Ph - Po}{Ph} \quad (2)$$

Donde CH(%) es el tanto por ciento de humedad, Ph es el peso húmedo de la muestra y Po representa el peso de la muestra después de ser secado en la estufa. [6]

El porcentaje de humedad que contiene la biomasa residual, de las cuatro muestras de madera, es un factor indispensable para el aprovechamiento energético (Figura 3). De igual manera, el contenido de humedad inferior al 50 %, por muestra, se toma como referencia en base seca; por lo tanto, los resultados obtenidos son idóneos para su uso energético.

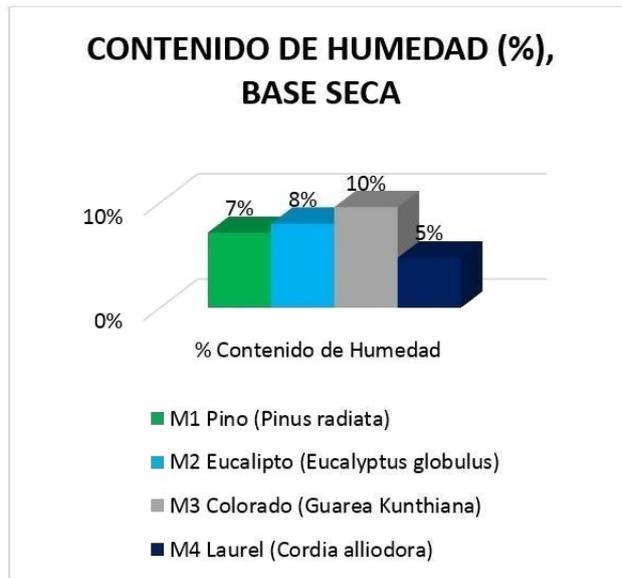


Figura 3. Porcentaje de humedad obtenidos por muestra [1]

2.2.2. Densidad aparente

Esta propiedad física que poseen los biocombustibles sólidos también es dependiente del contenido de humedad [7], cuanto menos contenido de agua menor es su densidad, pero se incrementa su poder calorífico y densidad energética.

Tabla 5. Condiciones ambientales, para toma de muestras

Muestra / Especie	Densidad aparente g/ml
Muestra 1: Pino (<i>Pinus patula</i>)	0,048
Muestra 2: Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	0,102
Muestra 3: Colorado (<i>Guarea kunthiana</i>)	0,161
Muestra 4: Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	0,66

Para aumentar la densidad aparente existen procesos mecánicos como la elaboración de pellets, compresión de aserrín mezclado con aditivos químicos, elevando el rendimiento de la caldera puesto que habría una mejor combustión y menos contenido de cenizas; aunque se incrementaría costos en su fabricación.

2.2.3. Composición elemental de la madera

La madera en sus diferentes especies posee una composición idéntica, al igual que en sus distintas partes como son tronco y ramas de un mismo árbol (Figura 4), [8].

A diferencia de los combustibles fósiles que contienen una gran proporción de carbono 84-86 % [1], la biomasa proveniente de la madera lleva ventaja. Adicionalmente, la biomasa al ser combustionada, los gases resultantes CO y CO₂ son captados nuevamente

por las plantas por medio de su proceso natural fotosíntesis.

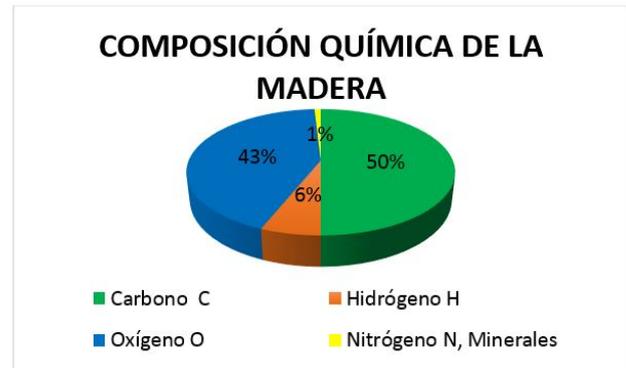


Figura 4. Composición química de la madera [8]

2.2.4. Contenido de cenizas

Para especies como el pino y el eucalipto se tiene un porcentaje de cenizas inferior al 0,5 %, lo cual refleja que al combustionar estas maderas poseen menos materia sólida no combustionada.

Tabla 6. Contenido de cenizas por muestra [1]

Muestra / Especie	% de muestra /especie cenizas
Muestra 1: Pino (<i>Pinus patula</i>)	0,3169
Muestra 2: Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	0,3724
Muestra 3: Colorado (<i>Guarea kunthiana</i>)	1,2061
Muestra 4: Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	1,5375

Las cenizas, producto de la combustión de la madera, por su alto contenido de carbonato de potasio o potasa, son usadas como fertilizante para cultivos.

2.2.5. Poder calorífico

El poder calorífico se define como la cantidad de energía liberada en forma de calor en un kilogramo, o en un metro cúbico de combustible cuando se quema por completo en un ambiente a presión constante de 101 Kpa y 25 °C, en condiciones normales. En otros términos, el poder calorífico es el valor absoluto de la entalpía.

$$Poder\ calorífico = |h_e| [kJ/kg](combustible)$$

Poder calorífico superior PCS o HHV por sus siglas en inglés, es aquel desprendido al final de la combustión, cuando el agua del producto se encuentra en forma líquida.

Poder calorífico inferior PCI o LHV por sus siglas en inglés, cuando el H₂O en los productos está en forma de vapor.

Para determinar el contenido calorífico superior o bruto se empleó un calorímetro adiabático. Bajo la norma ASTM D-240 que recomienda el fabricante se ejecuta este ensayo por cada muestra de biomasa.

Tabla 7. Poder calorífico superior e inferior [1]

Muestra / Especie	Poder calorífico superior MJ/kg	Poder calorífico inferior MJ/kg
Muestra 1: Pino (<i>Pinus patula</i>)	17,7807	14,7597
Muestra 2: Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	17,6244	14,5028
Muestra 3: Colorado (<i>Guarea kunthiana</i>)	18,627	14,9973
Muestra 4: Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	18,913	16,2133

Es de gran importancia acotar que en todos los procesos técnicos industriales [8] son de interés solo el poder calorífico inferior PCI, esto debido a que el calor de la condensación del vapor de agua que contienen los gases resultantes de la combustión no resulta utilizable.

$$PCI = \frac{PCS - 600(u + 9h)}{1 + u} \quad (3)$$

Donde, *PCS* es el poder calorífico superior obtenido mediante el uso de un calorímetro adiabático, 600 es el calor de vaporización a 0 °C [kcal/kg], *u* representa la humedad del combustible (referida al peso seco), 9 kilos de agua que se forman al oxidar un kilo de hidrógeno y *h* la proporción de hidrógeno 6,1 %.

Esta ecuación nos permite obtener el grado calorífico neto de una sustancia sólida conociendo su humedad en base seca y su poder calorífico superior o bruto (Figura 5) que se obtiene en laboratorio mediante un calorímetro como se detalla en la Tabla 7.

Hay que tomar mucha atención en los porcentajes de humedad, pues de este resultado depende el grado calorífico que se puede aprovechar. Procesos a gran escala como el secado, previo a la combustión en la caldera u otro dispositivo, son de vital importancia; es ahí donde desempeña un papel importante la humedad de la biomasa.

A mayor humedad se obtiene menos grado calorífico (Figura 6), por lo que es importante conocer el origen y la manipulación que se ha dado a la biomasa residual.

2.3. Datos técnicos de la caldera

El generador de vapor a analizar es utilizado en la microindustria alimenticia. La caldera seleccionada es pirotubular marca Distral, de fabricación colombiana [9].

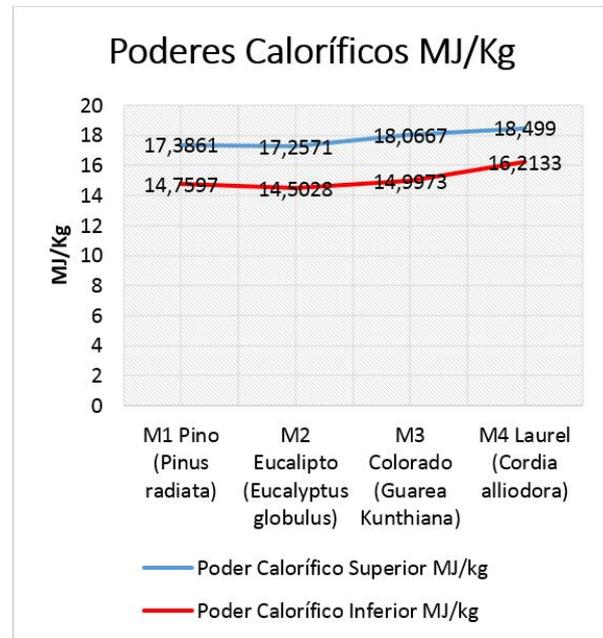


Figura 5. Comparación de poderes caloríficos obtenidos [1]

Se seleccionó este caldero debido a que, para el análisis, se requiere datos experimentales tomados en campo; adicional en el país no existen calderos que funcionan con combustibles de biomasa proveniente de madera.

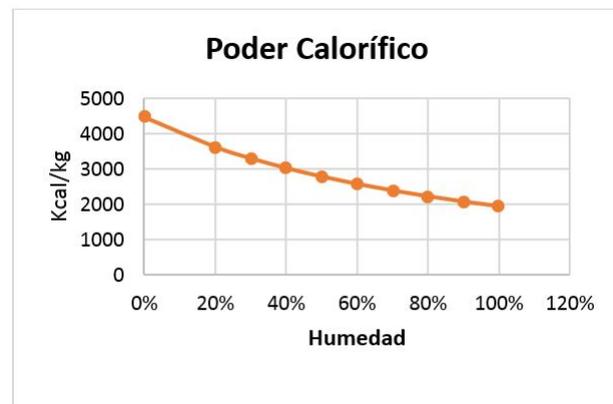


Figura 6. Relación poder calorífico con porcentaje de humedad [1]

Tabla 8. Datos técnicos de la caldera seleccionada [9]

BHP	30 HP
Tiempo de trabajo	8 h/día
Consumo de combustible fósil	5 litros/h
* Consumo de combustible biomasa tipo	12,45 kg/h diésel 2
PCI Diésel 2 kcal/l	8791,38
% retorno condensado	89,1 % aprox.
Presión de trabajo	50 PSI

*Valores inferen de acuerdo con el PCI, ver Tabla 7.

2.4. Flujo de biomasa equivalente por muestra

Tabla 9. Datos técnicos de la caldera seleccionada [9]

Tipo de Biomasa	PCI (kcal/kg)	Equivalencia en flujo de biomasa para caldera (kg/h)
Muestra 1: Pino (<i>Pinus radiata</i>)	3531,02	12,45
Muestra 2: Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	3469,58	12,67
Muestra 3: Colorado (<i>Guarea kunthiana</i>)	3587,87	12,25
Muestra 4: Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	3878,78	11,33

En la Tabla 9 se hace mención de la cantidad de biomasa necesaria para poder suplir al combustible fósil que es usado en esta caldera, previamente conociendo el poder calorífico neto. Así para la especie de biomasa (*Pinus radiata*) se requiere de 12,45 kg/h de este, en reemplazo de los 5 galones de diésel por hora.

2.5. Ecuaciones de gobierno para una caldera de vapor

2.5.1. Balance de energía

El balance energético de un sistema hace referencia a la primera ley de la termodinámica donde determina que la energía se transforma, no se puede destruir ni crear durante un proceso.

$$(E. entrada) - (E. salida) = (E. sistema) \quad (4)$$

$$Q = \Delta E + W \quad (5)$$

Donde, Q es el calor generado por el dispositivo, ΔE la energía del sistema y W es el trabajo realizado. Para obtener el balance térmico energético de una caldera, hay que considerar dos aspectos: la energía proveniente del combustible y las pérdidas generadas durante la oxidación del mismo.

Los generadores de vapor o calderas se consideran sistemas estacionarios puesto que sus energías potencial y cinética son despreciables, por consiguiente, la energía total de un sistema es igual al cambio de su energía interna.

$$Q - W = \Delta U \quad (6)$$

En calderos, dispositivos a volumen constante, no generan trabajo [10]:

$$Q = \Delta U \quad (7)$$

$$\dot{Q} = \dot{m} \times PCI \quad (8)$$

Donde \dot{m} es el flujo de combustible equivalente de biomasa (ver Tabla 9) y PCI corresponde al poder calorífico inferior obtenido de la ecuación (3).

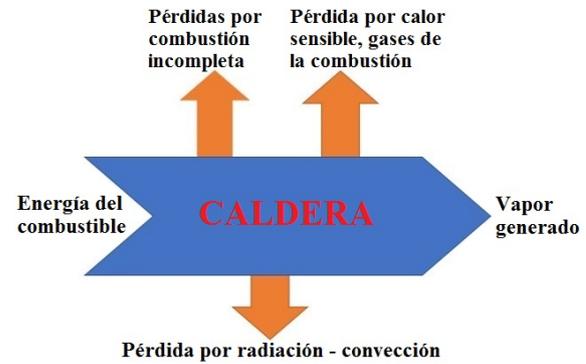


Figura 7. Diagrama de sankey de una caldera [1]

2.5.2. Balance energético caldera

$$\dot{Q}_{entrada} = \dot{Q}_{salida}$$

$$\dot{Q}_{salida} = \dot{Q}_{entrada} - \sum \dot{Q}_{pérdidas}$$

Donde $\dot{Q}_{entrada}$ es la cantidad de calor entrante de combustible, \dot{Q}_{salida} cantidad de calor de salida y $\sum \dot{Q}_{pérdidas}$ referido a la sumatoria, cantidad de calor total perdido.

El porcentaje de pérdidas por el calor sensible de los gases que se suscita en el conjunto horno-caldera: radiación-convección, por purgas existentes, combustión incompleta; considera el 23 % de pérdidas del total de energía entrante de combustible (Figura 7) [11, 12].

$$\sum \dot{Q}_{pérdidas} = 0,23 \times \dot{Q}_{entrada}$$

Tabla 10. Balance energético obtenido por cada muestra [1]

Tipo de muestra	Q entrada kcal/h	Q salida kcal/h	Q pérdidas 0,23 %
Muestra1: Pino (<i>Pinus radiata</i>)	43961,2	33850,124	10111,07
Muestra 2: Eucalipto (<i>Eucalyptus globulus</i>)	43959,57	33848,51	10110,7
Muestra 3: Colorado (<i>Guarea kunthiana</i>)	43951,41	33840,34	10108,24
Muestra 4: Laurel (<i>Cordia alliodora</i>)	43946,57	33835,51	10107,71
Rendimiento %		0,77 → 77 %	

Cabe recalcar que, cuantas menos pérdidas se obtenga la combustión será más completa y por consiguiente el rendimiento aumentará, de ahí la importancia del estudio de eficiencia energética de los dispositivos termodinámicos.

2.5.3. Balance de exergía o disponibilidad

La primera ley de la termodinámica menciona que la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma, por lo tanto, la exergía es la propiedad que determina el potencial de aprovechamiento de dicha energía para producir un trabajo; es decir, el primer principio trata de la cantidad de energía mientras la exergía trata de la calidad de esta energía.

Para dispositivos como calderas, los cuales no generan trabajo, el cálculo de la eficiencia exergética o eficiencia de la segunda ley hace referencia a lograr el objetivo del proceso en relación con los insumos para el proceso en términos de cambio de exergía o transferencias [13]. El balance de exergía parte de la ecuación para un volumen de control:

$$\Psi_2 - \Psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0(S_2 - S_1) + \frac{C_2^2 - C_1^2}{2} + g(z_2 - z_1) \quad (9)$$

Las energías cinética y potencial son despreciables para la caldera:

$$\Psi_2 - \Psi_1 = (h_2 - h_1) - T_0(S_2 - S_1) \quad (10)$$

$$\Psi_2 - \Psi_1 = (2492,45 - 579,56) - 293K(6,3707 - 1,72174)$$

$$\Psi_2 - \Psi_1 = 550,74 \frac{kJ}{kgH_2O}$$

Donde $\Psi_2 - \Psi_1$ es el aumento de exergía del agua por kilogramos de agua, $(h_2 - h_1)$; $(S_2 - S_1)$ es la diferencia de entalpía y entropía respectivamente y T_0 es la temperatura ambiente 20 °C.

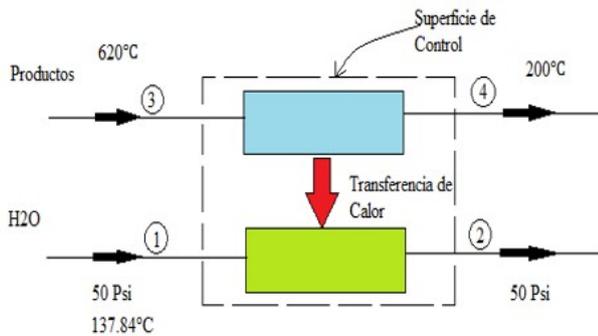


Figura 8. Volumen de control para caldera [13]

Para el volumen de control las ecuaciones que rigen (Figura 8) [13]:

Ecuación de la continuidad:

$$(\dot{m}_1)_{H_2O} = (\dot{m}_2)_{H_2O} \quad (11)$$

$$(\dot{m}_3)_{productos} = (\dot{m}_4)_{productos} \quad (12)$$

De la Primera ley, se obtiene:

$$(\dot{m}_1 h_1)_{H_2O} + (\dot{m}_3 h_3)_{productos} = (\dot{m}_2 h_2)_{H_2O} + (\dot{m}_4 h_4)_{productos} \quad (13)$$

Para la relación de flujo de los productos y el flujo másico de agua, se toma en cuenta las ecuaciones (11), (12) y (13).

$$\frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} = \frac{(h_2 - h_1)_{H_2O}}{(h_3 - h_4)_{productos}} \quad (14)$$

$$\frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} = \frac{2492,45 - 579,56}{1,87(620 - 200)}$$

$$\frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} = 2,435$$

El cambio de entropía para los productos (gas ideal), siendo a presión constante es:

$$(s_4 - s_3)_{productos} = C_p \times \ln \frac{T_e}{T_i} \quad (15)$$

La disminución de exergía de los productos se obtiene de la ecuación (10):

$$\frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} (\Psi_3 - \Psi_4) = \frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} (h_3 - h_4) - T_0(s_4 - s_3) \quad (16)$$

Reemplazando la ecuación (15) en (16), se obtiene:

$$\frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} (\Psi_3 - \Psi_4) = \frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} \left[(h_3 - h_4) - T_0 \left(C_p \times \ln \frac{T_3}{T_4} \right) \right] \quad (17)$$

Sustituyendo valores:

$$\frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} (\Psi_3 - \Psi_4) = 2,435 \left[1,87(620 - 200) - 293 \left(1,87 \ln \frac{893}{473} \right) \right]$$

$$\Psi_3 - \Psi_4 = 1064,60 \frac{kJ}{kg H_2O}$$

La eficiencia exergética o de la segunda ley en función del balance:

$$\eta_{exergético} = \frac{\dot{m}_{H_2O} (\Psi_2 - \Psi_1)}{\dot{m}_{productos} (\Psi_3 - \Psi_4)} \quad (18)$$

$$\eta_{exergético} = \frac{550,74}{1064,60}$$

$$\eta_{exergético} = 0,5173 \rightarrow 51,7\%$$

2.5.4. Entropía

La entropía es una propiedad que no se conserva, por lo tanto, no existe el principio de la conservación de energía. Esta energía se conserva solamente durante un proceso reversible, realizado y se incrementa durante todos los procesos reales. La entropía generada o creada se presenta por la presencia de las irreversibilidades del sistema. La entropía generada durante un proceso se llama generación de entropía y su valor depende del proceso, por lo que no es una propiedad del sistema.

$$\Delta S_{del\ sistema} = s_2 - s_1 \quad (19)$$

$$\Delta S_{productos} = s_4 - s_3 \quad (20)$$

$$\Delta S_{Total} = \Delta S_{productos} + \Delta S_{del\ sistema} \quad (21)$$

Para el cálculo correspondiente se debe conocer los siguientes datos:

$$P_{salida\ vapor} = 50PSI = 344,74KPa$$

$$X_{calidad\ vapor} = 0,89$$

$$^{\circ}T_{H_2O\ entrada\ caldera} = 46,5^{\circ}C$$

$$^{\circ}T_3 = 620^{\circ}C + 273 = 893K$$

$$^{\circ}T_4 = 200^{\circ}C + 273 = 473K$$

Valores obtenidos interpolando [10]:

$$^{\circ}T_{sat} = 137,84^{\circ}C$$

$$s_f = 1,72174 \frac{kJ}{kgK} \quad s_g = 6,9454 \frac{kJ}{kgK}$$

$$s_{fg} = 5,22367 \frac{kJ}{kgK}$$

$$h_f = h_1 = 579,56 \frac{kJ}{kg} \quad h_{fg} = 579,56 \frac{kJ}{kg}$$

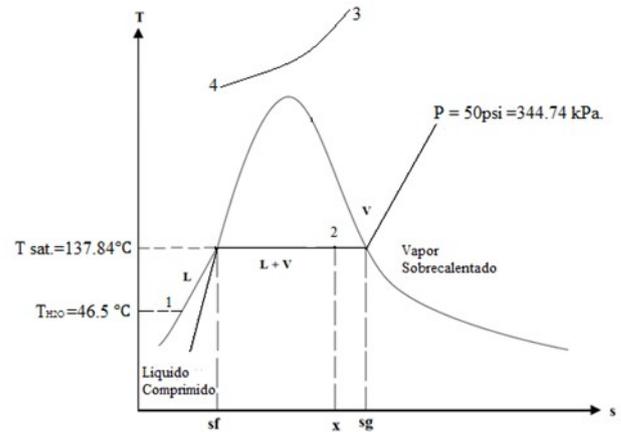


Figura 9. Diagrama temperatura-entropía de caldera piro-tubular [1]

$$\Delta S = S_2 - S_1$$

$$s_1 = s_f = 1,72174 \frac{kJ}{kgK}$$

$$s_2 = s_f + x s_{fg}$$

$$s_2 = 1,72174 + (0,89 \times 5,22367)$$

$$s_2 = 6,3707 \frac{kJ}{kgK}$$

$$\Delta S = (6,3707 - 1,72174)$$

$$\Delta S = 4,6490 \frac{kJ}{kgK}$$

Para el cálculo de la variación de entropía de los productos en la caldera, como referencia, se parte de las ecuaciones (14) y (15), obteniendo el cambio de entropía de los productos:

$$\frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} (s_4 - s_3) = \frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} - C_p \ln \left(\frac{T_e}{T_i} \right) \quad (22)$$

Para el cálculo de la variación de entropía de los productos en la caldera, se sitúa en los puntos 3 y 4 del diagrama T f (s) de la figura 9:

$$\Delta s_{productos} = (S_4 - S_3)_{productos} = C_p \times \ln \left(\frac{T_e}{T_i} \right)$$

$$\frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} (s_4 - s_3) = \frac{\dot{m}_{productos}}{\dot{m}_{H_2O}} - C_p \times \ln \left(\frac{T_e}{T_i} \right)$$

$$(S_4 - S_3)_{productos} = 2,435 \times (-1,87) \ln \left(\frac{893}{473} \right)$$

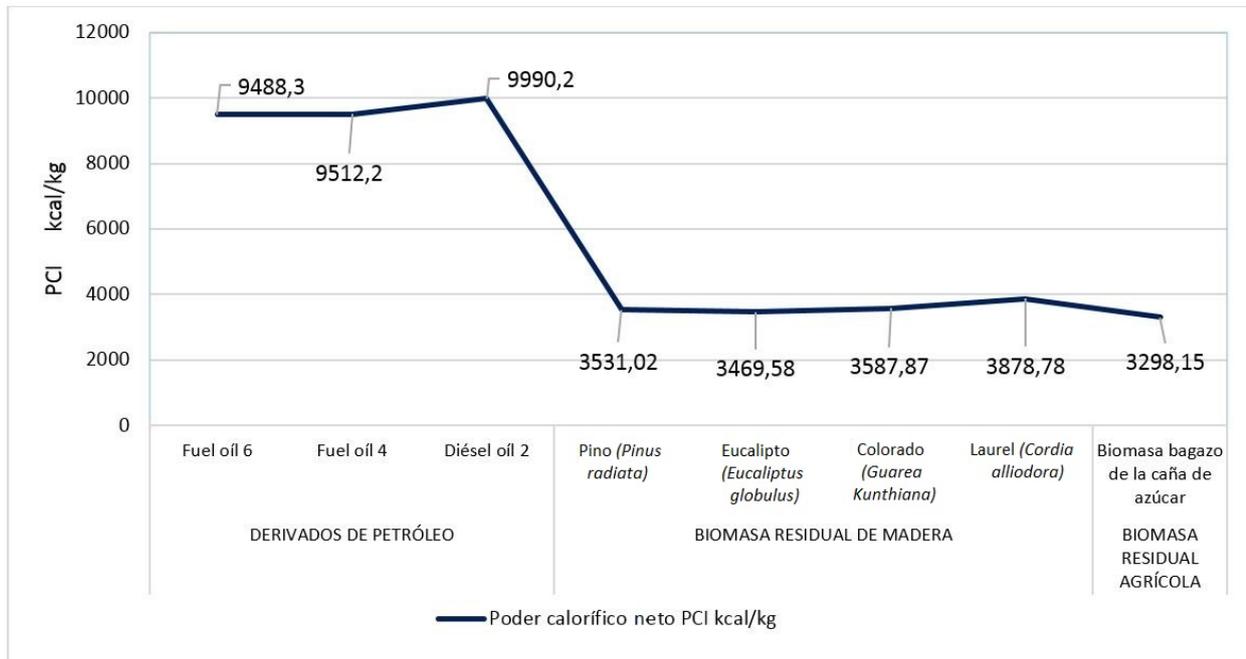


Figura 10. Comparación de poderes caloríficos netos entre combustibles fósiles y biomasa residual

$$(S_4 - S_3)_{\text{productos}} = -2,8937 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta_s \text{ Total} = \Delta_s \text{ productos} + \Delta_s \text{ del sistema}$$

$$\Delta_s \text{ Total} = -2,8937 + 4,6490 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta_s \text{ Total} = 1,7553 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$

$$\Delta_s \text{ Total} > 0 \therefore \text{Proceso irreversible}$$

Se menciona que la entropía de un sistema puede ser negativa, pero la generación total de entropía no, por lo que el resultado obtenido cumple con el enunciado [10].

3. Resultados

El porcentaje de humedad de las muestras seleccionadas oscila entre el 7 y 10 %, al mismo tiempo, el poder calorífico neto obtenido frente a los combustibles derivados del petróleo utilizados en caderas de vapor, llevan una ventaja de 3 a 1 como se muestra en la Figura 10; sin embargo, emiten gases contaminantes por su alto contenido de carbón fósil.

Equipos como la caldera de vapor el porcentaje de pérdidas corresponde al 23 %, donde una parte corresponde a los residuos de cenizas, para especies como el

laurel y colorado son altas entre el 1,2 y 1,5 %; esto puede ser ocasionado por el suministro inadecuado de oxígeno al ocurrir la combustión.

La combustión directa de biomasa es el método más idóneo y económico, debido a que en el diseño no representa muchas complejidades.

4. Conclusiones

La biomasa producida por los desechos de la madera en aserraderos es un potencial idóneo para la producción de energía térmica, aplicada en distintas maneras como, por ejemplo, generadores de vapor, hornos, turbinas, etc.

Los poderes caloríficos de cada tipo de biomasa existente en los aserraderos, depende del almacenamiento que se da, puesto que de ahí deriva la cantidad de energía en función de la humedad. De preferencia la biomasa con un 10 % de humedad es óptima para su aprovechamiento energético.

Es recomendable utilizar biomasa residual de madera con un grado del 10 % en base seca máximo de humedad para dispositivo como la caldera, evitando así la corrosión de las partes constitutivas

La calidad de la energía o exergía medida en la caldera es del 51 %, siendo el 49 % del total de vapor generado un desperdicio, esto debido a las irreversibilidades que ocurre al interior del dispositivo.

Referencias

- [1] J. S. Arroyo, "Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor," Proyecto de Titulación, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2015.
- [2] Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), "Biomasa," Quito, Ecuador, enero, 2013.
- [3] Corporación para la Investigación Energética (CIE), "Inventario de biomasa residual de la cosecha y agroindustria a nivel cantonal y provincial," Quito, Pichincha, Ecuador, 2013.
- [4] P. McKendry, "Energy production from biomass (part 2): conversion technologies," *Bioresource Technology*, pp. 52-53, 2001.
- [5] Ecuador Forestal, "Planificación estratégica, transformación y comercialización de madera en el Ecuador," Quito, 2007.
- [6] FAO. (2004) Terminología unificada de bioenergía. [Online]. Available: <http://www.fao.org/docrep/009/j6439s/j6439s00.htm>. (2004).
- [7] G. San Miguel and F. Gutiérrez, *Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética*. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 2015.
- [8] F. Kollman, "Tecnología de la madera," *Gráficas Reunidas*, pp. 137-262, Múnich, 1951.
- [9] J. Gallardo, "Balance de masa y energía de un caldero marca distal de una microindustria de alimentos," Proyecto de Titulación, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2000.
- [10] Y. Cengel and M. Boles, *Termodinámica*. Mc Graw-Hill, México D.F., 2009.
- [11] M. Echeverría and O. López, "Caracterización energética de la cascarilla de arroz para su aplicación en la generación de energía termoeléctrica," Proyecto de Titulación, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2010.
- [12] A. Aguinaga, "Seminarios industriales de generación de vapor," Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2010.
- [13] G. Van Wylen, "Fundamento de termodinámica," Limusa S. A., México, 2003.

DETECTOR DE BORDES DE IMÁGENES USANDO UN MICROCONTROLADOR ARM

EDGE DETECTION IMAGE USING ARM MICROCONTROLLER

Juan Francisco Ordóñez¹, Luis Oñate^{2,*}

Resumen

En este documento se describe cómo se desarrolló un detector de bordes de imágenes, esta técnica es útil en una variada gama de aplicaciones como metrología, reconocimiento de rostros, detección de patrones debido a que determina la frontera entre dos regiones de características distintas. Con este fin se utilizó la tarjeta de desarrollo STM32FI-DISCO, aunque este microcontrolador no está diseñado para procesamiento digital de imágenes (PDI) como es el caso de los microcontroladores de Texas Instruments, Analog Device, etc., sin embargo, tiene una velocidad de procesamiento elevada y utiliza 32 bits de programa. El detector de bordes utiliza el módulo del microcontrolador ARM de STmicroelectronics añadiéndole una cámara para tomar fotos y se presenta en un *display* de película delgada de transistor (TFT) la imagen donde se aplicó el detector de bordes usando el filtro de Sobel para determinar el movimiento de objetos mediante una diferencia de imágenes. Además, se implementó en MATLAB el filtro detector de bordes y se comparó las imágenes analizadas con el *software* MATLAB y las obtenidas en la tarjeta de desarrollo encontrando su semejanza, siendo las imágenes con mayor similitud: edificios, figuras geométricas y circuitos impresos. Con lo cual se logró aplicar un algoritmo de detección de bordes en este *hardware* a bajo costo.

Palabras clave: ARM, detector de bordes, filtro de Sobel, procesamiento digital de imágenes.

Abstract

In this document is described as an image edge detector was developed, this technique is useful in a wide range of applications such as metrology, face recognition, pattern detection because it determines the border between two regions with different characteristics. the development board STM32FI-DISCO was used, although this microcontroller is not designed for digital image processing (PDI) as microcontrollers Texas Instruments, Analog Device, etc. has a speed high processing and uses 32-bit program. The edge detector module uses the ARM microcontroller STmicroelectronics adding a camera to take pictures and is presented on a *display* thin film transistor (TFT) image where the edge detector was applied using the Sobel filter to determine movement object by a difference images. In addition, the detector implemented in MATLAB filter edges and the images analyzed with the MATLAB *software* and obtained the development board finding its likeness, being the images with a high degree of similarity buildings, geometric figures and printed circuits compared. Thus it was possible to apply an edge detection algorithm on this *hardware* at low cost.

Keywords: ARM, edge detection, digital image processing, Sobel Filter.

¹Graduado de la carrera Ingeniería Electrónica sede Quito, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador.

^{2,*}Docente de la carrera Ingeniería Electrónica sede Quito, Universidad Politécnica Salesiana – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: lonate@ups.edu.ec

Recibido: 02-08-2016, aprobado tras revisión: 05-10-2016

Forma sugerida de citación: Oñate, L. y Ordóñez, J. (2016). «Detector de bordes de imágenes usando un microcontrolador arm». INGENIUS. N.º 16, (Julio-Diciembre). pp. 30-35. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

Este artículo es un primer intento de poner en funcionamiento detectores de bordes de imágenes en una tarjeta de desarrollo basada en el microcontrolador STM32, existen desarrollos basados en sistemas FPGA de Altera [1], FPGA de Xilinx [2] y utilizando el microcontrolador de Microchip el dspic33f [3].

En cualquier desarrollo de procesamiento digital de imágenes uno de los principales problemas es la cantidad de memoria, que debe tener el microcontrolador y la cantidad de cálculos que deben realizar [4] los microcontroladores ARM y en especial el STM32, tiene altas capacidades de memoria, y un módulo FPU (unidad de punto flotante) [5].

Entre las principales aplicaciones de los detectores de bordes se encuentran la identificación de tumores cerebrales, mediante el análisis de una fotografía MRI (Imagen de resonancia magnética) [6]. En detección de movimiento en videos de vigilancia, un objeto en movimiento siempre se mostrara cambios y si un objeto permanece estático sus bordes no variaran [7]. Reconocimiento de objetos en una imagen o video separando en partes la imagen y buscando ciertas características particulares como son los rostros de personas, o las formas de un objeto [8]. Aplicaciones en geología donde se puede diferenciar las líneas de las fallas geológicas de las líneas de los ríos subterráneos [9]. Sistemas biométricos para detección de los contornos del iris del ojo. [10]

El presente trabajo propone el diseño e implementación de un detector de bordes usando el filtro de Sobel, se utiliza el microcontrolador ARM STM32FI el mismo que tiene 32 bits, una cámara para tomar las imágenes, un *display* TFT. Se procede con esta tarjeta a adquirir la imagen original y la imagen procesada. Usando un par de interruptores, el primero permite detectar los bordes de las imágenes, y el segundo envía los datos a una computadora personal, la imagen tomada por la cámara y la imagen a la que se aplicó el filtro para detección de bordes. En el *software* MATLAB se filtra la imagen tomada por la tarjeta construida mediante el algoritmo de Sobel, y se compara las dos imágenes procesadas. Se aprovechó la versatilidad de la programación en lenguaje C de la tarjeta de desarrollo STM32FI-DISCO.

Este artículo está organizado de la siguiente manera en la sección II: se describen los materiales y métodos para el diseño del detector de bordes, en la sección III: los resultados y la comparación entre las imágenes filtradas el *software* MATLAB y en la tarjeta de procesamiento y, en la sección IV las conclusiones.

2. Materiales y métodos

2.1. Diseño del detector de bordes

El diseño del detector de bordes de imágenes mediante el filtro de Sobel se basó en el diagrama de bloques que se puede observar en la Figura 1, el mismo que está constituido por la cámara que toma la foto de la imagen, el procesador STM32FI DISCO donde se realiza el algoritmo de filtrado, la pantalla TFT para visualizar la imagen y la conexión serial para transmitir los datos al PC. La computadora personal mediante un cable USB sirve como la fuente de energía de este módulo de procesamiento digital de imágenes.

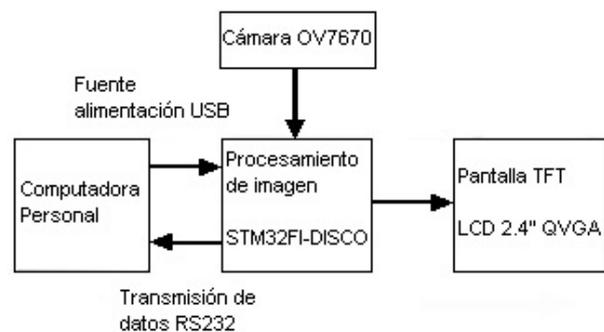


Figura 1. Diagrama de bloques

El procesamiento de las imágenes permite determinar si hay cambios en el movimiento con una simple diferencia. La detección de cambios en la imagen sirve determinar si hay movimiento con aplicaciones en seguridad o para conocer si una edificación o un circuito presenta deterioros. Para la determinación de los bordes, el microcontrolador toma la fotografía de la imagen y hace un barrido de una matriz de pixeles 3x3, aplicando la máscara de Sobel a cada matriz, con lo cual se suavizan las zonas de pixeles que son continuas y se refuerzan las zonas donde los pixeles cambian abruptamente de intensidad.

2.2. Sensor de imagen

La cámara OV7670 es un sensor de imagen CMOS de bajo voltaje funciona como una cámara VGA, necesita una fuente de alimentación entre 2,5 voltios y 3 voltios, opera a 30 FPS (tramas por segundo), tiene la capacidad de reducir el ruido de iluminación y eléctrico, así como los efectos de niebla, manchas. Además, usa una interfaz compatible con I2C y trabaja con formato RGB565 [11]. El formato RGB565 guarda las intensidades en 2 bytes o 16 bits, los colores rojo y azul tienen valores de intensidad que varían entre 0 y 31 y el verde varía entre 0 y 63, el 565 indica el número de bits que se utiliza para cada color. [12]

2.3. Tarjeta STM32FI DISCO

La tarjeta de desarrollo STM32FI DISCO es el cerebro del procesador de imágenes, está basada en un microcontrolador ARM de 32 bits de la casa STMicroelectronics, tiene 2 Mbytes de memoria flash, un reloj con frecuencia máxima de 180 MHz, 225 DMIPS, un controlador dedicado para LCD TFT, conversores A/D y D/A de 12 bits, una DMA (acceso directo de memoria) de 16 bits de tipo FIFO [13], con instrucciones orientadas hacia el lenguaje de programación C.

La tarjeta de desarrollo toma la fotografía después de que un interruptor es presionado, controlando la cámara OV7670, la misma que envía los datos mediante el puerto de comunicaciones I2C, lo almacena en memoria flash del microcontrolador, y procede a enviar los datos para que sean visualizados en la pantalla TFT. Al presionar el segundo interruptor, el microcontrolador aplica el algoritmo de Sobel y presenta los resultados en la pantalla TFT. Posteriormente se envía la imagen original y la imagen con los bordes detectados al PC por medio de un módulo serial. La pantalla TFT es parte del módulo de desarrollo, sus características son las siguientes: soporta el formato RGB con 240 x 320 pixeles, necesita una fuente de 5 voltios y se comunica con bus paralelo de 8 o 16 bits [14]. Para la comunicación serial con el PC se utiliza el módulo CP2102 para transmitir datos mediante comunicación serial RS232 [15], las imágenes que son almacenadas en la memoria flash y que posteriormente serán reconstruidas en el *software* MATLAB como una matriz de intensidades RGB. En la Figura 2 se puede observar el módulo de desarrollo.

2.4. Filtro de Sobel

Aparte de los filtros que disminuyen el ruido en las imágenes. Existen los filtros que detectan los bordes de una imagen. Un borde es una discontinuidad, de tal forma que la detección de los mismos se basa en obtener la derivada de la función de la imagen [16]. Se aplican las siguientes ecuaciones para determinar el gradiente de la imagen [17]:

$$\frac{df}{dx} = \left(\frac{1}{6}\right) (M_x \circ N_8 [x, y]) \quad (1)$$

$$\frac{df}{dy} = \left(\frac{1}{6}\right) (M_y \circ N_8 [x, y]) \quad (2)$$

$$\nabla f = \sqrt{\frac{df}{dx}^2 + \frac{df}{dy}^2} \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\frac{df}{dx}}{\frac{df}{dy}} \right) \quad (4)$$

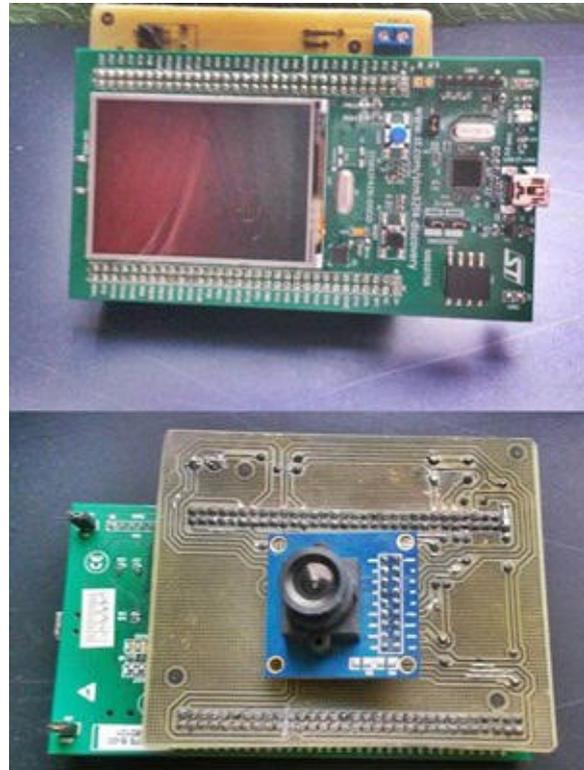


Figura 2. Tarjeta de desarrollo de procesamiento de imágenes

La máscara M sobre una imagen N, la máscara de Sobel es una matriz 3 x 3, la cual tiene un centro estimado que es el doble del valor del pixel vecino, existe una máscara M_x y una máscara M_y [17] como se puede ver en la figura 3.

$$M_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & -1 \end{bmatrix}$$

Figura 3. Máscaras M_x y M_y para el filtro de Sobel

Al aplicar sobre una matriz de pixeles de orden 3x3 de los vecinos al punto de análisis.

$$G_{pixeles} = \begin{bmatrix} l1 & l2 & l3 \\ l4 & l5 & l6 \\ l7 & l8 & l9 \end{bmatrix}$$

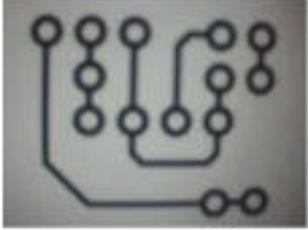
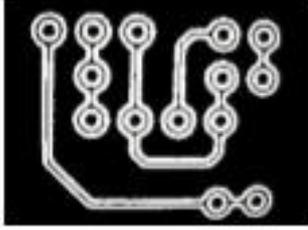
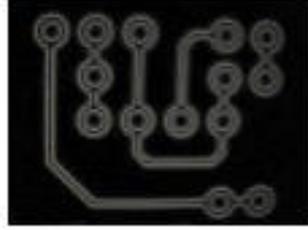
Imagen original	Filtro en Tarjeta	Filtro en Matlab
		
		
		
		
		

Figura 4. Comparación entre los bordes de las imágenes obtenidos con la tarjeta de desarrollo y el software MATLAB

Aplicando la máscara de Sobel se obtiene:

$$G_x = (l7 + 2 \cdot l8 + l9) - (l1 + 2 \cdot l2 + l3)$$

$$G_y = (l3 + 2 \cdot l8 + l9) - (l1 + 2 \cdot l2 + l7)$$

El cálculo del gradiente de la combinación de la matriz horizontal y vertical.

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (5)$$

Este valor debe ser remplazado en cada una de las matrices RGB de cada pixel analizado [18].

3. Resultados de discusión

En la Figura 4 se puede observar en la columna izquierda la imagen tomada usando el equipo para adquirir imágenes con el microcontrolador STM32FI DISCO, en la columna del centro se observa los bordes obtenidos de la imagen tomada con el equipo de procesamiento de imágenes, en la columna de la derecha se observa la imagen analizada con el *software* MATLAB, la misma que ha sido enviada desde la tarjeta de procesamiento de imagen mediante el puerto serial, en el *software* MATLAB se ha aplicado el filtro de Sobel para determinar los bordes y conocer qué grado de precisión que tiene el detector de bordes instalado con el microcontrolador ARM. Para determinar la similitud de las imágenes se utilizó el método de correlación [18]. Se ha tomado distintos tipos de imágenes como son el rostro del estudiante Juan Francisco Ordóñez, un circuito impreso, figuras geométricas, una impresora, y parte del edificio del campus Sur Quito, como se puede ver en la Tabla 1. Las imágenes con mayor similitud tienen un valor de correlación cercano a 1; cuanto más se acercan las imágenes al valor de correlación igual a cero hay más diferencias.

Tabla 1. Valores de Correlación obtenidas al comparar las imágenes procesadas con el microcontrolador STM32 y el *software* MATLAB

% de correlación	Imagen
0,8744	circuito impreso
0,8700	figuras geométricas
0,8659	edificio
0.7533	impresora
0,6794	rostro

Las imágenes procesadas utilizando el método de Sobel permiten detectar los bordes con mayor precisión en circuitos impresos, figuras geométricas y edificios

en los cuales los bordes de la imagen a ser procesada están bien definidos, en el caso del rostro y la impresora, aunque se logra detectar los bordes no se llega a tener un grado de similitud para recomendar este método.

4. Conclusiones

Nosotros hemos presentado en esa investigación la detección de bordes de diversas imágenes utilizando un microcontrolador ARM de bajo costo y el método de Sobel. Se recomienda el uso de este método en detección de borde bien definidos en las imágenes, por lo cual tendría una buena aplicación en el uso para reconstrucción de edificios, planos de casas, y circuitos impresos. En el futuro se puede proponer utilizar métodos más robustos de tipo heurístico en combinación con los filtros tradicionales de Sobel, Canny entre otros.

Referencias

- [1] G. Anusha, J. T, and N. Satya, "Implementation of sobel edge detection," *International Journal of Computer Trends and Technology*, vol. 3, no. 3, pp. 472–475, 2012.
- [2] S. Ravi, A. Rahim, and F. Shaik, "Fpga based design and implementation of image edge detection using xilinx system generator," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 4, no. 10, pp. 4657–4660, 2013.
- [3] P. Premaratne, Ajaz, Monaragala, Bandara, and M. Premaratne, "Design and implementation of edge detection," in *2010 Fifth International Conference on Information and Automation for Sustainability*, Colombo, 2010.
- [4] L. Tan, *Digital Signal Processing, Fundamentals and Applications*, Academic Press, 2013.
- [5] STMicroelectronics. (2016). [Online]. Available: <http://www2.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/03/b4/b2/36/4c/72/49/29/DM00071990.pdf/files/DM00071990.pdf/jcr:content/translations/en/DM00071990.pdf>.
- [6] S. Pratibha, M. Diwakar, and C. Sangam, "Application of edge detection for brain," *International Journal of Computer Applications*, vol. 58, no. 16, pp. 21–25, 2012.
- [7] M. Anupam and K. Debaditya, "Motion analysis in video surveillance using edge detection," *IOSR Journal of Computer Engineering*, vol. 12, no. 6, pp. 10–15, 2013.

- [8] Y. Ramadevi, T. Sridevi, B. Poornima, and B. Kalyani, "Segmentation and object recognition using edge detection techniques," *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, vol. 2, no. 6, pp. 153–161, 2010.
- [9] U. Sefercik and O. Gulegen, "Edge detection in geologic formation extraction: Close range and remote sensing case studie," 2012.
- [10] N. Singh, D. Gandhi, and K. P. Singh, "Recognition system using a canny edge detection and a circular hough transform," *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, vol. 1, no. 2, pp. 221–228, 2011.
- [11] Omnivision. (2016) datasheet ov7670. [Online]. Available: <http://www.voti.nl/docs/OV7670.pdf>.
- [12] R. Green and M. Zechner, "Beginning android games, New York: Apress," pp. 89–91, 2012.
- [13] STMicroelectronics. (2016) Stm32f series. ISSN 1424-8220. [Online]. Available: http://www2.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f3-series.html.
- [14] Wide. (2016) 2.4" QVGA (320x240) tft-lcd. [Online]. Available: <http://www.wide.hk/pdf/240320.pdf>.
- [15] S. Labs. (2016) Cp2102-9. [Online]. Available: <https://www.silabs.com/Support%20Documents/TechnicalDocs/CP2102-9.pdf>.
- [16] C. Solomon and T. Breckon, "Fundamentals of digital image processing," *Oxford: Wiley-Blackwell*, pp. 97–103, 2011.
- [17] L. Shapiro and G. Stockman, "Computer vision," *New Jersey: Prentice-Hall*, pp. 156–166, 2001.
- [18] S. Jayaraman, "Digital imagen processing," *New Delhi: Tata McGraw Hill*, pp. 127–132, 2009.

FOMENTO DEL METABOLISMO ENERGÉTICO CIRCULAR MEDIANTE GENERACIÓN ELÉCTRICA PROVENIENTE DE RELLENOS SANITARIOS: ESTUDIO DE CASO, CUENCA, ECUADOR

PROMOTING CIRCULAR ENERGY METABOLISMS THROUGH ELECTRICITY GENERATION FROM LANDFILLS: CASE STUDY CUENCA, ECUADOR

Edgar A. Barragán^{1,*}, Pablo D. Arias², Julio Terrados³

Resumen

La provisión de recursos y energía para las ciudades es un reto para los planificadores urbanos. Más del 50 % de la población está concentrada en las ciudades y se espera que esta tendencia se incremente. Bajo el enfoque del metabolismo urbano, a las ciudades se las puede considerar como un ecosistema artificial, que requiere de materiales, nutrientes, agua y energía. La obtención de estos recursos ejerce una enorme presión sobre el medioambiente, no solo por el requerimiento de materia prima, sino por la generación de emisiones, residuos y efluentes. Por ello se plantea nuevas formas de recuperar los recursos, cambiando el modelo urbano desde un metabolismo lineal a uno circular. Una de las tecnologías que reúne estos requisitos es utilizar el biogás de los rellenos sanitarios para producir energía eléctrica. De esta manera, se disminuye la importación de energía hacia la ciudad y se reducen las emisiones de gases de efecto invernadero. Se focaliza el análisis al Relleno Sanitario de Pichacay, ubicado en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

Palabras clave: metabolismo urbano, energías renovables, biogás, sostenibilidad energética.

Abstract

The provision of resource and energy for the cities is the goal for the urban planning team. 50% or more of the people is living on the metropolitan area of the cities and this trend is expected to increase. Under the urban metabolism approach to cities they can be considered as an artificial ecosystem that requires materials, nutrients, water and energy. Obtaining these resources causes enormous pressure on the environment, not only by the requirements of raw material but by production of contaminants. This paper propose a new behavior of recovering resources arises, changing the urban model from a linear to a circular metabolism. One technology that meets these requirements is to use biogas from landfills to generation of electricity. Reducing purchasing of energy import to the city and emissions of greenhouse gases are reduced too. The analysis of Pichacay Landfill, located in the city of Cuenca, Ecuador, was prepared.

Keywords: Urban metabolism, renewable energy, biogas, energy sustainability.

^{1,*}Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: ebarragan@ups.edu.ec

²Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Católica, Cuenca – Ecuador.

³Grupo de Investigación IDEA, Universidad de Jaén, Jaén – España

Recibido: 13-09-2016, aprobado tras revisión: 29-09-2016

Forma sugerida de citación: Barragán, E.; Arias, P. y Terrados, J. (2016). «Fomento del metabolismo energético circular mediante generación eléctrica proveniente de rellenos sanitarios: Estudio de caso, Cuenca, Ecuador». *INGENIUS*. N.º 16, (Julio-Diciembre). pp. 36-42. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

Las ciudades son creaciones humanas, que inicialmente se asentaron lo más cerca posible de los sitios en donde se encontraban los recursos. A medida que los estilos de vida se modificaron, las poblaciones fueron alejándose de los lugares en donde se encontraban dichos recursos [1].

Más del 50 % de la población mundial vive en áreas consideradas como urbanas, que consumen más de dos tercios de la energía primaria, que provocan entre el 70 y 80 % de las emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la energía [2-4].

Las ciudades han transformado profundamente los ecosistemas en donde se han asentado, debido a la remoción del suelo y a la transformación de áreas ocupadas por plantas y animales [4]. Para el año 2050, se prevé que el 85 % de la población se encuentre en las zonas urbanas [5]. Es decir, las transformaciones se irán acentuando dentro y fuera de sus límites, pues una ciudad puede requerir entre una a dos veces de su superficie para mantenerse [6]. A pesar de los altos requerimientos de energía y materiales, se mantiene la desigualdad per cápita, se estima que solo 10 % de la población consume el 40 % de energía y el 27 % de materiales [7].

La disposición de desechos municipales es uno de los más serios y controversiales problemas del manejo municipal a nivel global, a tal punto que los gobiernos locales están especialmente preocupados en su gestión y administración [8]. Estos han optado por una gestión integrada enmarcada en la prevención, reciclaje, tratamiento biológico, tratamiento térmico o la disposición en rellenos sanitarios [9-11].

Las ciudades disponen de variada energía residual o de recursos que pueden ser incorporados a las matrices energéticas, por ejemplo, las energías renovables distribuidas como la energía solar, microhidroeléctrica, eólica [5], o geotermia [11]. El reto a largo plazo es reformular una política energética que permita modificar la demanda de la comunidad [12]. Y a su vez se provoque el cambio en el comportamiento de los consumidores, la dinámica del mercado y las fuerzas políticas.

En la ciudad de Cuenca, Ecuador, se eligió como alternativa para la gestión de desechos la conformación de un relleno sanitario. Estas instalaciones están implantadas en un área de 123 hectáreas y funcionan desde octubre de 2001 en el sector de Pichacay, en la parroquia Santa Ana, a 21 km de la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay (Figura 1). Allí, se depositan 430 toneladas al día de desechos sólidos.

En un relleno sanitario se depositan cientos de toneladas al día de desechos sólidos que son tratados con procesos técnicos [9]. Los desechos se ubican

sobre una geomembrana que impide el paso de lixiviados al suelo, y luego son compactados y recubiertos. En medio de esas capas de desechos hay sistemas de conducción conectados a chimeneas. Producto de la descomposición de la materia orgánica y de otros residuos, se producen una serie de gases que se emiten a la atmósfera [13]. Según los estudios que se realice, se determina, la calidad, cantidad y composición del gas con el fin de darles usos alternos.

Actualmente, el biogás está siendo desarrollado rápidamente como un método efectivo para generar energía renovable (ER), de tal forma que está jugando un importante papel dentro de la producción y protección ambiental [13]. De entre los usos que pueden generar beneficios, está la producción de electricidad, utilizando motores. Estos motores utilizan como materia prima el gas metano (CH_4), componente principal del biogás.



Figura 1. Ubicación del relleno de Pichacay

En el año 2007 la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC EP) junto con Eastern Research Group Inc. y Carbon Trade «empresas contratadas por Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, siglas en inglés de Environmental Protection Agency)», realizaron un estudio en el que se indica que la cantidad estimada de gas disponible en el relleno sanitario de Pichacay es suficiente para mantener operativa una planta de biogás de 1 MW de potencia en el primer año de operación, y al tercer año se sumaría 1 MW adicional.

En este contexto y con el fin de promover los estudios técnicos y económicos para la construcción y operación de una planta de generación termoeléctrica que utilice el biogás del relleno sanitario, se conformó la empresa de economía mixta EMAC – BGP ENERGY CEM en diciembre de 2012.

2. Las energías renovables y la ciudad

El metabolismo urbano compara a las ciudades con organismos biológicos, pues necesitan energía y recursos, para transformarlos y convertirlos en trabajo y desechos. Desde esta perspectiva, a una ciudad puede considerarse como un ecosistema «nuevo» poco desarrollado [4] altamente dependiente de los recursos provenientes de fuera de sus límites. En este espacio los humanos intercambian materiales y energía con el exterior [14], con el fin de alimentarse, trabajar, residir, transportarse y comunicarse [15].

A diferencia del metabolismo natural que se lo considera circular (entradas y salidas relacionadas), el metabolismo urbano es lineal (entradas y salidas no relacionadas) [15]. Esta linealidad consiste en disponer como entradas extensas cantidades de insumos (por ejemplo energía, alimentos o materia prima) con lo que se tienen salidas como bienes, servicios y desechos.

Desde esta perspectiva se tienen dos problemas: i) una alta necesidad de recursos, que comprometen las fuentes de provisión de los mismos y ii) masiva disposición de desechos que causan contaminación [16]. Por ello se busca que este modelo lineal sea convertido en un modelo circular, que disminuya la importación de recursos y disminuya los desechos y emisiones.

En [17] se sostiene que una de las formas para promover el metabolismo urbano circular es la aplicación de las tecnologías de generación renovable. Una de estas tecnologías es la generación de electricidad en rellenos sanitarios. Este enfoque argumenta que la energía renovable puede utilizarse con el fin de disminuir la importación energética.

3. Energía proveniente de los rellenos sanitarios

A partir del proceso de descomposición de los desechos sólidos inicia la producción de biogás que se prolonga por un lapso estimado de 15 años después del término de la operación del relleno. El biogás se compone de partes aproximadamente iguales de CH_4 y CO_2 , con un pequeño porcentaje de oxígeno (O), nitrógeno (N) y vapor de agua; así también están presentes trazas de compuestos orgánicos volátiles (COVs) y polutantes peligrosos al aire (HAPs) [18].

Dependiendo de la calidad del biogás y en función de una valoración de su potencial energético se lo puede utilizar como combustible ya que su valor calorífico se encuentra entre los 15 a los 18 MJ/m^3 , que es aproximadamente la mitad del valor del gas natural [19].

La EPA definió algunas opciones para el uso del biogás: industria, procesos de agricultura o generación

de energía eléctrica. Además, el contenido de CH_4 del biogás también puede ser separado en otros componentes para ser utilizado como suplemento del gas natural o como combustible para vehículos. Puesto que el metano es uno de los gases de efecto invernadero (GEI), su captura y oxidación a CO_2 resulta ser beneficiosa para el ambiente [18].

Si la porción de metano es lo suficientemente alta para la producción de electricidad, se puede utilizar motores de combustión interna [9], que son altamente eficientes, a más de tener una rápida respuesta a la carga [10]. Los estudios de cantidad y calidad del gas, permiten determinar la potencia de los equipos, y el futuro potencial que se pueda extraer y las posibilidades de ampliación.

4. Características generales de un proyecto de generación eléctrica con biogás

Se define a una central a biogás, como aquella que genera electricidad utilizando como combustible el biogás obtenido en un digestor como producto descomposición anaerobia (sin oxígeno) de desechos domésticos y comerciales depositados en un relleno sanitario, con el fin de producir electricidad [9].

Otra etapa que se puede añadir es el aprovechamiento del gas producto del proceso de combustión, que es utilizado como energía térmica [10], para calentamiento de agua o para la operación de los evaporadores en el tratamiento biológico. Experiencias indican que la implementación de esta nueva fase puede aumentar en 35 % la eficiencia global del sistema así como disminuye los costos hasta en un 6 %.

La operación de la planta, debe ser controlada de tal forma que se evite una extracción excesiva de gas pues podría producir la destrucción de las bacterias, que son responsables de la metanogénesis (formación de CH_4), y por lo tanto podría detener la producción de gas [10].

4.1. Proceso de producción de electricidad

El biogás capturado es conducido a través de una red de tuberías secundarias hasta un tubo de encabezamiento principal. Luego en la central, ocurrirá la transformación de la energía química obtenida del biogás, en energía mecánica, producto de la combustión interna de los motores.

Mediante generadores eléctricos acoplados a los ejes de los motores de combustión (grupo motor-generator), se aprovecha el movimiento mecánico para producir

energía eléctrica, esta última va a la subestación eléctrica elevadora para su distribución a los centros de consumo [20, 21].

Desde el punto de vista operativo, una planta de este tipo se divide en tres partes: i) captura y extracción, ii) sistema de tratamiento, y iii) análisis y producción de electricidad [20]. El esquema general de una instalación se presenta en la Figura 2.

La operación, además, permite reducir cantidades importantes de CO₂, pues el funcionamiento de la central permite controlar las emisiones del CH₄ liberado a la atmósfera. El resto de los componentes del biogás es extraído y se queman para disminuir la producción de olores. Este tipo de máquinas requieren un mantenimiento frecuente por lo que el factor de disponibilidad de la planta es de aproximadamente 80 % [10].

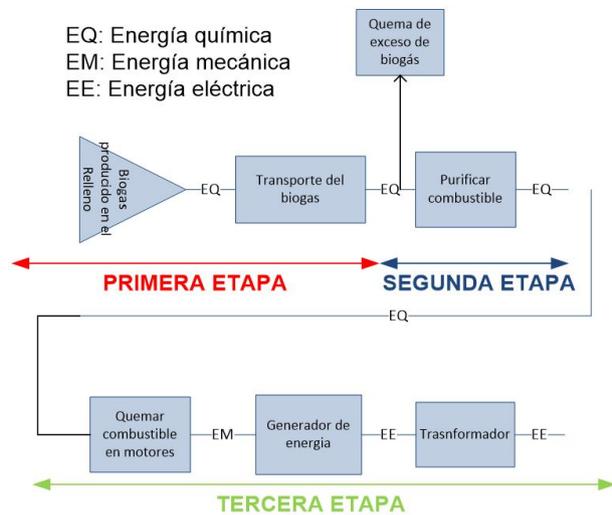


Figura 2. Esquema de la generación eléctrica

La cantidad de gas, así como la cantidad de desechos que ingresan a la planta dependen del volumen de desperdicios que entran al relleno sanitario, y estos a su vez dependen del tipo de consumo y cantidad de población a la que sirven. Sobre la base de estas características, se determina la viabilidad financiera del proyecto [9].

El porcentaje de composición orgánica del desecho juega un importante papel en la predicción, por ello se recomienda que los modelos empleados para el dimensionamiento sean aplicados para condiciones similares, es decir, se debe evitar que la aplicación en países en vías de desarrollo incluya información utilizada en países desarrollados [13].

Para la estimación del biogás en un relleno sanitario se han desarrollado varios modelos matemáticos [13]. En Pichacay la modelación permitió concluir que en el sitio se tiene una buena calidad de biogás, con una disponibilidad en todo el relleno de alrededor de 504

m³/hora [18]. Se espera la disponibilidad del recurso más allá del 2022 si la cantidad de biogás continúa incrementándose.

Luego de unos años de madurez la calidad y cantidad de gas disminuye hasta llegar a límites en donde el aprovechamiento energético ya no es rentable.

Esto suele contrarrestarse con el incremento de extensión del área del relleno, lo que permite mantener o aumentar la producción de energía [19].

4.2. Situación en el Ecuador

En el Ecuador se encuentran vigentes varios mecanismos para la promoción de las ER: tarifa regulada, objetivos nacionales, mecanismos de mercado, incentivos financieros, fomento a la inversión pública, investigación y desarrollo e información y prospección de recursos [21].

A partir del año 2000, se establecen en el Ecuador, tarifas preferenciales para tecnologías no convencionales, y hasta junio de 2016 se encontraban vigentes los precios preferenciales solo para tecnologías como la pequeña hidroeléctrica, biomasa y biogás [22].

La regulación vigente, considera como precios preferenciales para la energía que utiliza el biogás, 11,08 ¢USD/kWh para el territorio continental ecuatoriano. Según lo que se indica en [9], las plantas de generación con biogás en rellenos sanitarios son financieramente atractivas para poblaciones de más de 200 000 habitantes, por lo que habría un interesante potencial en el Ecuador, siempre y cuando la disposición sea ejecutada de forma técnica.

5. Reducción de emisiones y producción eléctrica

Al utilizarse como materia prima para la producción de energía eléctrica los desechos sólidos urbanos, no solo se obtiene beneficios producto de la venta de energía, sino una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La reducción de emisiones puede incluso representar ingresos extras dependiendo de las condiciones de los mercados de emisiones.

5.1. Emisiones atmosféricas

Este factor considera los efectos positivos que se produce al reducir el CH₄, a CO₂, es decir, una disminución de emisiones de GEI [20, 23], puesto que las características del biogás producido contienen 50 % de metano, se espera la destrucción de este gas a través de su combustión. La destrucción del metano (el CH₄, tiene una equivalencia de 21 veces el CO₂). En el caso particular de la central proyectada, se prevé la reducción anual de 60 000 toneladas de CO₂.

Aporte de energía al cantón Cuenca (urbano), por la operación de la Central Pichacay

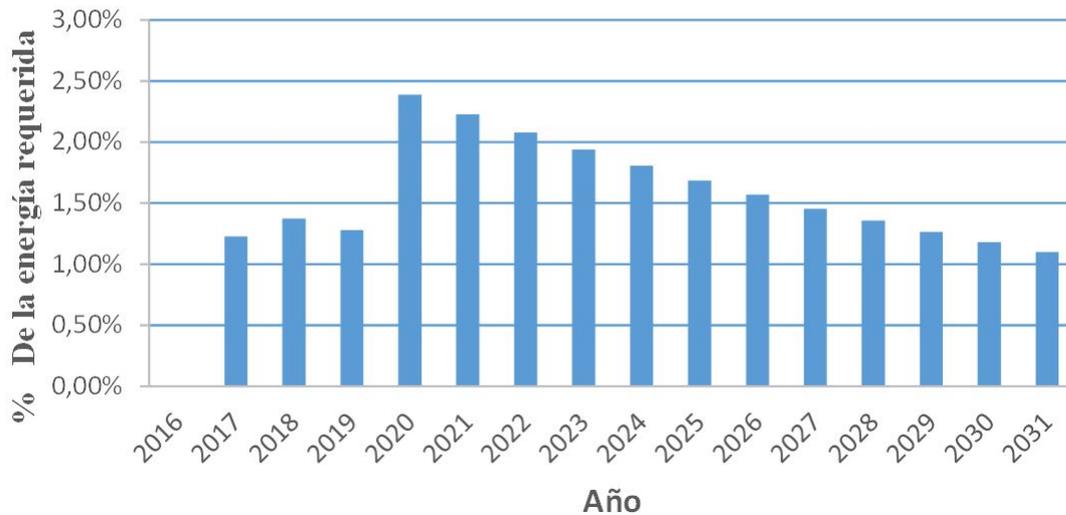


Figura 3. Aporte de energía a la ciudad de Cuenca

5.2. Generación de electricidad

Este tipo de generación se considera eficiente, pues reemplaza energía proveniente de centrales que utilizan combustibles fósiles contaminantes [24].

La construcción de la central contribuirá a los objetivos que se propone el Ecuador en el marco de alcanzar independencia energética eléctrica, no solo con el uso de centrales de hidrogenación, sino con fuentes consideradas renovables.

Según la matriz energética ecuatoriana, se busca que para el 2020 la electricidad que consume el país sea generado por el 93,53 % por plantas hidroeléctricas, 4,8 % por térmicas, 0,57 % por eólicas, 0,72 % por geotérmica y 0,32 % por biomasa [23].

En este sentido, el incremento de potencia de generación, permitirá abastecer a la demanda futura, asimismo la colocación de las unidades de generación permitirá mantener los niveles de tensión del sistema eléctrico de distribución, disminuirán las pérdidas del sistema, es decir, garantizará el servicio en forma continua y con calidad.

Según [18], la potencia eléctrica de un generador es de 847 kW. En el primer año se espera 6900 horas de trabajo anuales, en el segundo y tercer año 8280 horas.

En el primer año de operación se estima que la central generaría 5 844 300 kWh (con un generador), en el segundo año 7 013 160 kWh desde el tercer año se generaría 14 026 320 kWh (con dos generadores y 8280 horas operativas cada uno) a excepción del noveno, decimoprimer, decimotercer y decimoquinto año en

donde disminuye la generación a 13 924 680 kWh, por la disminución del biogás.

En la Figura 3 se observa que el porcentaje de demanda cubierta se incrementa al operar dos unidades de generación (alrededor del 2,5 %). Sin embargo, a medida que crece la demanda de la ciudad de Cuenca, este aporte disminuye al 1 %.

Se indica también el porcentaje de demanda de energía cubierta en la ciudad de Cuenca (urbana), asumiendo los datos presentados en la Tabla 1 (2011). No se considera incremento de la demanda por consumos especiales o campañas de eficiencia energética.

Tabla 1. Condiciones del análisis

Población	329 928	habitantes
Consumo per cápita	949,6	kWh/año
Tasa de crecimiento poblacional	1,93	%
Tasa de crecimiento energía	5,2	%

5.3. Ingresos por venta de energía

Se estima un precio referencial de 11,08 ¢USD/kWh. La venta de energía aportaría con USD 647 548 para el primer año, en el segundo y tercer año USD 777 058.

Desde el tercer año la potencia se incrementa a 1694 kW generando ingresos por USD 1 554 116 a excepción del noveno, decimoprimer, decimotercer y decimoquinto año en donde se disminuye las horas de trabajo, por lo que los ingresos bajan a USD 1 542 854 en esos años.

La destrucción del CH₄ por otro lado propicia que este proyecto pueda ser seleccionado como un proyecto MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio), lo que permitiría obtener los Certificados de Reducción de Emisiones (CER) y por tanto su comercialización en el mercado internacional de carbono.

La cotización de la tonelada de carbono equivalente ("tCO₂e") en el mercado difiere según su origen y su destino, mientras en el 2005, se tenía un valor de 8,13 €/Ton en el 2010 llegó a 24,90 €/Ton. Sin embargo, los actuales precios de los CER (según <http://www.sendeco2.com/>, a mayo de 2016, los precios de los CER son menores a 42 € €/Ton), no son considerados como determinantes para incrementar los ingresos por este concepto.

6. Conclusiones y recomendaciones

El proyecto tiene particularidades, pues su implantación se proyecta en un área rural, junto a una infraestructura sensible (relleno sanitario).

La generación de electricidad utilizando el biogás del relleno sanitario, es una tecnología considerada como renovable. Se espera que un equivalente del 1 % al 2,5 % de la energía de Cuenca, sea generada por esta tecnología. La materia prima proviene de la ciudad, y se disminuye la importación de energía a la urbe, promoviendo el metabolismo urbano circular.

Este tipo de propuestas resulta un aporte al desarrollo sostenible, considerando la tendencia mundial respecto a la conservación del medioambiente. La operación de la planta se considera una externalidad positiva, que conlleva beneficios, como el control de GEI, la generación de energía, así como la diversificación energética.

Agradecimientos

Al Ing. Miguel Corral, exgerente de la EMAC – BGP ENERGY CEM, por las facilidades prestadas para el uso de la información presentada en este documento.

Referencias

[1] W. R. W. A. Leduc and F. M. G. Van Kann, "Spatial planning based on urban energy harvesting toward productive urban regions," *J. Clean. Prod.*, vol. 39, pp. 180–190, 2013.

[2] J. Keirstead, M. Jennings, and A. Sivakumar, "A review of urban energy system models: Approaches, challenges and opportunities," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3847–3866, 2012.

[3] S. Chen and B. Chen, "Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: A case study of vienna, austria," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 8, pp. 4498–4506, 2012.

[4] S. Pincetl, "Nature, urban development and sustainability – what new elements are needed for a more comprehensive understanding?" *Cities*, vol. 29, no. Supple, pp. S32–S37, 2012.

[5] T. Dixon, M. Eames, J. Britnell, G. B. Watson, and M. Hunt, "Urban retrofitting: Identifying disruptive and sustaining technologies using performative and foresight techniques," *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 89, pp. 131–144.

[6] C. Kennedy, J. Cuddihy, and J. Engel-Yan, "The changing metabolism of cities," *J. Ind. Ecol.*, vol. 11, no. 2, pp. 43–59, 2007.

[7] H. Weisz and J. K. Steinberger, "Reducing energy and material flows in cities," *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, vol. 2, no. 3, pp. 185–192, 2010.

[8] B. Assamoi and Y. Lawryshyn, "The environmental comparison of landfilling vs. incineration of msw accounting for waste diversion," *Waste Manag.*, vol. 32, no. 5, pp. 1019–1030, 2012.

[9] R. Mambeli Barros, G. L. Tiago Filho, and T. R. da Silva, "The electric energy potential of landfill biogas in brazil," *Energy Policy*, vol. 65, pp. 150–164, 2014.

[10] D. Gewald, K. Siokos, S. Karellas, and H. Splithoff, "Waste heat recovery from a landfill gas-fired power plant," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 1779–1789, 2014.

[11] W. R. W. A. Leduc and R. Rovers, "Urban tissue: The representation of the urban energy potential," *PLEA 2008 - Toward Zero Energy Build. 25th PLEA Int. Conf. Passiv. Low Energy Archit. Conf. Proc.*, 2008.

[12] P. S. Grewal and P. S. Grewal, "Can cities become self-reliant in energy? a technological scenario analysis for cleveland, ohio," *Cities*, vol. 31, 2013.

[13] Q. Aguilar-Virgen, P. Taboada-González, and S. Ojeda-Benítez, "Analysis of the feasibility of the recovery of landfill gas: a case study of mexico." *J. Clean. Prod.*, vol. 79, pp. 53–60, 2014, iSSN 1424-8220.

[14] S.-L. Huang and C.-W. Chen, "Theory of urban energetics and mechanisms of urban development," *Theory of urban energetics and mechanisms of urban development*, vol. 189, no. 1-2, pp. 49–71, 2005.

- [15] P. H. Brunner, "Reshaping urban metabolism," *J. Ind. Ecol.*, vol. 11, no. 2, pp. 49–53, 2007.
- [16] C. M. Agudelo-Vera, W. R. W. A. Leduc, A. R. Mels, and H. H. M. Rijnaarts, "Harvesting urban resources towards more resilient cities," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 64, pp. 3–12, 2012.
- [17] E. Barragán and J. Terrados, "Sustainable cities?: An analysis of the contribution made by renewable energy under the umbrella of urban metabolism," *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. In press, 2016.
- [18] EMAC, "Estudio de prefactibilidad del potencial del biogás: Relleno pichacay," 2007.
- [19] G. Xydis, E. Nanaki, and C. Koroneos, "Exergy analysis of biogas production from a municipal solid waste landfill," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 4, pp. 20–28, 2013.
- [20] F. Caresana, G. Comodi, L. Pelagalli, P. Pierpaoli, and S. Vagni, "Energy production from landfill biogas: An italian case," *Biomass and Bioenergy*, vol. 35, no. 10, pp. 4331–4339, 2011.
- [21] J. L. Espinoza and E. A. Barragán, "Renewable energy policy and legitimacy?: a developing country case," *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2010 45th International*, no. 11, 2013.
- [22] E. Barragán and J. L. Espinoza, "Políticas para la promoción de las energías renovables en el ecuador. en: Energías renovables en el ecuador. situación actual, tendencias y perspectivas," *Peláez Samaniego, M. R and Espinoza Abad J. L. Eds. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca, Gráficas Hernández*, 2015.
- [23] A. Nahman, "Pricing landfill externalities: Emissions and disamenity costs in cape town, south africa," *Waste Manag*, vol. 31, no. 9–10, pp. 2046–2056, 2011.
- [24] MEER, "Políticas y estrategias para el cambio de la matriz energética del ecuador," 2014.

SIMULACIÓN DEL TIEMPO DE CALENTAMIENTO DEL FUELOIL PARA DETERMINAR VISCOSIDAD ÓPTIMA DE BOMBEO

FUEL OIL HEATING TIME SIMULATION TO DETERMINE OPTIMAL PUMPING VISCOSITY

Sandra Elvira Fajardo-Muñoz¹, Galo Jaime Páez-Fajardo^{2,*}

Resumen

Con el fin de estimar el tiempo requerido para alcanzar la viscosidad óptima de bombeo de un material altamente viscoso, se lleva a cabo una simulación del calentamiento de *Heavy Fuel Oil* (HFO) ecuatoriano mediante serpentines en tanques a bordo. Se estudia la transmisión y transferencia de calor a través de un fluido altamente viscoso como el HFO, se incluyen procesos de conservación energética, conservación de masa y conservación de momento lineal sobre fluidos viscosos. Adicionalmente se incluyen procesos de difusión y convección energética. Finalmente, se determina que la evolución temporal de la temperatura promedio no muestra dependencia al perfil de calentamiento del vapor de agua en serpentines, pero sí una dependencia lineal en el tiempo.

Palabras clave: viscosidad de crudo, fluido viscoso, sistema calentamiento, serpentines, crudo pesado ecuatoriano.

Abstract

In order to estimate the time required to reach the average temperature of a highly viscous material with which optimal pumping viscosity is obtained, a simulation of an on-board coil heating system on Ecuadorian Heavy Fuel Oil (HFO) was conducted. Heat transmission and heat transfer is studied through a highly viscous fluid such as HFO; processes such as energy conservation, mass conservation, and conservation of momentum on viscous fluids are included. Additionally, processes of energy diffusion and energy convection must be included. It was found that temporal evolution of mean temperature does not have dependence with the steam heating profile in coils, but indeed it has a linear dependence in time.

Keywords: Ecuadorian Heavy Fuel Oil, Crude viscosity, Viscous fluid, Heating system, Serpentine.

¹Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil, Guayaquil – Ecuador.

^{2,*}Vicerrectorado Académico, Universidad Regional Amazónica IKIAM, Napo – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: galo.paez@ikiam.edu.ec

Recibido: 18-09-2016, aprobado tras revisión: 07-10-2016

Forma sugerida de citación: Fajardo, S. y Páez, F. (2016). «Simulación del tiempo de calentamiento del fueloil para determinar viscosidad óptima de bombeo». *INGENIUS*. N.º 16, (Julio-Diciembre). pp. 43-50. ISSN: 1390-650X.

1. Introducción

Heavy Fuel Oil (HFO) o *búnker*, como se conoce en Ecuador, es un combustible residual de alto poder calorífico [1] y de bajo costo relativo. Por lo general, y según las especificaciones internacionales, el HFO ecuatoriano se cataloga como fueloil N.º 6. Sus aplicaciones son numerosas y se presentan en diferentes tipos de industrias. Esencialmente, el HFO se usa en motores de navíos mercantes, en combustión por vaporización en calderos industriales [2], así como en centrales termoeléctricas, entre otros.

La composición de este crudo varía sustancialmente debido al método de producción del HFO y a la calidad del petróleo del proceso de refinación [1]. Como consecuencia, sus propiedades termodinámicas tales como la viscosidad, la densidad y la capacidad calórica también muestran una común variabilidad [3] y dependencia al proceso de producción. Esta característica del crudo induce incertidumbre en la determinación de funciones características en el modelamiento computacional del HFO, sin embargo, la inexactitud computacional puede ser mitigada con un amplio proceso de caracterización del *búnker* ecuatoriano.

Para el caso ecuatoriano, el HFO es el resultado de diluir combustibles más ligeros como el diésel con el producto que se obtiene al llevar a cabo el proceso de cracking térmico en el residuo de la torre de fraccionamiento a presión atmosférica. Esta etapa garantiza obtener las exigencias técnicas y de bombeo dinámicas del comprador. Como consecuencia natural de este proceso de refinamiento, en general, el HFO es catalogado como un fluido altamente viscoso [4, 5]; por lo que para transportarlo fácilmente desde tierra al buque o viceversa es necesario reducir su viscosidad drásticamente, para esto se requiere introducir un proceso de precalentamiento y calentamiento tal como se propone y simula computacionalmente en [2, 3, 6].

Uno de los procesos de calentamiento a bordo más utilizados en la industria es el calentamiento mediante vapor de agua [7, 8]. El proceso se basa principalmente en la transferencia de calor desde el vapor de agua hacia el HFO mediante el contacto de este último con serpentines de acero inoxidable distribuidos uniformemente en la base del contenedor del combustible [7]. Este sistema utiliza vapor de agua a temperaturas que bordean los 150 grados centígrados [6], por ende, requiere un alto consumo de combustible para lograr la temperatura que permite alcanzar la viscosidad óptima de bombeo del HFO, lo que se traduce en un alto costo de calentamiento.

En este contexto, el principal problema de la industria ecuatoriana de transporte de HFO radica en que se desconoce el tiempo con el cual el combustible alcanza su punto de viscosidad óptima de bombeo.

En este trabajo, un análisis computacional del flujo dinámico de calor sobre materiales viscosos [2, 3, 6] es utilizado para sobrellevar este inconveniente técnico. Particularmente, se considera al HFO como fluido compresible, se introduce procesos de transporte energético por convección y difusión. Adicionalmente, este trabajo a diferencia de otros en simulación como en [3] o en [6] incluye un micromovimiento ascendente de las capas cercanas a la fuente de calentamiento producto de la variación de densidad, así como considerar en el modelado perfiles de calentamiento del vapor de agua tanto lineales (flujo calórico sin restricción) como exponenciales (restricción sistemática del calentador). Finalmente, se analiza su influencia sobre la capacidad de calentamiento de los serpentines.

2. Materiales, fuentes y métodos

El fenómeno que se analiza al estudiar el calentamiento de HFO es la distribución energética sobre material como consecuencia de introducir tres procesos fundamentales de transporte: la conservación de energía, la conservación de momento y la conservación de masa. Para todos los procesos considerados, el volumen de control es aquel que ocupa el combustible dentro del contenedor de almacenamiento. El volumen diferencial de referencia forma parte del fluido viscoso y se expresa en coordenadas rectangulares diferenciales. Adicionalmente, se considera que el contenedor que almacena el combustible es rectangular prismático y de dimensiones definidas.

La conservación de masa no es más que establecer cuánta masa existe dentro del volumen diferencial de referencia. Es decir, el cambio temporal de la cantidad de masa que existe dentro del volumen es consecuencia de la cantidad de masa que entra y que sale de dicho volumen al transcurrir el tiempo [9]. Esta idea se expresa en forma diferencial mediante la siguiente expresión:

$$\frac{\partial \rho(T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Donde ρ , es la densidad del fluido, y \vec{v} es la velocidad del fluido. El primer término se asocia al cambio temporal de la materia dentro del volumen de control, mientras que el segundo término se relaciona con el flujo neto de masa a través del volumen de control.

Al igual que en la conservación de la masa, la energía en un fluido se conserva cuando el cambio temporal de la energía interna dentro del volumen diferencial de referencia es consecuencia del flujo neto de calor por conducción y por convección sobre dicho volumen. Adicional a esta condición, se introduce como única pérdida de energía del sistema, al rozamiento viscoso en la vecindad de dicho volumen [10]. Este comportamiento

del flujo de energía se expresa en forma diferencial mediante la siguiente expresión:

$$\rho(T) c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{q} - \mu(T) \phi = 0 \quad (2)$$

Donde \vec{q} definido como $\vec{q} = -k(T) \nabla T + \rho H \vec{v}$ es el vector de flujo de calor conductivo y convectivo respectivamente, c_p el coeficiente de calor específico del HFO, T el campo escalar de temperatura que depende del tiempo y de la posición, μ es el parámetro de viscosidad del combustible que mide la facilidad con que un fluido se desplaza con respecto a su vecindad, ϕ es la función de disipación viscosa que representa el rozamiento en las capas laterales del fluido al desplazarse [10, 11].

La variación temporal de la cantidad de movimiento total del sistema en el volumen referencial, es consecuencia de la acción de tres fuerzas generales sobre el fluido, la presión que actúa sobre las paredes de región diferencial de análisis, el efecto del rozamiento en las inmediaciones del volumen y la acción de la fuerza de gravedad [11]. Estos efectos se resumen en la siguiente expresión:

$$\rho(T) \frac{d\vec{v}}{dt} = -\nabla P + \nabla \cdot \tau + \rho(T) \vec{g} \quad (3)$$

Donde \vec{v} es la velocidad del fluido, P es la presión, τ es el tensor de deformación en las inmediaciones del volumen de referencia, y \vec{g} la aceleración de la gravedad. Para todos los casos, el operador ∇ es el operador vectorial gradiente tridimensional permitiendo que el operador de cambio temporal $\frac{d}{dt}$ se define como $\frac{d}{dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla$.

2.1. Adaptaciones y consideraciones sobre el sistema

El HFO es un combustible pesado con muchas de sus propiedades termodinámicas como las antes mencionadas que dependen esencialmente de su temperatura [1-4], es por esto que es más factible representar, para este caso, esa dependencia de temperatura en su viscosidad, su densidad y su capacidad calórica. Por lo tanto, dichas funciones termodinámicas variarán únicamente como consecuencia de una variación en T. Es decir, la densidad ρ en $[kg/m^3]$ variará según la expresión propuesta en [6]:

$$\rho(T) = 0,16c_1c_2 - (1 + [1 - \frac{T}{c_3}]^{c_4}) \quad (4)$$

Donde $c_1=0,537$, $c_2=0,261$, $c_3=568,7$, y $c_4=0,280$ son coeficientes de ajustes y T la temperatura en grados Kelvin. El factor 0,16 corresponde a un factor que permite estimar la densidad del fueloil ecuatoriano con la ecuación (4).

La capacidad calórica c_p se obtiene al derivar con respecto a la temperatura la ecuación de entalpía de [6], así obtenemos:

$$c_p(T) = 6,34R(A_1 + A_2T + A_3T^2 + A_4T^3 + A_5T^4) \quad (5)$$

Donde $A_1 = 1,25 \cdot 10^1$, $A_2 = -1,01 \cdot 10^{-2}$, $A_3 = 2,22 \cdot 10^{-4}$, $A_4 = -2,85 \cdot 10^{-7}$, $A_5 = 1,12 \cdot 10^{-10}$ son coeficientes de ajuste propuestos en [12], mientras que $R=8,3144$ [J/molK] es la constante de los gases, 6,34 es la constante de ajuste que permite a la ecuación (5) modelar la capacidad calórica del fueloil ecuatoriano. Así como en el caso anterior, T es la temperatura en grados Kelvin.

El cambio de la viscosidad con respecto a la temperatura del búnker ecuatoriano es uno de las especificaciones normalmente exigidas por compradores nacionales e internacionales. Previo a una cordial petición, fácilmente se puede obtener datos experimentales del perfil de viscosidad versus temperatura del fueloil ecuatoriano, esto permitió generar un ajuste de los mismos a una ecuación de la forma:

$$\mu(T) = DT^A e^{[\frac{B}{T} + \frac{C}{T^2}]} \quad (6)$$

Con μ [kg/ms] como la viscosidad dinámica del búnker y coeficientes de ajuste $A=-5,79$, $B=8496,41$, $C=110,48$, y $D=522,64$. Como en los otros casos, T es la temperatura expresada en grados Kelvin. La bondad de ajuste del proceso es $X^2/n=0,0143$ el cual se realizó con 4 grados de libertad.

A pesar de que el modelo computacional considera al contenedor del HFO con forma de prisma rectangular, de las tres dimensiones del sistema de ecuaciones, la única que muestra representación relevante del fenómeno es la manera de distribución de la energía calórica desde los serpentines, ubicados en el fondo del tanque, hacia la capa superficial del combustible, ubicado en las cercanías del tope del tanque; es decir, la variación de temperatura en el tiempo a lo alto del tanque (coordenada z).

En otras palabras, la capa asociada a cierto nivel de altura muestra una distribución uniforme energética solo alterada por flujos perpendiculares de energía a dicha capa o como también es conocido, el sistema muestra simetría rectangular superficial. Más detalladamente, al someterse el HFO al proceso de calentamiento, se evidencia cambios significativos exclusivamente cuando se analiza el transporte de energía a diferentes alturas z con respecto al fondo del contenedor. Por lo tanto, el sistema solo considerará a la altura como única dimensión de análisis.

Como consecuencia, en las ecuaciones (1), (2) y (3), el operador gradiente se reescribirá en la forma $\nabla = \frac{\partial}{\partial z}$, el campo escalar de temperatura T dependerá netamente del tiempo y la posición de altura z, a su vez, la velocidad así como la función de disipación mostrarán solo componentes en la dirección z, quedan

reescritos tanto como $\vec{v} = w\vec{k}$ y como en ecuación (7) respectivamente [10].

$$\phi = 2 \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (7)$$

Adicionalmente, el tensor de deformación τ , se reescribirá en forma propuesta en la ecuación (8), el cual eventualmente muestra dependencia con el coeficiente de expansión volumétrica β .

$$\nabla \cdot \tau = \frac{4}{3} \mu(T) \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{4}{3} \beta w \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (8)$$

En el espacio encerrado por el volumen de control, no existe una fuente de masa de HFO, es decir, no existe proceso que adicione masa deliberadamente dentro del tanque. Esta consideración permite excluir al factor $\frac{\partial \rho(T)}{\partial t}$ de la ecuación 1.

La primera capa del material, ubicada en el fondo del reservorio, captura en su totalidad la energía proveniente de los serpentines de calentamiento por difusión energética netamente; como consecuencia, esta capa experimenta un cambio de densidad que genera una fuerza ascendente transmitiendo cinética a la capa subsiguiente. La segunda capa experimentará el mismo efecto transmitiendo movimiento a la tercera capa y así sucesivamente. El efecto diferencial de dicha fuerza es producto de la diferencia de densidad por cambio térmico, es decir, se tiene una especie de fuerza boyante térmica, que se expresa mediante la siguiente expresión.

$$-\nabla P + \rho \vec{g} = -\rho \beta \Delta T \vec{g} \quad (9)$$

Que incluyendo las consideraciones de unidimensionalidad, la ecuación (9) se reescribe en:

$$-\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g = \rho \beta g \frac{\partial T}{\partial z} \Delta z \quad (10)$$

En este trabajo, a diferencia de otros, se considera que este efecto permite una dinámica ascendente más rápida de la energía, por ende, el término no es descartado de la simulación.

En conclusión, el sistema en su totalidad llega a particularizarse con las condiciones exigidas por el proceso de calentamiento transformando la ecuación (1) a:

$$w \beta \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial w}{\partial z} \quad (11)$$

La ecuación (2) a:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + 2\mu \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \quad (12)$$

y la ecuación (3) a:

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho \beta g \Delta T + \frac{4}{3} \mu(T) \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} + \frac{4}{3} \beta w \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \frac{\partial \mu}{\partial T} \quad (13)$$

2.2. Condiciones de frontera

La primera capa del HFO se encuentra en constante contacto con los serpentines de acero inoxidable; es decir, la potencia energética p que esta percibe proviene del calor del vapor de agua con potencia \dot{E} , en unidades internacionales, luego de atravesar el acero de los serpentines. Por tanto, la condición de frontera cuando $z=0$ se expresa en la ecuación (14):

$$m_a c_p \frac{\partial T(0, t)}{\partial t} = p \quad (14)$$

Donde $m_a = \rho A \nabla h$ es la masa de la capa superficial del fondo, A el área inferior del tanque contenedor y ∇h la finesa de la primera cada que es igual al ancho de la grilla espacial en la simulación. La temperatura a lo largo de los serpentines se distribuye desde el radio interior de los serpentines, donde hace contacto con el vapor de agua, hacia el radio exterior, donde hace contacto con el búnker, esta distribución sigue la expresión:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k_{acero} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{e} = 0 \quad (15)$$

Donde $\dot{e} = \frac{\dot{E}}{\pi r_{out}^2 L}$ es la densidad de potencia aportada por el vapor de agua para el régimen lineal y $\dot{e} = \frac{\dot{E}}{\pi r^2 L}$ es la densidad de potencia aportado por el vapor de agua para el régimen exponencial, r_{in} es el radio interno de los serpentines y r_{out} el radio externo de los serpentines. De esta relación diferencial, el valor de p se encuentra según el régimen de calentamiento que se considere. Para cualquiera de ambos casos, cuando $r = r_{in}$ entonces $k_{acero} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{\dot{E}}{2\pi r_{in} L}$ y cuando $r = r_{out}$ entonces $k_{acero} \frac{\partial T}{\partial r} = \frac{p}{2\pi r_{out} L}$. De esta manera, para el régimen exponencial $p = \dot{E} \left(1 - \ln \left(\frac{r_{out}}{r_{in}} \right)^2 \right)$ y para el régimen lineal $p = \dot{E} \left(\frac{r_{in}}{r_{out}} \right)^2$. En todo caso, la potencia de energía que brinda el vapor de agua \dot{E} se puede escribir según la ecuación (16), esto es, mediante su poder calorífico f como se lo propone en [8], $2250 \cdot 10^3 < f < 3120 \cdot 10^3 [J/kg]$, la velocidad con que el vapor viaja dentro de la tubería $v = 15,4 m/s$ [6], el área transversal de la tubería A y la densidad del vapor de agua ρ_v .

$$\dot{E} = f v A \rho_v \quad (16)$$

3. Resultados y discusión

Se predecía que al considerar dos formas de distribución energética distintas a lo largo del grosor de los serpentines (régimen lineal y régimen exponencial), se produzca una diferencia relevante en el promedio de la temperatura distribuida a lo alto del HFO conforme aumenta el tiempo de calentamiento. Sin embargo, a distintos niveles de ocupación del tanque, para ambos regímenes, la dependencia del promedio de la temperatura con respecto al aumento del tiempo de calentamiento muestra un comportamiento similar, lineal y creciente. Este comportamiento se observa en las Figuras 1 y 2.

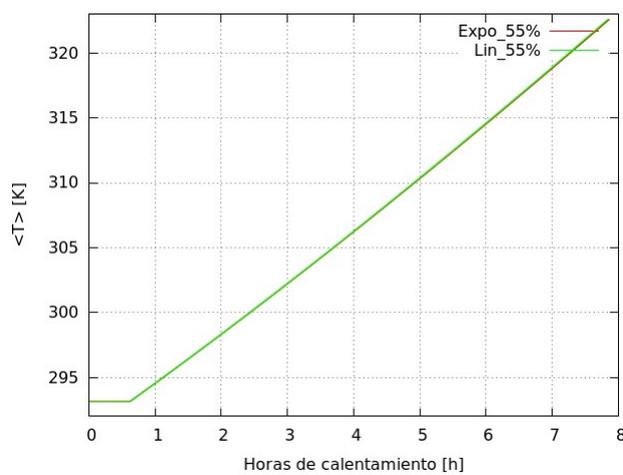


Figura 1. Cambio del promedio de la temperatura durante el calentamiento, capacidad de ocupación al 55 %

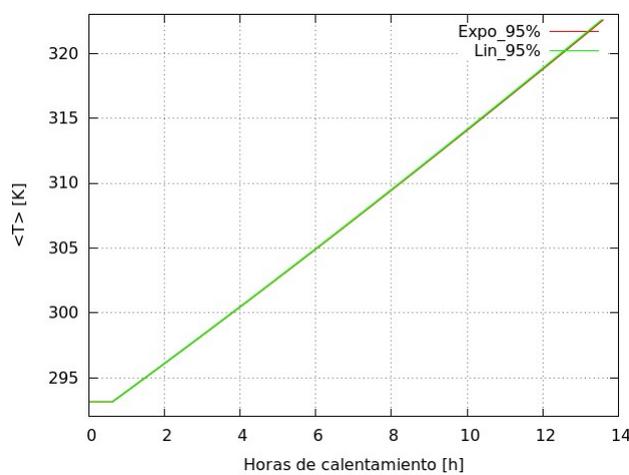


Figura 2. Cambio del promedio de la temperatura durante el calentamiento, capacidad de ocupación al 95 %

Trabajando con la ecuación (15), es evidente que la potencia con que se calienta la capa inicial inferior del combustible es diferente para los distintos regímenes.

Matemáticamente se observa que la potencia exponencial es mayor a la lineal. Por ende, la distribución de la temperatura a lo alto del tanque y conforme el tiempo transcurrido será de mayor magnitud para el proceso exponencial en regiones cercanas al fondo del tanque complementado a su vez con velocidades de ascenso del flujo energético también mayor en sectores alejados del fondo. Sin embargo, el proceso de promediar las temperaturas de distintas alturas solapó las diferencias espaciales en la distribución térmica (Figura 3), provocando que para ambos casos el cambio de la temperatura promedio sea apenas evidente, (Figuras 1 y 2).

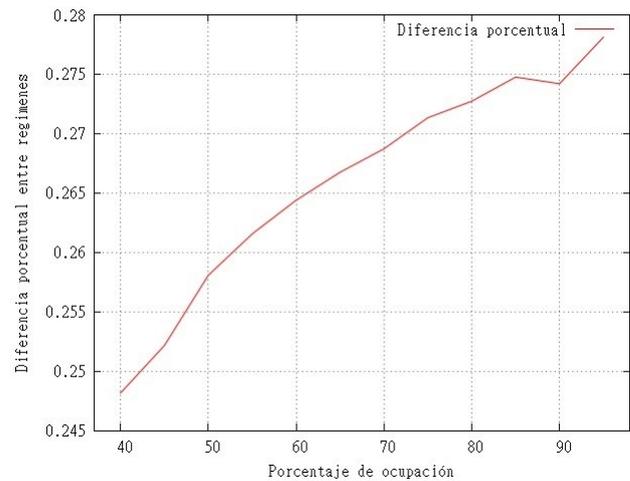


Figura 3. Diferencia porcentual del tiempo de calentamiento del proceso exponencial con respecto al proceso lineal

La diferencia máxima entre los dos perfiles de calentamiento es menor al 0,29 %, mientras que la mínima oscila por 0,25 %. En consecuencia, diferenciar el perfil de calentamiento no indujo a un cambio relevante en el proceso de calentamiento promediado ya que en los resultados de los métodos se diferencian en promedio en apenas un 0,26 %.

La simulación del calentamiento del hidrocarburo calcula, mediante iteraciones en el tiempo, la distribución de la temperatura a lo alto del fueloil. Para cada iteración temporal se calcula la temperatura promedio en el tanque para posteriormente determinar la viscosidad del material para esa temperatura. El programa se detendrá una vez que la viscosidad de material se acerque a la viscosidad objetivo de 454,5 cS a una temperatura de 322,57 K (120,96 °F) para el caso ecuatoriano.

Como es de esperarse a medida que aumenta la cantidad de material a ser calentado, el tiempo de calentamiento para alcanzar la viscosidad objetivo también aumenta. Este comportamiento es confirmado por la simulación y se evidencia en la Figura 4. Por otro lado,

se esperaba que la temperatura promedio para el régimen exponencial crezca a una tasa superior a la que observaríamos para el caso lineal. Los resultados de las simulaciones verifican débilmente lo esperado, puesto que, para el caso lineal, el tiempo de calentamiento óptimo crece a una tasa de 0,1424 horas por cada porcentaje de ocupación del tanque de fueloil, mientras que parte el régimen exponencial se calcula una tasa de aumento del tiempo óptimo de calentamiento de 0,1571 horas por cada unidad de porcentaje de ocupación del tanque.

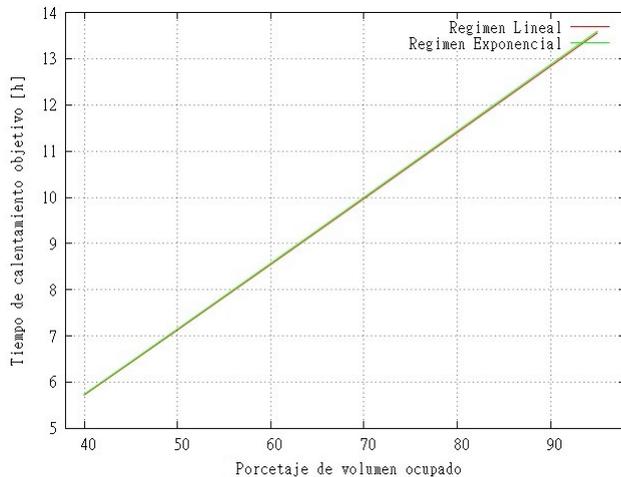


Figura 4. Resultado del sistema de simulación, tiempo de calentamiento para distintos niveles de ocupación

Adicionalmente se esperaba observar una función de la temperatura promedio en dependencia del tiempo de calentamiento que varíe acorde al régimen del perfil de temperatura del vapor de agua, pero se obtuvo lo contrario. Como se observa en la Figura 4, para ambas consideraciones de calentamiento, cuando el porcentaje de llenado bordea el 40 %, el tiempo de calentamiento oscila entre 5 a 6 horas mientras que cuando el tanque se llena en un 95 %, el tiempo de calentamiento oscila entre 13 a 14 horas. Este comportamiento se promedió y generalizó en la ecuación (17) con un parámetro de aproximación de $X^2/n = 7,7 \cdot 10^{-5}$ y usando 10 grados de libertad.

$$t(P) = 0,1427P + 0,002 \quad (17)$$

Para este caso t es el tiempo de calentamiento descrito en horas y $P\%$ es el porcentaje del tanque ocupado por el combustible. Las constantes son válidas únicamente para un tanque con dimensiones específicas de 11,47 metros de largo, 30,0 metros de ancho y 8,3 metros de alto. Es recomendable que solo se trabaje con rango de porcentaje de llenado de entre 38 % y el 96 %.

La poca diferencia que se observa para las temperaturas promedios en la Figura 4 se explica cuando se realiza un análisis de valor inicial para la ecuación

diferencial parcial de la distribución de la temperatura a distintos niveles de altura. La forma diferencial de distribuir la temperatura es igual para ambos casos, (ecuaciones (11), (12) y (13)), mas sin embargo, la diferencia radica netamente por incluir valores iniciales distintos correspondientes a los regímenes del perfil térmico del vapor de agua.

Ya se conoce que el régimen exponencial permite una mayor potencia de calentamiento que se deriva tanto en una capa superficial inicial del combustible que se caliente con mayor rapidez como en una velocidad de ascenso energético con mayor magnitud por convección que se traduce simultáneamente en una mayor transmisión de energía hacia las capas alejadas de la fuente y en una tasa de disipación por fricción mayor. Por otro lado, el régimen lineal provee de menor potencia que el exponencial, por ende, bajo este régimen, la capa inicial se calentará con menor rapidez y la velocidad de ascenso por convección mostrará una menor magnitud, sin embargo, esto permitirá perder menor calor por disipación por fricción.

Evidentemente, estas diferencias en la dinámica de la distribución de energía se atenúan para bajos porcentajes de ocupación porque en estos casos las capas superficiales del combustible están cerca de la fuente de calor despreciando el efecto de distribución por velocidad convectiva y favoreciendo al efecto por difusión, mientras que a altos porcentajes de ocupación el efecto por convección empieza a ser relevante en la distribución de energía de tal manera que en promedio se observa una mayor temperatura para el caso exponencial que para el caso lineal.

4. Conclusiones y recomendaciones

Aun cuando en la literatura se puede encontrar una amplia gama de aplicación de la dinámica de fluido computacional [2, 3, 6, 11], (CFD) por sus siglas en inglés. Debido a la difícil tarea de establecer una generalización de las propiedades termodinámicas para todos los combustibles HFO, los programas de simulación mediante CFD están forzados a particularizar su aplicación hacia ciertos tipos de combustibles con propiedades innatas de dicho crudo, por ende, sus conclusiones solo son aplicables para aquellos HFO que posean el mismo proceso de refinación y la misma calidad de petróleo involucrado en la refinación. Por ejemplo, en [6] se estudia el diseño de tanques de calentamiento y longitud de serpentines para HFO griego con propiedades termodinámicas que difieren enormemente con las del búnker ecuatoriano debido a que el crudo de refinación griego es más ligero que el local, por ende, estos tanques no trabajarán con la misma eficiencia que con el búnker ecuatoriano. Es por este motivo, que urge la necesidad de empezar a generar información termodinámica del crudo local para que

los procesos de simulación, diseño y construcción de tanques y de procesos de calentamiento reflejen con mayor exactitud la realidad del HFO local.

Sin embargo, los procesos de simulación pueden compartir ciertas propiedades aun cuando son particularizados para HFO distintos. Es por este motivo que ciertas consideraciones computacionales relacionadas a la matemática diferencial del problema propuestas en [2] y [11] fueron acogidas, modificadas y acopladas en este trabajo. Por este motivo, esta simulación reproduce en cierta medida la dinámica térmica y energética de medios viscosos propuesta en [11] aun cuando la simulación se llevó a cabo sobre el crudo pesado ecuatoriano.

En primera instancia, el tiempo de calentamiento óptimo es similar sin importar el perfil con el que se calienta el vapor de agua del sistema de calentamiento, diferencias de apenas un 0,26 % garantizan esta similitud. Adicionalmente, la velocidad con que se transmite la energía es distinta para los diferentes porcentajes de ocupación del tanque, producto de introducir diferentes regímenes de calentamiento (lineal o exponencial). A mayor porcentaje los procesos convectivos retoman relevancia mientras que a menor porcentaje de ocupación basta con considerar únicamente procesos difusivos de energía. Finalmente, bajo los parámetros y supuestos establecidos en este estudio, se concluye que existe una relación lineal expresada por la ecuación (17) entre el tiempo promedio de calentamiento del HFO y la cantidad de material que llena los tanques.

Por otra parte, consideramos necesario generar más estudios que permitan que las características del material ecuatoriano puedan ser altamente representadas por las ecuaciones y constantes de ajuste establecidas para las ecuaciones (4), (5), y (6); por consiguiente, al momento, la ecuación (17) solo nos garantiza una primera aproximación del estudio del fenómeno de calentamiento de HFO particular, mas no determinante o generalizable. En consecuencia, es recomendable incluir más estudios de caracterización del búnker ecuatoriano para permitir generar mejores aproximaciones computacionales y por ende relaciones del tipo de ecuación (17) más exactas, confiables y generalizables.

En ciertos trabajos obvian el uso de la ecuación de conservación de momento por considerar irrelevante el flujo másico ascendente, aun así, en este estudio sí se consideró esta ecuación y hemos observado que los resultados se aproximan a los empíricamente esperados. Es recomendable realizar un estudio experimental para corroborar parcial o totalmente los resultados estipulados por este proceso de simulación, además, es aconsejable establecer un proceso de generalización del sistema de simulación y adaptar su parametrización a las propiedades térmicas del crudo ecuatoriano para los diferentes procesos de producción del mismo. Obteniendo una generalización de esta sim-

ulación que incluya las diferentes características del crudo ecuatoriano.

Existe una gran falta de información de caracterización del HFO o crudo pesado ecuatoriano en propiedades no consideradas por el ámbito comercial. Es altamente recomendable centrar estudios en la caracterización de las propiedades termodinámicas como la densidad, la capacidad calorífica, la viscosidad dinámica, la viscosidad cinética, la entalpía del material y sus dependencias respecto al proceso de producción del HFO ecuatoriano. Esta proyección para el futuro abarcará un rango de temperatura bastante amplio que permitirá trabajar eventualmente en simulaciones más precisas y ajustadas al medio local.

Referencias

- [1] J. S. Arroyo, "Aprovechamiento del recurso biomasa a partir de los desechos de madera para una caldera de vapor," in *Proyecto de Titulación*. Universidad Politécnica Salesiana, Quito - Ecuador, 2015.
- [2] C. Chryssakis, K. Pantazis, and L. Kaiktsis, "Combustion modeling with heavy fuel oil for large marine diesel engine applications," in *Conseil international des machines a combustion*, Bergen, 2010.
- [3] N. Kyriakides, C. Chryssakis, and L. Kaiktsis, "Development of a computational model for heavy fuel oil for marine diesel engine applications," in *19th Int. Multidimensional Engine Modeling User's Group Meeting at the SAE Congress*, Detroit, 2009.
- [4] O. Alomair, M. Jumaa, A. Alkorie, and M. Hamed, "Heavy oil viscosity and density prediction at normal and elevated temperatures," *J Petrol Explor Prod Technol*, vol. 6, no. 2, pp. 253–263, 2015.
- [5] Q. Chen, M. Wang, N. Pan, and Z.-Y. Guo, "Optimization principle for variable viscosity fluid flow and its application to heavy oil flow drag reduction," *Energy Fuels*, vol. 23, no. 9, pp. 4470–4478, 2009.
- [6] G. Gavriil, G. N. Prodromidis, J. Pitsilos, and F. A. Coutelieris, "Steaming heat coils for heating up marine heavy fuel oil," in *8th GRACM International Congress on Computational Mechanics*, Volos, 2015.
- [7] The Standard P&i Club, "A master's guide to: using fuel oil onboard ship," Londres, 2012.
- [8] R. M. Butler, G. S. M. Butler, and H. Y. Lo, "Theoretical studies on the gravity drainage of

- heavy oil during in-situ steam heating,” in *29th Canadian Chemical Engineering Conference in Sarnia*, Ontario, 1979.
- [9] Y. A. Cengel and J. M. Cimbala, *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones, Segunda ed.*, P. E. Roig, Ed. Mc Graw-Hill, México DF, 2012.
- [10] Y. Cengel and A. Ghajar, *Transferencia de calor y masa, Cuarta ed.*, P. E. Roig, Ed. Mc Graw-Hill, México D.F., 2012.
- [11] J. D. Anderson, Jr, *Computational Fluid Dynamics: An Introduction*. Springer, 2009.
- [12] B. McBride, S. Gordon, and M. Reno, “Coefficients for calculating thermodynamic and transport properties of individual species,” 1993.

MODELO DE PROCESOS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DEL ÁREA DE PRODUCCIÓN EN EL SECTOR DE LA INDUSTRIA CEMENTERA PÚBLICA DEL ECUADOR (MPIC)

MODEL PROCESSES TO AUTOMATE THE PRODUCTION IN CEMENT PUBLIC INDUSTRY OF ECUADOR (MPIC)

Diego Cordero-Guzmán^{1,*}, Edgar Chacón², Isael Sañay³, Deysi Criollo-Delgado⁴

Resumen

El integrar sistemas en la industria cementera es un requerimiento inminente, para lograrlo es necesario disponer de las herramientas metodológicas idóneas. El objetivo del artículo se orienta a proponer un marco metodológico que involucre aspectos técnicos, modelado de procesos de producción e integración con el resto de procesos del negocio. Se hace uso del paradigma holónico para modelar los procesos de producción mediante sus actividades y un conjunto de herramientas para la generación del esquema de integración el mismo que está basado en el holón Unidad de Producción.

Abstract

Systems integration is imperative for the cement industry; to achieve that, it is necessary to have technical and methodological adequate tools. The aim of this work is to propose and describe a methodological framework that involves production processes modeling and its integration with the business processes modeling. It is used the holonic paradigm to model the production processes and a set of technical tools to reach the integration schema, which is based on the Production Unit Holon.

^{1,*}Unidad Académica de Tecnología de la Información y Comunicación, Carrera de Ingeniería de Sistemas, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca – Ecuador. Autor para correspondencia ✉: dcordero@ucacue.edu.ec

²Dpto. de Computación, Escuela de Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida – Venezuela.

³Unidad Académica de Tecnología de la Información y Comunicación, Carrera de Ingeniería de Sistemas, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca – Ecuador.

⁴Unidad Académica de Tecnología de la información y comunicación, Carrera de Ingeniería de Sistemas, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca – Ecuador.

Recibido: 20-09-2016, aprobado tras revisión: 25-10-2016

Forma sugerida de citación: Cordero, D.; Chacón, E.; Sañay, I. y Criollo, D. (2016). «Modelo de procesos para la automatización del área de producción en el sector de la industria cementera pública del Ecuador (MPIC)». *INGENIUS*. N.º 16, (Julio-Diciembre). pp. 51-63. ISSN: 1390-650X.

La viabilidad de las actividades es analizada en tres aspectos: física, logística y económica; la física es evaluada mediante los modelos de productos y proceso; la logística mediante la disponibilidad de los recursos suministrados por las aplicaciones que manejan recursos necesarios para una actividad y el modelo proceso producto; la económica por el uso del ABC (Activity Based Costs), lo que permite establecer costos para cada producto.

Palabras clave: industria del cemento, modelado y control de sistemas de fabricación, sistemas holónicos de producción, automatización, redes de Petri.

The viability of activities is analyzed in three aspects: physical, logistical and economical; physical activity evaluation takes into account products and process models; logistical evaluates the availability of resources that are supplied by the *software* systems installed at the plant and, the economic viability using ABC approach, in order to calculate the estimated cost for each product.

Keywords: The cement industry, Modeling and control of manufacturing systems, Holonic production systems, automation systems, Petri nets.

1. Introducción

El origen de la industria del cemento en la región iberoamericana se remonta a 1895 [1], alcanzando hasta la actualidad un considerable nivel de crecimiento, pues entre América Latina, el Caribe, España y Portugal existen instalaciones fabriles en 29 países, donde operan 83 compañías productoras de cemento, con un crecimiento promedio del 5,10 % anual [2].

En el Ecuador, el desarrollo del sector de la construcción a partir del 2007, ha experimentado un crecimiento exponencial y seguirá siendo en los próximos 10 años un pilar importante para la economía ecuatoriana, esto implica una demanda sostenida de cemento [3]. Los antecedentes orientan a que la investigación se centre en los procesos productivos de la industria.

Por lo que el objetivo busca establecer modelos de procesos para la automatización del área de producción en el sector de la industria pública cementera del Ecuador, basado en las mejores prácticas.

El proceso investigativo contempla tres fases en su desarrollo: definir el modelo de procesos para el área de producción de la UCEM y sus dos plantas de producción cementera; control de las variables en las fases de implementación del modelo, a través de la generación de un prototipo; y la retroalimentación postimplementación del modelo.

2. Descripción del problema

Las empresas del sector público del Ecuador, enmarcadas dentro del programa del «Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017» apuntan a la incorporación de técnicas y tecnologías que incrementen la productividad en las organizaciones de producción.

El estudio se realizó como un caso de la Empresa Pública Cementera del Ecuador, en especial Cemento Chimborazo C. A. e Industrias Guapán S. A. Se han considerado experiencias y recomendaciones sobre las «mejores prácticas» de la industria conjugadas con nuevos conceptos de automatización integrada aplicada a la industria de procesos [4], [5].

En la actualidad, al interior de UCEM y sus dos plantas productivas, se carece de una integración lógica de los procesos de negocio con los de piso de planta, no se dispone de un modelo estándar que gestione las variables del proceso productivo, que trate los datos y los convierta en información útil para la toma de decisiones; no se tienen modelos matemáticos o de comportamiento para inferir rendimientos, para planificar o programar la producción.

Las herramientas de tipo informático que apoyan el área de producción no están integradas, existen varios aplicativos informáticos que registran parte de las variables del proceso, pero no tratan los datos de

manera adecuada, no hay un repositorio central de información que aglutine a través de un historiador los datos registrados por los equipos y maquinaria. La gestión del costo se la efectúa con ciertas imprecisiones por la no disponibilidad oportuna de información, y la estructura del sistema de costo a nivel de centros de costos que no permite determinar con exactitud los costos a nivel de actividad y el valor de los productos a lo largo de la cadena de producción. Los indicadores del área industrial son gestionados de forma global, por el nivel gerencial, estos no navegan a mayor nivel de detalle hacia las unidades productivas.

Sin embargo, no todo es negativo, pues se están juntando esfuerzos y tareas para la mejora del paradigma del modelo de producción existente en la actualidad en UCEM. En referencia a que la manufactura de cemento debe enfocarse principalmente a ser rentable, reducir el consumo de energía, incrementar el uso de combustibles alternativos, disminuir los costos fijos al máximo, ser responsable con el medioambiente. Para ello es preciso que el sector industrial público, y de manera concreta el de la producción cementera, impulse la mejora y eficiencia de sus procesos productivos, con una estandarización, reingeniería, optimización, automatización, adopción de mejores prácticas del sector de la industria, la integración de los procesos del negocio con los de piso de planta que lo vuelvan más competitivo, rentable y factible.

Ante la descripción del entorno del problema, cabe plantearse la pregunta de investigación:

¿Cómo deben interactuar los procesos productivos de la Empresa Pública Cementera del Ecuador para disponer de adecuados grados de eficiencia que aporten al cambio de la matriz productiva del país?

La solución al problema anticipa en primera instancia determinar un modelo holónico de procesos, que reúna un marco teórico aplicable a la ingeniería del producto.

3. Herramientas y técnicas para el modelado

3.1. Modelado empresarial

Para los investigadores [6], [7] un modelo de empresa es la representación de la estructura, procesos, actividades, información, recursos, personas, entradas, salidas, comportamiento, objetivos y restricciones de negocio en una entidad. La entidad de negocio puede ser a su vez parte de una empresa o grupo de empresas [8], [9].

El modelo de empresa busca como objetivos fundamentales [10], [11]: adquirir conocimiento sobre los procesos de la empresa; aprovechar este conocimiento en la reingeniería de procesos; soportar la toma de

decisiones; facilitar la interoperabilidad de los procesos; caracterizar la separación entre comportamiento (modelo de proceso) y funcionalidad (modelo de actividad).

Para el proceso de ingeniería del producto, existen varios marcos de referencia para modelado [12]. Así: CIMOSA (Open System Architecture for Computer Integrated Manufacturing), usado en empresas para integrar sus instalaciones y operaciones para enfrentar la competencia en precios, calidad y tiempos de entrega; GRAI y PERA, para empresas de actividad genérica; GERAM, soporta el modelado y las arquitecturas de referencia para la integración de empresa.

3.2. El modelo holónico

Los principios de modelado de los sistemas holónicos propuestos por [13], se resumen en holón, holarquía, autonomía, cooperación, ingeniería de producto holónico, atributos holónicos, holonomía, dominio de colaboración [14], [15]. La palabra holón resulta de la composición de dos términos holos que significa el todo y el sufijo on como parte. Holón puede ser descrito como «la parte de un todo», que a su vez puede ser visto como un «punto» [13], dentro de un cierto nivel de una jerarquía anidada conocida como holarquía [16]. El holón es semejante a una estructura fractal, estable, coherente y que consiste de varios holones y subestructuras, que a su vez son la parte de un gran componente [17]. De acuerdo con los atributos hay tendencias de los holones a actuar como entidades autónomas, que cooperan para formar una autoorganización jerárquica de sistemas [18]. Holonomía es la forma en la que un holón muestra sus atributos holónicos en una sociedad de holones. El dominio de colaboración es un conjunto de holarquías orientadas a un objetivo.

En un modelo de referencia para un proceso productivo se da la juntura de unidades holónicas de producción [19], donde la asociación de las diferentes fases del proceso de producción es una unidad de producción basada en el modelo de negocio, la cadena de valor y flujo de producto. Para el autor [20], cada unidad holónica de producción, posee las características propias de un holón: el «holón unidad de producción».

3.3. Cadena de valor

Según [21], considera las principales actividades de una empresa que añaden valor al producto a medida que este pasa por cada una de ellas. El desagregar una empresa en actividades, permite identificar de mejor manera fortalezas y debilidades en temas como ventajas competitivas y costos asociados a cada actividad. El uso de las cadenas de valor es la base para desarrollar modelos de los diferentes procesos de negocios que son específicos a la empresa. El flujo de producto se

constituye por las diferentes etapas de transformación que sigue un recurso hasta obtener un producto final; la unión de la cadena de valor más el flujo del producto da como resultado el flujo de producción. Se adjunta una representación gráfica en la Figura 1.

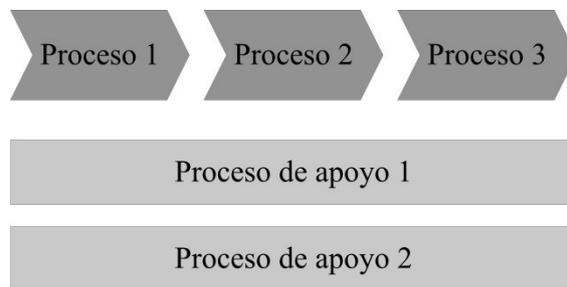


Figura 1. Cadena de valor

3.4. Determinación de las unidades de producción

Cada eslabón de la cadena de valor (entrada, proceso, salida) del flujo de producción se considera como una «unidad de producción», luego un proceso productivo es una composición de «unidades de producción» que se soportan entre sí y que contienen procesos para captura de recursos, transformación y almacenamiento de producto transformado [19], como se indica en la Figura 2.

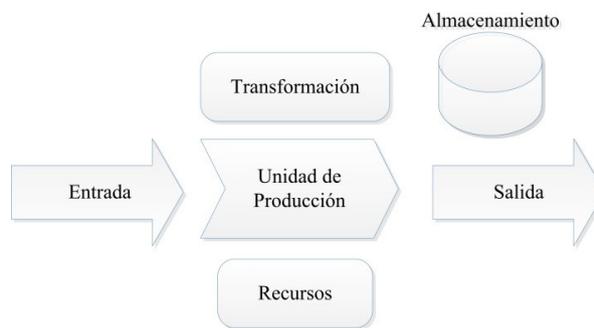


Figura 2. Unidad de producción como eslabón de la cadena de producción

El flujo de productos se puede hacer desde una unidad de producción a otra, es decir, las salidas de una unidad sirven de entradas a la siguiente, y así sucesivamente. Las unidades de producción pueden desarrollar de manera autónoma los objetivos asignados y han de cooperar unas con otras en la consecución del objetivo global. Cada unidad guarda las propiedades de un holón.

3.5. Juntura y estructura de la unidad de producción

La cadena de valor de una organización es la composición de varias unidades de producción, que se des-

pliegan sobre el nivel estratégico, táctico y operativo. Los autores [22], indican que cada unidad tiene procesos, cada proceso se compone de actividades, como se indica en la Figura 3. La ejecución del proceso está ubicada en el tiempo y la ejecución en el tiempo se da mediante actividades, que es el elemento central del modelado.

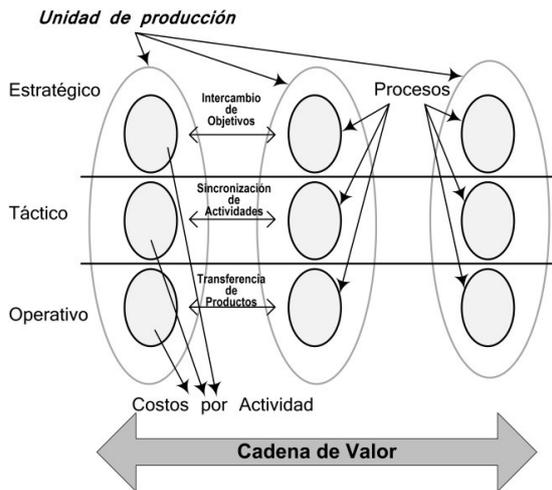


Figura 3. Juntura de las unidades de producción

El esquema secuencial de actividades permite cumplir un objetivo, cada actividad cumple objetivos específicos. Luego la actividad es el elemento a ser planificado, programado, controlado, evaluado en su rendimiento. Como referencia en [23] se expone un metamodelo empresarial centrado en actividades; ontologías como TOVE [24], [25], [26] y *Enterprise Ontology* [27] que basan el modelado de la empresa en actividades.

En los sistemas holónicos existe una estructura organizativa autosimilar y autoorganizada. Por medio de la autonomía se ejecutan un conjunto de actividades para alcanzar metas propias, y a través de la cooperación existe la capacidad de comunicación e interacción con los demás elementos del entorno, acción que conlleva a cumplir con metas comunes. Se ratifica el hecho de que el compromiso entre la autonomía y la cooperación de las unidades de producción se da al crearse las holarquías o dominios de cooperación [28], [29].

3.6. Esquema de toma de decisiones

La toma de decisiones al interior de la unidad de producción se apoya en los valores de los indicadores. Los mismos que se definen en función de las variables de producción que están siendo medidas en el tiempo. Es factible disponer de jerarquía de indicadores, como se indica en la Figura 4. Los estratégicos apoyan decisiones de orden estratégico, que pueden afectar no solo a la unidad de producción, sino a toda la cadena de suministro. Los tácticos apoyan toma de decisiones

intermedias y los operativos que se dan sobre aspectos de más bajo nivel. Los indicadores son instrumentos o herramientas que permiten a la unidad de producción: evaluar los resultados frente a sus objetivos, metas y responsabilidades; identificar oportunidades de mejora; alcanzar progreso en el tiempo [30].



Figura 4. Esquema de indicadores en la unidad de producción. Vista piramidal

3.7. Estrategia de implementación con aplicaciones informáticas

Hoy en día, las industrias se enfrentan a continuas presiones internas, para gestionar la complejidad y expulsar las ineficiencias. Se maneja el concepto de «empresa conectada», que implica la convergencia de la tecnología para el control de la información, de modo que se pueda tener acceso en tiempo real a los datos operacionales históricos, así como a los transaccionales de negocio para acortar los tiempos de respuesta hacia los clientes, asegurar disponibilidad de materia prima, mejorar la coordinación de la cadena de suministro y permitir una mejor colaboración entre el personal técnico [31]. Las soluciones de automatización y el *software* contribuyen a este objetivo. En una vista piramidal la unidad de producción holónica, es factible de implementarse sobre tres capas de automatización: ERP, MES y controles, como se indica en la Figura 5.



Figura 5. Capas de implementación de *software* para una unidad de producción

El ERP (Enterprise Resource Planning), hereda su nombre desde MRP (Material Resource Planning) y es un marco de trabajo para la integración total de todos los procesos del negocio que incluyen abastecimiento, administración de materia prima, producción, logística, mantenimiento, ventas, distribución, contabilidad, flujo de caja, control, planificación estratégica, gestión de la calidad. Se apoya en una solución de *software* que es altamente parametrizable, pudiendo ser configurada de manera modular para aplicaciones concretas técnico [31]. Mientras el ERP se encarga de la planificación a largo plazo, el MES (*Manufacturing Execution System*) se encarga de la planificación a corto plazo como lo indica [32], creando el puente entre la oficina y el piso de planta.

MESA (*Manufacturing Execution Systems Association*) tiene identificado once áreas funcionales distintas, para cubrir las necesidades de información básica de una industria. En la Figura 6, se muestra la posición del MES, el ERP y sistemas relacionados dentro de la jerarquía de una planta de producción.

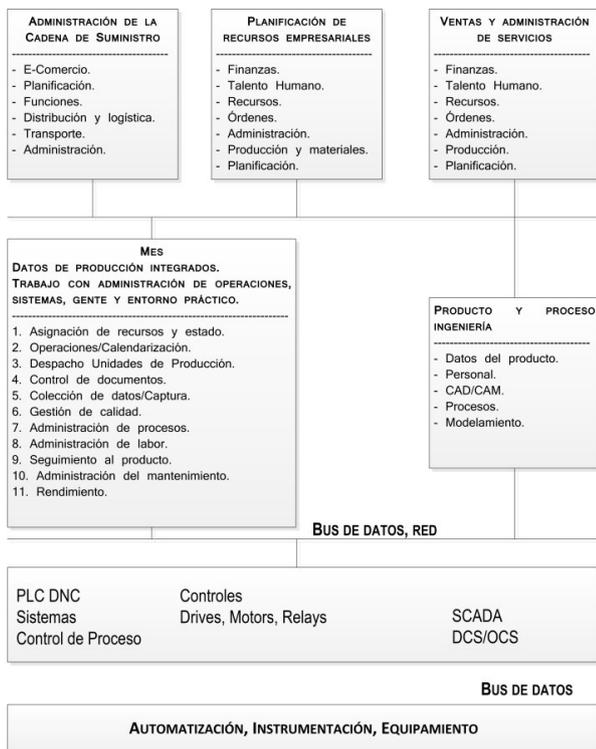


Figura 6. Modelo de información de planta de según MESA [33]

Usualmente hay solapamiento de algunos componentes, esto depende de la industria y el tipo de aplicación [33].

Un sistema para ejecución de manufactura (MES) gestiona operaciones, permite supervisar control de procesos, define estados de inicio de operaciones, ejecuta selección de rutas; sin embargo, debe manejar

todas las posibles salidas de procesamiento, y esta tarea en muchas de las ocasiones resulta compleja [34].

En [35], menciona los tres niveles de la jerarquía: ERP, MES y control, y los caracteriza como los niveles típicos desde el punto de vista de aplicaciones, independiente de si la planta compromete mayor número de niveles.

Dentro de los esquemas de automatización industrial, existe una proliferación de nuevos dispositivos y soluciones integradas disponibles en el mercado, utilizadas para mejorar las operaciones y eficiencia del mantenimiento, análisis de big data, que hacen uso de estándares de comunicación abiertos, normas de intercambio de datos y redes de alta fiabilidad [36]; estos aspectos se integran en la propuesta.

Cheng [37] propone una arquitectura para encadenar las aplicaciones de un MES; basado en el uso de CORBA. Nuevas tecnologías se han incorporado en la industria, desde el piso de planta hasta los más altos niveles de la organización. Estas nuevas tecnologías permiten realizar la integración de las aplicaciones mediante protocolos de Internet, descripción de procesos y mensajería con XML como menciona [38]. Varios autores [39], describen estas nuevas tecnologías para una implantación usando el enfoque SOA. Proveedores de soluciones utilizan estas tecnologías, lo que permite especificar el conjunto de aplicaciones a ser utilizadas para los manejos de los recursos, conocimiento de productos y de las órdenes siguiendo el paradigma holónico.

En la Figura 7 se muestra el esquema de integración basado en el paradigma holónico.

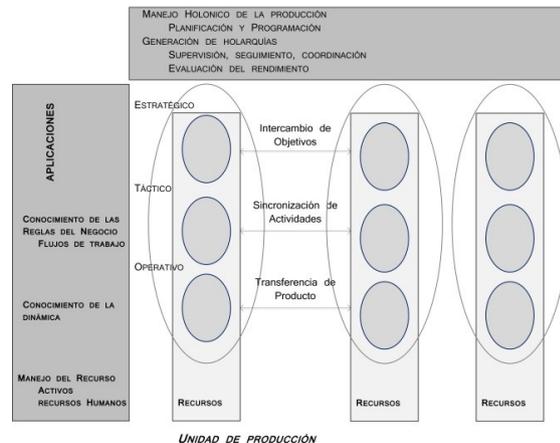


Figura 7. Mapa de integración de las aplicaciones

3.8. IDEF, UML, costo basado en actividades y redes de Petri

1) *IDEF*. En el modelado de procesos en la empresa y, especialmente en empresas de producción, el modelado

mediante el uso de IDEF* es ampliamente utilizado tal como se presenta en [40], [41].

La notación permite que las actividades se representen mediante un rectángulo, con entradas (izquierda) y salidas (derecha), que pueden ser de tipo información o físicas como un producto. En la parte inferior del rectángulo están los recursos usados y en el lado superior los controles que regulan las actividades, como se indica en la Figura 8.

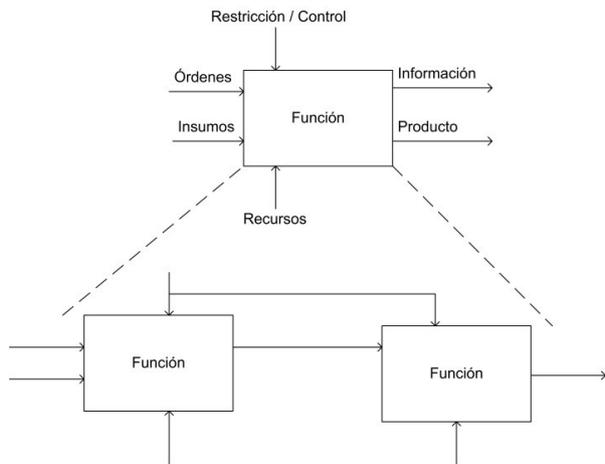


Figura 8. Notación gráfica de IDEF0

Cada actividad, a su vez puede descomponerse en un conjunto de actividades (subactividades), que contribuyen a describir con mayor detalle los pasos necesarios para completar la actividad padre que los contiene. Un modelo IDEF0 es una colección jerárquica de diagramas [42].

2) *UML (Lenguaje de Modelamiento Unificado)*. En función de la utilidad, UML dispone de elementos estructurales, de comportamiento, de agrupación y de anotación [43]. Para la documentación del modelo propuesto, se hará uso de elementos de notación estructurales como el diagrama de clases que incluye: clases y relaciones de composición, dependencia y asociación [44]. El uso complementario entre IDEF y UML está justificado como mencionan los investigadores [45], [46].

3) *Costeo basado en actividades*. Activity Based Costing se enfoca en concebir que la fabricación de determinado producto implique consumo de actividades, las mismas que consumen recursos. Está centrado en el aspecto cuantitativo y cualitativo de la «actividad», antes que en el centro de costo, departamento, sección o estructura organizativa [47]. Los pasos del costeo basado en la actividad [48] se sintetizan en: definir los objetivos de costos; asignar centros de costos (optativo); definir criterios para la distribución de costos indirectos; generar la distribución de costos indirectos por centro de costos; identificar actividades por centro de costos, los diagramas IDEF0 permiten hacerlo [49], [50], [51]; asignar costos a cada actividad;

en la Figura 9, se muestran el conjunto de entradas y salidas de la unidad funcional.

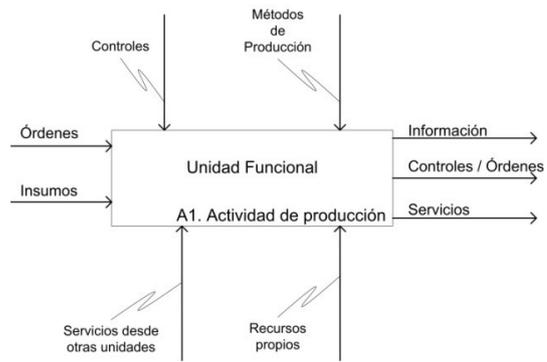


Figura 9. Entradas y salidas a una unidad funcional

Las distintas entradas tienen un costo asociado y las salidas tienen un valor asociado que es el resultado de todos los costos asociados: costos directos como los recursos, insumos y costos indirectos asociados a las órdenes, controles y servicios suministrados como se aprecia en la Figura 10.

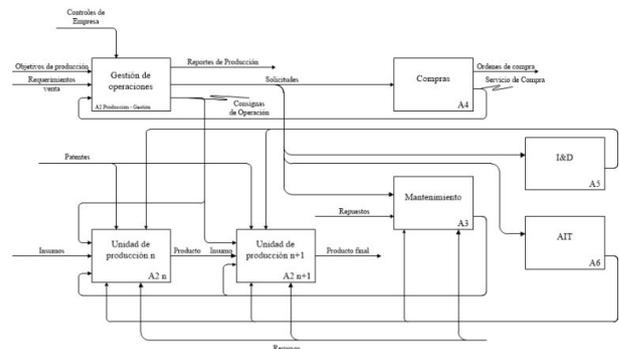


Figura 10. Transferencia de costos entre unidades funcionales

Este esquema permite conocer y actuar en concordancia para tratar de optimizar los costos de las distintas unidades funcionales, así como establecer el costo de cada producto y comparar con los valores promedio en el mercado.

4) *Redes de Petri*. Según [52], constituyen la vía formal para representar la dinámica de un sistema, y son de gran utilidad en la representación de procesos de negocio [53], así como en modelado del sistema de producción [54], [55], [56], [57], [58].

Es un grafo bipartito que contiene dos tipos de nodos: lugar que puede representar el estado de un proceso (iniciando, en operación; finalizado, transición), que representan un evento. En el caso de sistemas de producción, las redes de Petri pueden representar tanto el proceso de producción como el del negocio junto con su duración. Ver Figura 11.

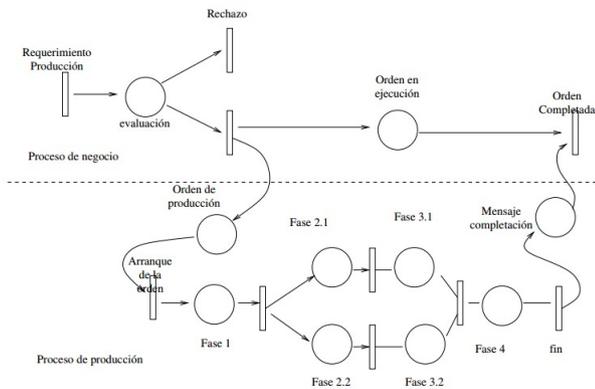


Figura 11. Notación en una red de Petri. Integración de procesos de negocio con procesos de producción

4. Construcción del modelo

4.1. Bases del Modelo

El modelo funcional propuesto para UCEM, consta de los siguientes componentes.

1) *Definición de la cadena de producción*

2) *Generación de los modelos IDEF* para cada una de las unidades de producción determinadas mediante la cadena de valor y las unidades de apoyo.

3) *Descripción de los procesos de cada unidad de producción.* Modelado de la dinámica interna de cada unidad. Para la dinámica continua se establecen estados discretos que representan fases – etapas de la dinámica continua y se construyen las redes de Petri asociadas.

Identificación de indicadores estratégicos, tácticos, operativos y de actividades por cada unidad de producción como elemento de integración vertical.

4) *Determinación de los procesos de negocio:* como elemento de integración horizontal (mecanismo de cooperación entre holones).

5) *Definición de la arquitectura de integración de software:* ERP, MES y control.

4.2. Modelo global

La producción del cemento implica la ejecución de fases que van transformando las materias primas en productos, los mismos que se convierten en insumos para las etapas siguientes, hasta llegar a obtener el producto terminado, que es destinado al mercado.

La cadena de producción de la cementera se muestra en la Figura 12. La primera fase del proceso corresponde a la extracción de la caliza y su transporte hasta la planta. La fase 2 consiste en la trituration de la caliza, que es la realización de la primera mezcla de calizas. La tercera fase es la prehomogeneización, que se realiza en el coliseo.

Para continuar con la etapa 4, denominada homogeneización de la caliza, en donde se agregan ciertos productos que van a garantizar que la mezcla a calcinarse cumpla con las características físico-químicas que den lugar a la producción de clínker de calidad, con el mayor rendimiento en el horno. La etapa 5 corresponde a la producción del clínker, elemento central en la producción del cemento y el mayor consumidor de energía. La etapa 6 implica la molienda del clínker, que se convierte en cemento y su correspondiente almacenamiento para despacho a granel o sacos. La etapa 7 corresponde al despacho del cemento.

El modelo IDEF0 de UCEM Planta Guapán se representa en la Figura 13. Los detalles de la representación de la dinámica, a través de los Diagramas de Petri, así como el desglose de los distintos niveles de indicadores dentro de las áreas funcionales, procesos, actividades y estructuras de costos ABC, son tareas corresponden a estados futuros de la investigación [59].

1) *Aplicaciones necesarias.* El conjunto de aplicaciones necesarias para el modelo planteado, son el manejo de recursos, activos físicos de producción, actividades de personal, materiales, conocimiento del producto y procesos, modelo del producto, los órdenes, sistema de laboratorio, sistema de control de ingreso-egreso de material, sistema de costeo a nivel de unidades, sistema de integración. En la Figura 14, se muestran las principales aplicaciones y sus relaciones.

4.3. Arquitectura de redes y servidores para la implantación

En la arquitectura de tecnologías de información y comunicaciones para la cementera se ha determinado los ambientes tal como se muestra en la Figura 15, y se observa la integración de las diferentes capas: ERP, MES y SCADA, el ERP y el MES deben estar en el mismo DATA CENTER, pero separadas por un *switch* para aislar el tráfico.

4.4. El elemento integrador

En la Figura 14 se resalta que el elemento central para la integración es el sistema de manejo de órdenes. Este sistema se basa en la posibilidad de establecer la planificación – programación de las actividades, el seguimiento de las mismas y la evaluación de los resultados de la ejecución de las órdenes. Este módulo incorpora el concepto holónico del manejo de la orden, mediante un mapa que relaciona los recursos con las aplicaciones de manejo de los recursos (sistema de manejo de activos y mantenimiento, sistema de manejo de personal y sistema de manejo bodegas) y asocia al equipamiento los modelos de proceso de cada equipamiento, los modelos de producto (rutas de producto). La planificación considera la viabilidad del

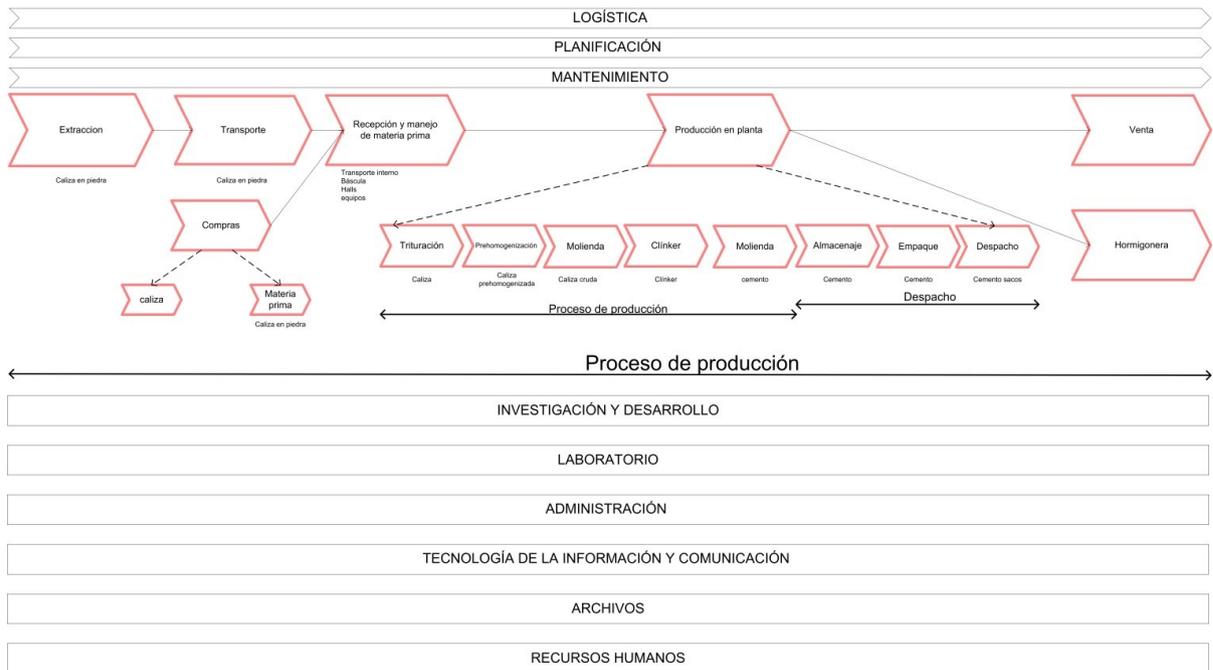


Figura 12. Cadena de producción de UCEM Planta Guapán

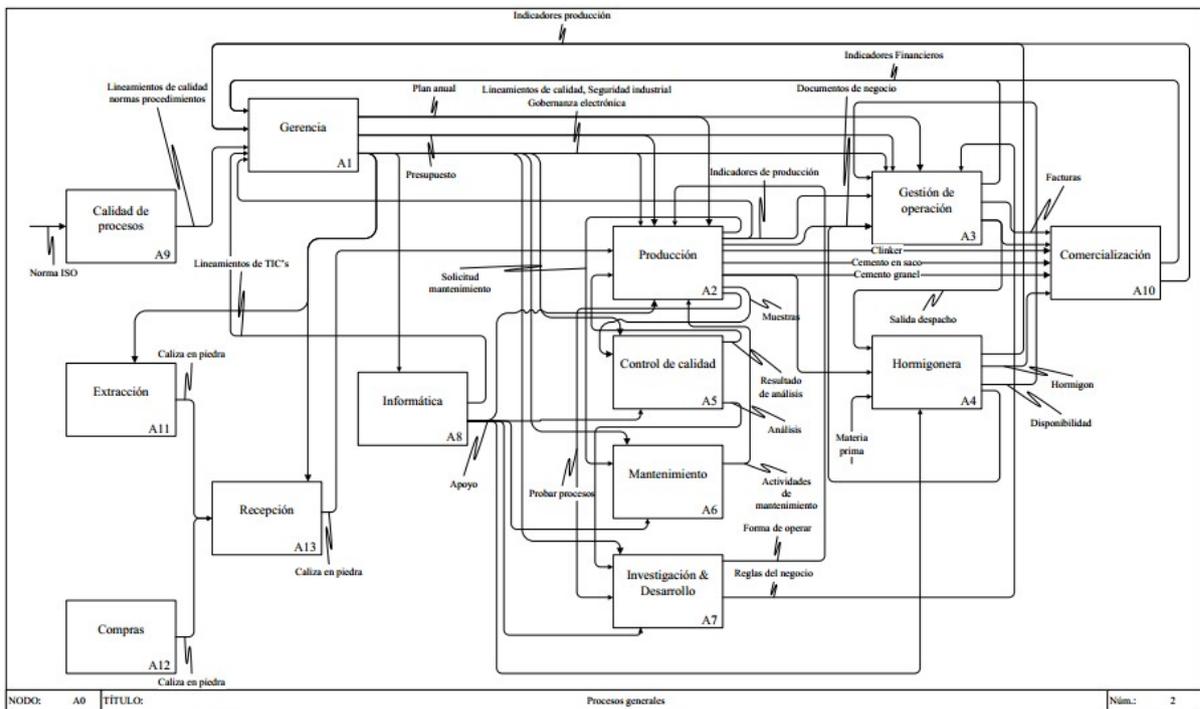


Figura 13. IDEF0 para UCEM Planta Guapán

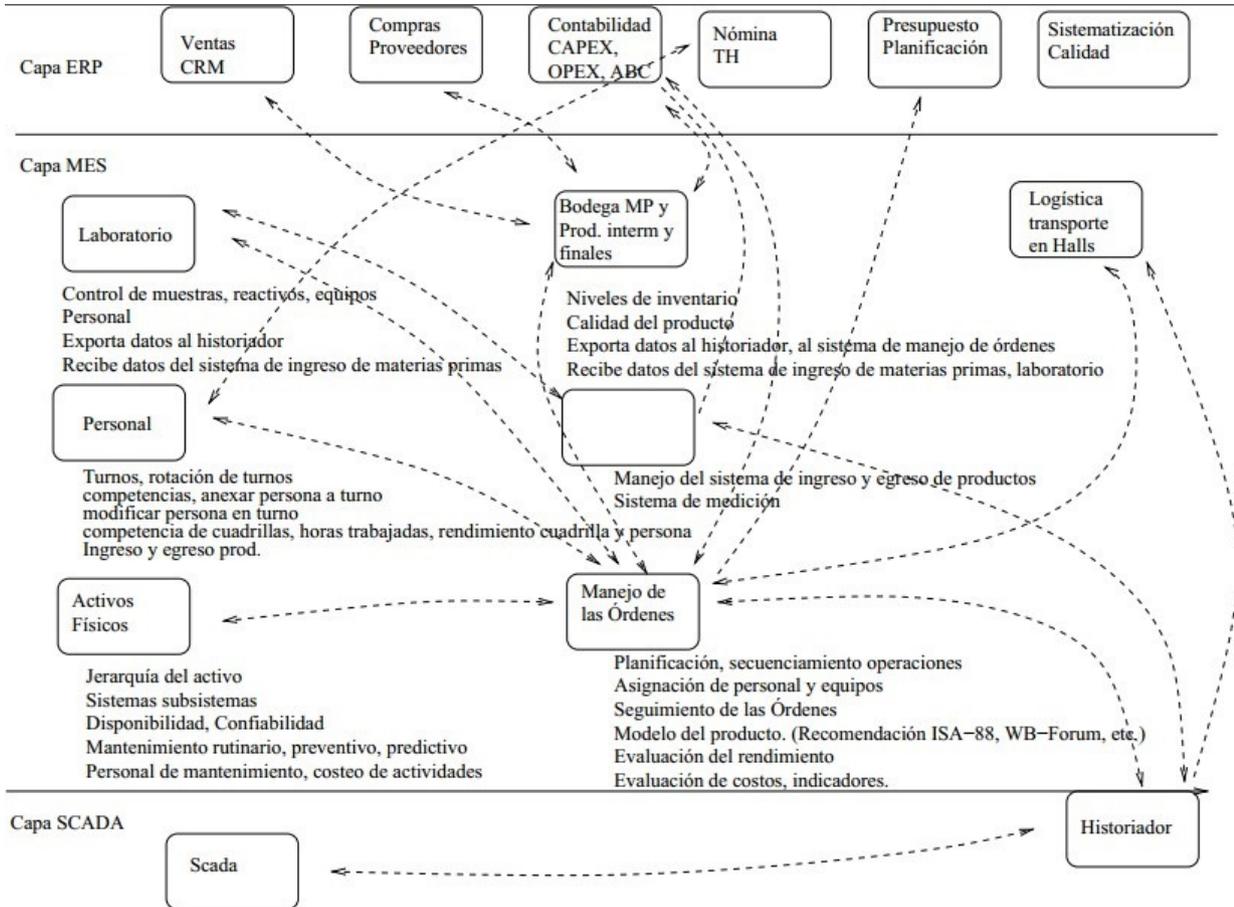


Figura 14. Lista de aplicaciones a instalarse

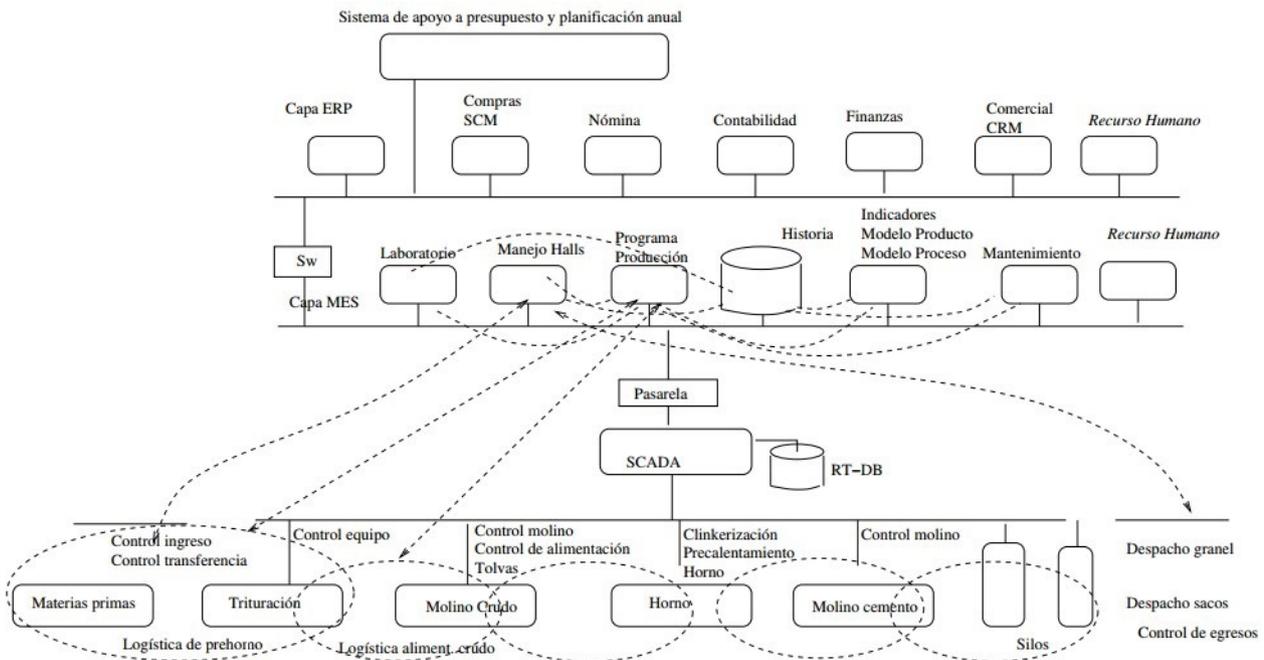


Figura 15. Arquitectura de integración

proceso desde tres puntos de vista: viabilidad física mediante la determinación de la condición de los recursos (equipamiento y personal) para ejecutar los procesos de un modelo de producto, viabilidad logística que evalúa la capacidad disponible de los recursos en un tiempo dado para satisfacer la orden y la viabilidad económica que resulta de la evaluación de los costos de cada actividad para cumplir una orden. El subsistema de seguimiento y coordinación de la orden en el momento de la ejecución. El subsistema de evaluación que utiliza los indicadores que permiten estimar el rendimiento de los procesos.

El elemento integrador interactúa con las aplicaciones de manejo de los recursos mediante un conjunto de servicios previamente establecidos (SOA) así como a los datos provenientes del SCADA, y suministra información a los sistemas administrativos, transformando la información de unidades funcionales como elementos de centros de costo. Para cada unidad funcional, el comportamiento es descrito mediante redes de Petri; y su dinámica depende de eventos internos de la unidad con elementos externos que permiten la coordinación entre las distintas unidades funcionales.

5. Conclusiones y futuros trabajos

El modelo propuesto es producto del conocimiento acumulado en instancias previas por una parte del equipo investigador y está sujeto a retroalimentación y ajuste en función de los resultados de la implantación en campo y de nuevo conocimiento en la comunidad científica.

El proceso de integración de los sistemas es responsabilidad de la organización, e implica compromiso del personal a todo nivel, y debe responder a una sistematización de los procesos para asegurar la disminución en la eliminación del desperdicio. Cobra esencial importancia la estandarización de procesos en referencia a las mejores prácticas de la industria en el sector, y estas mejores prácticas deben ser validadas según las especificaciones de la organización.

En el contexto tecnológico: automatización (procesos del negocio y de la planta), tecnologías de la información y telecomunicaciones se debe tener un lineamiento común. Esta experiencia hay en algunas empresas lo que lleva a la existencia de una organización que incluye los aspectos de estandarización en piso de planta, esquema de transferencia de información entre piso de planta – gestión de operaciones – procesos de negocio.

Actualmente, se tiene un prototipo del sistema de manejo de órdenes para validar el proceso de integración con sistemas comerciales para el manejo de los recursos.

En trabajos futuros concatenados con la fase actual, se prevé el análisis de control de las variables en

las fases de implementación del modelo, a través de la generación de un prototipo que servirá de guía al proceso de instalación definitiva del conjunto de aplicaciones a ser desarrolladas y adquiridas. El prototipo se convertirá en el elemento orquestador entre las aplicaciones de manejo de los recursos y las aplicaciones de control de los procesos en el piso de planta.

Referencias

- [1] X. Tafunell, “Los orígenes de la industria del cemento en América Latina,” Barcelona, 2000.
- [2] FICEM, “Informe estadístico 2013,” Lima, 2013.
- [3] INP, “Estudio básico de la industrial cementera en Ecuador,” Quito, 2011.
- [4] H. V. J. C. & M. E. H. Groenewald, “Cost-benefit to the cement industry by shifting evening load to off-peak periods. in industrial and commercial use of energy conference (ICUE),” in *IEEE*, 2012.
- [5] N. Putri and S. Kurnia, “The role of an organizational culture and individual towards knowledge,” in *IEEE*, 2016.
- [6] S. F. Mark and M. Gruninger, “Enterprise modeling,” *AI MAGAZINE*, vol. FALL 1998, pp. 109–121, 1998.
- [7] G. Berio and F. Vernadat, “Enterprise modelling with cimosa: functional and organizational aspects,” *Production planning & control*, vol. 12, no. 2, pp. 128–136, 2001.
- [8] A. Ortiz, F. Lario, and L. Ros, “Enterprise integration-business processes integrated management: a proposal for a methodology to develop enterprise integration programs,” *Computers in Industry*, vol. 40, no. 2, pp. 155–171, November 1999.
- [9] D. Chen and G. Doumeingts, “European initiatives to develop interoperability of enterprise applications-basic concepts, framework and roadmap,” *European initiatives to develop interoperability of enterprise applications-basic concepts, framework and roadmap*, vol. 27, no. 2, pp. 153–162, 2003.
- [10] E. C. AMICE, *CIMOSA: open system architecture for CIM*, 1st ed. Springer, Ed, 1993.
- [11] K. Mertins and R. Jochem, “Architectures, methods and tools for enterprise engineering,” *International Journal of Production Economics*, vol. 98, no. 2, pp. 179–188, November 2010.
- [12] A. Aguinaga, “Handbook of life cycle engineering: concepts, models and technologies,” Springer Science & Business Media, 1998.

- [13] A. Koestler, “Fundamento de termodinámica,” Arkama Books, 1989.
- [14] H. Van Brussel, J. Wyns, P. Valckenaers, L. Bonghaerts, and P. Patrick, “Reference architecture for holonic manufacturing systems: Prosa,” *Computers in Industry*, vol. 37, no. 3, pp. 255–274, November 1998.
- [15] S. Labs, “Reference architecture for holonic manufacturing systems - the key to support evolution and reconfiguration,” Katholieke Universiteit Leuven Faculteit Toegepaste Wetenschappen, 1999.
- [16] S. Grobbelaar and U. Mihaela, “Holonic stigmergy as a mechanism for engineering self-organizing,” in *3rd International Conference of Informatics in Control, Automation*, 2006.
- [17] M. Schillo and F. Klaus, “Holonic multi-agent systems,” *Manufacturing Systems*, vol. 8, pp. 538–550, 2002.
- [18] J. H. Christensen, “Holonic manufacturing systems: initial architecture and standards directions,” in *Proc 1st Euro Wkshp on Holonic Manufacturing Systems*, 1994.
- [19] E. Chacón, I. Besembel, D. Rivero, and J. Cardillo, “Embedded holonics systems in production process: holonic unit of production,” *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, vol. 32, no. 1, 2009.
- [20] J. Cardillo, E. Chacón, I. Besembel, and M. Rivero, “Unidad de producción como célula fundamental de los procesos holónicos de producción,” en *V Congreso de Automatización y Control, CAC 2005*, 2005.
- [21] E. Chacón, I. Besembel, F. Narciso, J. Montilva, and E. Colina, “An integration architecture for the automation of a continuous production complex,” *ISA transactions*, vol. 41, no. 1, pp. 95–113, 2002.
- [22] E. C. J. C. R. G. D. R. Chacón, “Metodología para la automatización integrada de procesos de producción basada en el enfoque holónico,” en *In Memorias del XIII Latin American Congress on Automation Control*, 2008.
- [23] G. Saulius and A. Lopata, “Approach to enterprise modelling for information systems engineering,” vol. 16, no. 2, pp. 175–193, 2005.
- [24] D. Borello, P. Venturini, F. Rispoli, and R. Saavedra, “A cost ontology for enterprise modelling. technical report,” University of Toronto, Toronto, 1994.
- [25] D. Tham and M. Fox, “Determining requirements and specifications of enterprise information systems for profitability,” ICEIS, 2004.
- [26] Y. J. Y. Jian, “Towards a hierarchical supply chain ontology,” in ICSSSM11, 2011.
- [27] P. Bouma, L. Somers, L. de Goey, and J. Nieuwenhuizen, “The enterprise ontology. technical report,” University of Edinburgh, Edinburgh, 1997.
- [28] J. Adrickson, E. Chacón, J. Amaya, M. Pavón, and A. Ramírez, “Arquitectura de automatización basada en holón industrial,” *Revista Científica UNET*, vol. 24, no. 1, pp. 31–44, 2011.
- [29] W. M. D. Covanich, “Assessing ease of reconfiguration of conventional and holonic manufacturing systems: Approach and case study,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 22, no. 7, pp. 1015–1024, 2009.
- [30] M. Sánchez Díaz, “Indicadores: Seguimiento a la gestión de la empresa,” en *V Foro Cerper*, Madrid, 2013.
- [31] J. Nesi. (2014, Junio) Isa. setting the standard for automation. [Online]. Available: <https://www.isa.org/intech/201406exec/>
- [32] P. V. B. H. Valckenaers, “Holonic manufacturing execution systems,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 1, pp. 427–432, 2008.
- [33] A. Chandler, “Mes explained: A high level vision,” *MESA International*, vol. 6, pp. 4–6, 1997.
- [34] P. Valckenaers and H. Van Brussel, “Holonic manufacturing execution systems,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 54, no. 1, pp. 427–432, 2005.
- [35] T. Sauter, “Integration aspects in automation - a technology survey,” in *Emerging Technologies and Factory Automation, 2005. ETFA 2005*, vol. 2. 10th IEEE Conference, 2005, p. 9.
- [36] B. Lydon, “Setting the standrad for automation,” *Intech-magazine*, March 2014.
- [37] A. Cheng-Leong, K. Li Pheng, and G. R. Keng Leng, “Idef*: a comprehensive modelling methodology for the development of manufacturing enterprise systems,” *International Journal of Production Research*, vol. 37, no. 17, pp. 3839–3858, 1999.
- [38] G. Morel, P. Valckenaers, J.-M. Faure, C. E. Pereira, and C. Diedrich, “Manufacturing plant control challenges and issues,” *Control Engineering Practice*, vol. 15, no. 11, pp. 1321–1331, 2003.

- [39] C. Morariu, O. Morariu, and T. Borangiu, "Offer request management in service oriented holonic manufacturing," *U.P.B Sci. Bull. Series d*, vol. 76, no. 1, p. 276, 2014.
- [40] K. Cheng-Leong, L. Pheng, and G. R. Keng Leng, "IDEF*: a comprehensive modelling methodology for the development of manufacturing enterprise systems," *International Journal of Production Research*, pp. 3839–3858, 1999.
- [41] H. Cho, "Integrated framework of idef modelling methods for structured design of shop floor control systems," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 12, no. 2, pp. 113–128, 1999.
- [42] C. Menzel and R. J. Mayer, "The idef family of languages," in *Handbook on architectures of information systems*, 1998, pp. 209–241.
- [43] R. Alarcón, "Modeling concepts for pulse jet filtration," Grupo Eidos, 2000.
- [44] P. E. De la Cruz Vélez, D. E. B. Loayza, M. R. Huamán, and Others, "Documentación de proyectos con uml 2," *Revista de investigación de Sistemas e Informática*, vol. 7, no. 1, pp. 27–36, 2005.
- [45] S.-H. Kim and K.-J. Jang, "Designing performance analysis and idef0 for enterprise modelling," *International Journal of Production Economics*, vol. 76, pp. 121–133, 2008.
- [46] R. H. Kim, C.-H. ans Weston, A. Hodgson, and K.-H. Lee, "The complementary use of idef and uml modelling approaches," *Computers in Industry*, vol. 50, no. 1, pp. 35–56, 2003.
- [47] Environmental Protection Agency (EPA), "Mechanical collectors," Universidad de Cuenca, Cuenca, 2008.
- [48] J. O. A. J. A. Cuervo Tafur, "Costos basados en la actividad," Colección: Textos universitarios (Colombia), 2007.
- [49] T. A. Spedding and G. Sun, "Application of discrete event simulation to the activity based costing of manufacturing systems," *Application of discrete event simulation to the activity based costing of manufacturing systems*, vol. 58, no. 3, pp. 289–301, 2012.
- [50] I. Tatsiopoulos and N. Panayiotou, "The integration of activity based costing and enterprise modeling for reengineering purposes," *International Journal of Production Economics*, vol. 66, no. 1, pp. 33–44, 2012.
- [51] D. Ben-Arieh and L. Qian, "Activity-based cost management for design and development stage," *International Journal of Production Economics*, vol. 83, no. 2, 2003.
- [52] T. Murata, "Petri nets: Properties, analysis and applications," *IEEE*, vol. 77, no. 4, 1989.
- [53] S. Wang, W. Shen, and Q. Hao, "An agent-based web service workflow model for inter-enterprise collaboration," *Expert Systems with Applications*, vol. 31, no. 4, pp. 787–799, 2014.
- [54] R. David and H. Alla, "Discrete event dynamic systems: Theory and applications," *On hybrid petri nets*, Springer, vol. 11, no. 9-40, 2001.
- [55] H. Alla and R. David, "Discrete, continuous, and hybrid Petri nets," Springer, 2005.
- [56] U. Feurer and R. Wunderlin, "Fundamentals of solidification," 17th IFAC World Congress, Seoul, South Korea, 2008.
- [57] D. Lefebvre, C. Delherm, E. Leclercq, and F. Druaux, "Some contributions with Petri nets for the modelling, analysis and control of HDS," *Energy Fuels*, vol. 1, pp. 451–465, 2007.
- [58] W. M. Wonham, "Supervisory control of discrete-event systems," *University of Toronto*, pp. 1396–1404, 2014.
- [59] E. Chacón and J. Cardillo, "Models for planning and supervisory control for the feeding raw material in cement production," 2016.

DESEMPEÑO ANTE LA CORROSIÓN Y TRIBOCORROSIÓN DE ALEACIONES COMERCIALES DE ALUMINIO ANODIZADAS

CORROSION AND TRIBOCORROSION PERFORMANCE OF COMMERCIAL ANODIZED ALUMINUM ALLOYS

Samantha Rodríguez¹, Edwuin J. Carrasquero^{2,*}, Luis M. López³ y Jorge I. Fajardo³

Resumen

El presente trabajo muestra la evaluación del desempeño de dos aleaciones comerciales de aluminio anodizadas ante la corrosión y tribocorrosión. Para el anodizado se emplearon dos tipos de electrolitos distintos (H_2SO_4 y $H_2C_2O_4$), un valor constante de densidad de corriente y dos tiempos de anodizado (30 y 45 minutos). Usando una de las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) y espectroscopía por dispersión de la energía de rayos X (EDX) se caracterizaron las aleaciones y la morfología de las superficies formadas en las capas de óxido para las condiciones establecidas. Se encontraron diferencias notables entre la condición de anodizado (A1) a 45 minutos en H_2SO_4 para la aleación AA6061, y la condición de anodizado (D1) para el mismo tiempo en $H_2C_2O_4$ para la aleación AA8011. En la condición de anodizado (A1) se encontró la formación de la morfología tipo *smudge* distintiva de la solución electrolítica utilizada, con un espesor promedio de capa anódica de $5,95 \pm 0,02 \mu m$, mientras que, para la condición de anodizado (D1) se obtuvo un espesor de $3,14 \pm 0,02 \mu m$, con la aparición de cavidades en toda la extensión de su superficie.

Abstract

In this work were studied two commercial anodized aluminum alloys under conditions of corrosion and tribocorrosion. For two different types of anodizing electrolyte (H_2SO_4 and $H_2C_2O_4$), a constant value of current density and two anodizing time (30 and 45 minutes) were used. Using techniques of Scanning Electron Microscopy (SEM) with Spectroscopy Energy Dispersive X-Ray (EDS) coupled, were characterized the alloys and morphologies of the surfaces formed in the oxide layers. Results obtained show large differences between the condition of anodized (A1) in sulfuric acid for 45 minutes in AA6061 alloy and anodized condition (D1) for the same time in oxalic acid for alloy AA8011. For sample (A1), the results reveals the formation of a morphology named "*smudge*" which is characteristic of the electrolytic solution used and for this case the average thickness was $5,95 \pm 0,02 \mu m$. For sample (D1), the average thickness was $3,14 \pm 0,02 \mu m$ and revealing the generation of cavities along all surface area.

¹Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas – Venezuela.

^{2,*}Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales, Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Caracas – Venezuela. Autor para correspondencia ✉: carrasqe@gmail.com/edwuin.carrasquero@ucv.ve

³Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Procesos de Transformación (GIMAT – CIDII), Carrera de Ingeniería Mecánica, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca – Ecuador.

Recibido: 21-09-2016, aprobado tras revisión: 27-10-2016

Forma sugerida de citación: Rodríguez, S.; Carrasquero, E.; López, L. y Fajardo, J. (2016). «Desempeño ante la corrosión y tribocorrosión de aleaciones comerciales de aluminio anodizadas». INGENIUS. N.º 16, (Julio-Diciembre). pp. 64-72. ISSN: 1390-650X.

Tanto para los ensayos de corrosión en cámara de niebla salina, electroquímicos de polarización potenciodinámica y tribocorrosión, se encontró que el mejor desempeño fue registrado en la condición de anodizado (A1), con una menor ganancia promedio de masa, densidad de corriente de corrosión y coeficiente de fricción. Todas las condiciones de anodizado mejoraron el comportamiento ante ensayos de degradación acelerada, en comparación con las muestras no anodizadas.

Palabras clave: anodizado, aluminio, corrosión, tribocorrosión.

Both corrosion tests in salt spray chamber, electrochemical potentiodynamic polarization and tribocorrosion found that the best behavior was obtained for sample (A1), with lower, average mass gain, corrosion current density and friction coefficient. The performance in all anodizing conditions was improved comparing against samples without anodized.

Keywords: Anodizing, Aluminum, Corrosion, Tribocorrosion

1. Introducción

El anodizado es usado frecuentemente para proteger al aluminio de los fenómenos de desgaste y corrosión, siendo su uso principal en aplicaciones decorativas, con la posibilidad de ser coloreado en una amplia variedad de tonos. Las aleaciones de aluminio son unas de las más utilizadas a nivel industrial para la aplicación de un anodizado, aunque en una menor escala también las de titanio, tántalo y niobio son anodizados [1], [2]. Las propiedades anticorrosivas del aluminio se incrementan por el proceso de anodizado, que se basa en la técnica de oxidación anódica, donde el espesor de la capa de óxido es unos cuatro órdenes de magnitud mayor que el obtenido en los procesos de oxidación natural. La oxidación anódica del aluminio consiste en la obtención de una capa de óxido sobre la superficie metálica en el seno de un electrolito, con la participación de una fuente externa de corriente [3]. Cuando se establece un potencial entre los electrodos de la celda electrolítica, los aniones cargados negativamente migran hacia el ánodo donde se descargan con pérdida de uno o más electrones.

Los electrolitos más comunes utilizados en el proceso de anodizado se elaboran con ácido sulfúrico, pero en la industria del aluminio también se emplean otros ácidos como el crómico, fosfórico y oxálico [4].

Las características morfológicas finales de la capa anódica dependen de distintos parámetros tales como la densidad de corriente, temperatura, tiempo de inmersión, área superficial, concentración y tipo de electrolito utilizados. El anodizado mejora la capacidad de resistencia de las superficies de aluminio con respecto a las influencias externas atmosféricas y al ataque por sustancias químicas [5]. Las propiedades mecánicas de los anodizados son de gran importancia y por medio del estudio del coeficiente de fricción de la superficie anodizada se hace posible comparar de manera cualitativa cuanto es la resistencia relativa de esta capa de óxido ante la tribocorrosión [6].

Para el estudio de estos recubrimientos, se realizan ensayos de corrosión, entre los cuales se encuentran técnicas electroquímicas como los ensayos de polarización, resistencia a la polarización y potencial a circuito abierto [7], así como ensayos en cámara de niebla salina y ensayos de desgaste. Actualmente, es de especial interés conocer el efecto combinado del desgaste y la corrosión, lo cual constituye el 5 % de las causas de fallos de los elementos de máquinas en el sector industrial, situándolo en el quinto puesto de los mecanismos de degradación más importantes en los términos del coste por fallo prematuro. Por estos motivos, el fenómeno de tribocorrosión ha sido foco de investigación en los últimos años, según la necesidad de seleccionar o diseñar nuevas superficies para así minimizar los costes de funcionamiento, y prolongar la vida útil del

componente. Es de interés el caso particular de superficies anodizadas utilizadas en perfiles estructurales de ventanas o puertas donde pueden estar sometidas a desgaste por deslizamiento y que generen daño de la capa promoviendo el fenómeno de desgaste. El objetivo de la presente investigación es estudiar el desempeño de dos aleaciones comerciales de aluminio (AA6061 y AA8011) modificadas con distintas condiciones de anodizado, y su evaluación mediante ensayos de resistencia a la corrosión y tribocorrosión.

Usando una de las técnicas de microscopía electrónica de barrido (MEB) con espectroscopia por dispersión en la energía de rayos (EDX) se caracterizaron las morfologías superficiales de las capas de óxido, con el fin de conocer el comportamiento de estas aleaciones de aluminio, que son ampliamente utilizadas en la industria en diversas aplicaciones, sometidas a condiciones y mecanismos de desgaste corrosivos altamente degradantes.

2. Experimental

Las aleaciones de aluminio utilizadas en este estudio fueron láminas de dimensiones de 20 x 150 x 1 mm de aluminio comercial AA6061 y AA8011. En la Tabla 1 se muestra la composición química nominal respectivas.

Tabla 1. Composición química nominal de las aleaciones de aluminio AA6061 y AA8011 [8]

Contenido (%)	Si	Fe	Cu	Mg	Mn
AA6061	0,40-0,80	0,7	0,15-0,40	0,80-1,20	-
AA8011	0,50-0,90	0,60-1,00	0,10 máx.	0,05 máx.	0,20 máx.

Para la caracterización microestructural de estas aleaciones se realizó en primer lugar, una preparación metalográfica, posteriormente, fueron atacadas con una solución de ácido fluorhídrico al 2 % v/v para el revelado de las fases presentes en la microestructura. El proceso de anodizado se realizó para cada tipo de aleación bajo distintas condiciones experimentales presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2. Matriz experimental del proceso de anodizado

Electrolito	Aleación	Tiempo (min)	Identificación
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄)	AA6061	45	A1
		30	A2
	AA8011	45	B1
		30	B2
Ácido oxálico (H ₂ C ₂ O ₄)	AA6061	45	C1
		30	C2
	AA8011	45	D1
		30	D2

Se emplearon dos electrolitos distintos: ácido sulfúrico (H₂SO₄) con una concentración al

18 % en v/v y ácido oxálico ($\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$) con una concentración de 40 g/l. Se fijaron dos valores de tiempo de inmersión 30 y 45 min, a temperatura ambiente (26 ± 2 °C). La densidad de corriente utilizada fue de $1,2 \text{ A/dm}^2$, utilizando como cátodo láminas de acero inoxidable de dimensiones $20 \times 200 \times 1$ mm. Cabe destacar que el proceso de anodización fue realizado en disposición de celdas conectadas en serie, estableciendo valores de voltaje entre 35-40 V. Antes del proceso de anodizado se realizó la preparación superficial de las muestras, en primer lugar se desengrasaron sumergiéndolas durante 5 min en una disolución acuosa de ácidos fosfórico y crómico en concentraciones de 250 y 55 g/l, respectivamente; a una temperatura de 35 °C.

Posteriormente, se decaparon en una solución acuosa de hidróxido de sodio de 100 g/l a 45 °C durante 60 s y se neutralizaron por inmersión durante unos segundos en la misma disolución usada para desengrasar. Para finalizar el proceso de anodizado, a las probetas se les aplicó un sellado hidrotérmico, en agua desionizada a la temperatura de ebullición, durante 60 min, por ser un tiempo suficiente para conseguir los índices de calidad reportados en [9]. Se realizaron los ensayos en cámara de niebla salina según lo establecido en la norma ASTM B117 [10], por duplicado para cada condición, a través de un equipo marca *HARSHAW* modelo 22, a una temperatura de 35 ± 1 °C y tiempo de exposición de 120 h.

Se efectuaron ensayos electroquímicos de polarización potenciodinámica con un equipo potencioestato/galvanostato marca *CM Instruments*, modelo GillAC, según la norma ASTM G59-97 [11], disponiendo la celda electroquímica de un electrodo de referencia de calomelano saturado (SCE) y un contra electrodo de grafito, los ensayos se realizaron a temperatura ambiente en solución salina al 3,5 % p/p de NaCl, empleando un barrido de potencial desde -400 mV hasta 1500 mV a una velocidad de 1 mV/s. Los ensayos de tribocorrosión se realizaron a temperatura ambiente de acuerdo con la norma ASTM G119 [12], haciendo uso de un tribómetro marca *MicroTest* modelo MT4002, bajo la configuración bola sobre disco, con una carga normal 2N, una distancia de deslizamiento de 125 m, un radio de contacto de 5 mm, velocidad de rotación de 100 r. p. m. y utilizando como contraparte bolas de 6 mm de diámetro de alúmina.

Este tribómetro tiene acoplado un potencioestato marca *AMEL Instruments* modelo 2049, que emplea un electrodo de referencia Ag/AgCl y un contra electrodo de grafito, se empleó la misma solución de NaCl de los ensayos potenciodinámicos. En estos ensayos sinérgicos, se destaca la inducción de corriente cero, con la medición del potencial libre de corrosión de cada muestra ensayada. Finalmente, a través del uso de un microscopio óptico marca *Olympus* y de un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca *Hitachi*

S-2400 con un espectrómetro de por dispersión en la energía de rayos-X (EDX), se realizó la medición de los espesores a través de la sección transversal de las muestras, se caracterizaron las aleaciones y la morfología de las superficies formadas en las capas de óxido para las condiciones establecidas, se identificaron los productos de corrosión y tribocorrosión en las superficies de las muestras.

3. Resultados y discusión

En las Figuras 1a y 1b se presentan las fotomicrografías obtenidas por MEB correspondientes a la caracterización microestructural de las aleaciones de aluminio sin anodizar AA6061 y AA8011, respectivamente. En ambas figuras se corroboró por análisis puntuales por EDX la presencia de fases intermetálicas, las cuales están uniformemente distribuidas en la matriz, estas fases señaladas como 1 y 2 en la Figura 1a corresponden a fases ricas en Si y Mg, respectivamente. Mientras que, en la Figura 1b para la aleación AA8011 las fases indicadas como 1 refieren a una fase rica en Fe.

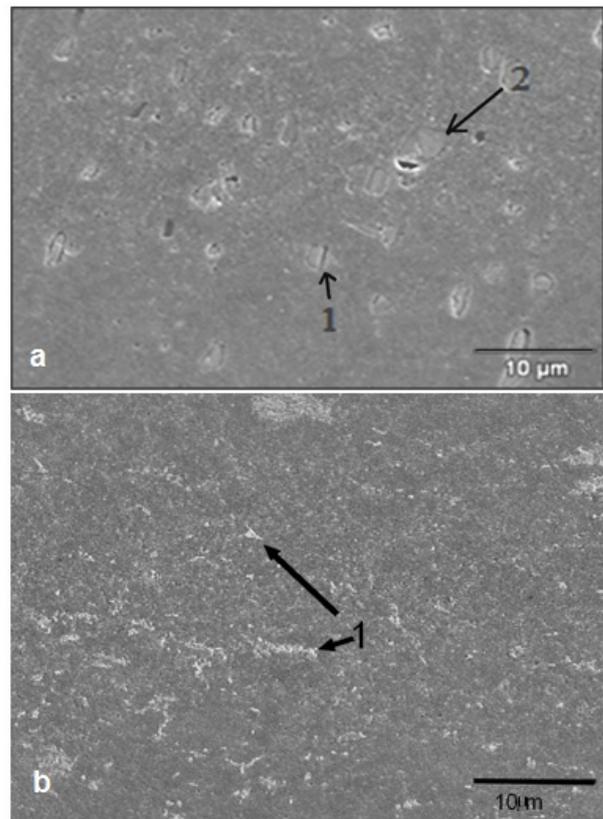


Figura 1. Fotomicrografía de la microestructura: a) AA6061; b) AA8011. MEB-SE (1000X)

En la Tabla 3, se indica los valores promedios de los espesores obtenidos para cada una de las condiciones de anodizado, para el mayor tiempo de inmersión (45 min). Se determinó que el mayor espesor de la capa

anódica se logró con un mayor tiempo de anodización (45 min) para todas las condiciones sometidas al proceso.

Tabla 3. Espesores promedios de las capas anodizadas

Condición	Espesor promedio (μm).
A1	$5,95 \pm 0,02$
B1	$1,31 \pm 0,02$
C1	$4,27 \pm 0,02$
D1	$3,14 \pm 0,02$

Los mayores valores promedio de espesor de la capa anódica, correspondieron a las muestras anodizadas de AA6061 obtenidas para ambos electrolitos, siendo 40 % mayor en ácido sulfúrico en comparación al oxálico, en caso contrario para la AA8011 los mayores espesores encontrados correspondieron cuando se utilizó como electrolito el ácido oxálico, obteniéndose un incremento del 140 % con respecto al sulfúrico. Aunque en algunas condiciones no se alcanzaron los valores de espesor de capa anódica esperados, en la mayoría de las condiciones establecidas se obtuvieron valores cercanos a los adecuados de recubrimiento anódico en correspondencia con el rango establecido [13] de bajas densidades de corriente y para el número de muestras anodizadas en serie.

En la Figura 2, se muestra las superficies y secciones transversales de las probetas anodizadas para las distintas condiciones experimentales.

Como se puede observar en esta figura se encontró diferencias marcadas en la morfología superficial entre la condición de anodizado (A1) para la aleación AA6061 en ácido sulfúrico durante 45 minutos y la condición de anodizado (C1) para esta misma aleación en ácido oxálico a igual tiempo. Para la condición de anodizado (A1) (Figura 2a y 2b), se encontró una estructura propia del anodizado en ácido sulfúrico, correspondiente a cristales de diversas características y tamaños, conocida en la literatura como tipo *smudge* originada por la precipitación del aluminio durante la reacción de sellado hidrotérmico [14].

A través de los análisis puntuales por EDX realizados para esta condición, se registró la presencia de una mayor relación en concentración atómica porcentual de Al y O en comparación con los restantes análisis por EDX obtenidos, lo cual puede relacionarse con la preponderante interacción entre el agua y la pared de las celdas con una posible formación de bayerita ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ [1], registrándose también la presencia de azufre proveniente de la contaminación del ácido sulfúrico. No obstante, para la condición de anodizado (D1), se obtuvo una menor relación Al-O, indicativo de la deficiente formación de la capa anódica sobre el sustrato.

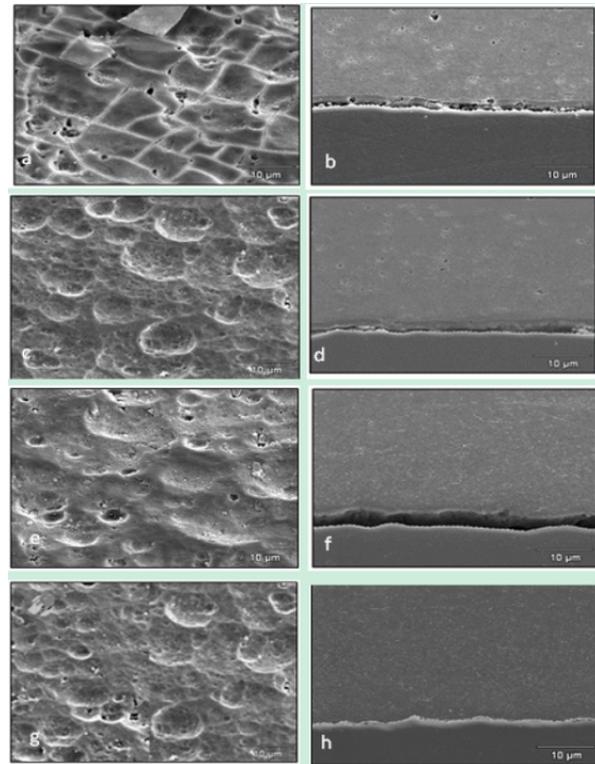


Figura 2. Fotomicrografía por MEB. (1000 X) de las superficies y secciones transversales de las muestras anodizada: (a y b) Condición A1; (c y d) Condición B1; (e y f) Condición C1; (g y h) Condición D1. (Tiempo: 45 min)

En general, la apariencia de las superficies anodizadas para esta condición es heterogénea con la presencia de microcavidades, lo cual es indicativo de una condición no fue eficiente el sellado hidrotérmico. No se observó la característica morfología de crecimiento en columnas de celdillas hexagonales por ser esta más común en recubrimientos no sellados. Según se evidenció en las fotomicrografías de las secciones transversales las capas anódicas más homogéneas y con mejor adherencia con el sustrato correspondió a la AA8011 en ambos tipos de electrolito (Figura 2d y 2h).

Sin embargo, el mayor espesor del recubrimiento anódico, observado en la sección transversal de las muestras, corresponde a la aleación AA6061, en comparación a la aleación AA8011; esto puede deberse a la conductividad de los iones presentes por parte de la primera aleación y los precipitados presentes en ella que contribuyen a la formación de la película de óxido a través del proceso de anodizado. De acuerdo con estos resultados se evaluaron su resistencia a la corrosión y tribocorrosión solo las muestras anodizadas de mayor espesor (condición (A1) y (D1)) y compararlas con respecto a ambas aleaciones sin anodizar.

En la Figura 3, se exhiben los valores de ganancia de masa de las muestras anodizadas y para los sustratos sin anodizar, correspondientes a los ensayos en cámara de niebla salina, mientras que las fotomicro-

grafías por MEB de la morfología de las superficies expuestas a este ensayo se muestran en la Figura 4.

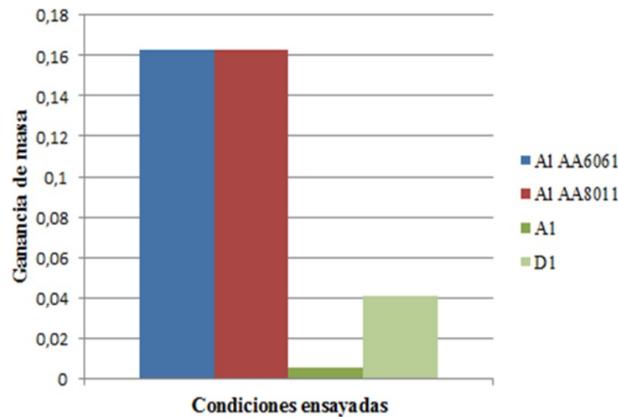


Figura 3. Ganancia de masa promedio en cámara de niebla salina para las muestras ensayadas

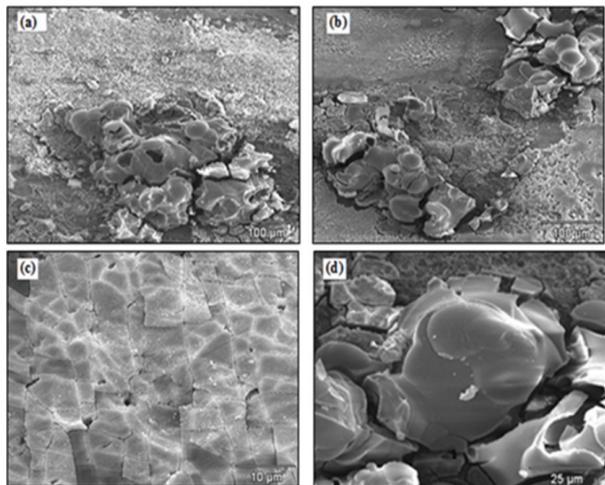


Figura 4. Fotomicrografías superficiales de las muestras ensayadas en cámara de niebla salina. (a) AA6061 sin anodizar, (b) AA8011 sin anodizar, (c) A1, (d) D1

Los valores potencial de corrosión (E_{corr}), densidad de corriente de corrosión (I_{corr}) y resistencia a la polarización (R_p) obtenidos de los ensayos electroquímicos de polarización potenciodinámica, se indican en la Tabla 4.

Tabla 4. Potencial de corrosión, densidad de corriente de corrosión, y resistencia a la polarización de los sustratos y muestras anodizadas

Identificación	E_{corr} (mV)	I_{corr} ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	R_p ($\Omega\cdot\text{cm}^2$)
AA6061	-809,17	379,28	8,39
AA8011	-995,29	337,43	10,61
Condición A1	-805,84	110,12	160,16
Condición D1	-952,25	302,12	12,17

En cuanto los sustratos, los valores de I_{corr} para ambas aleaciones son similares y mayores. Por MEB se

identificó en ambas aleaciones un mecanismo de corrosión generalizada, sin rastro de la superficie original de cada una, lo que corrobora la notable disolución del sustrato, el cual inicia en la corrosión localizada asociada a un mecanismo de ruptura de la película de óxido natural y el ingreso de los iones cloruro provenientes de la solución salina. Con respecto a la condición (A1), se observa una mejoría sobresaliente en cuanto a resistencia a la corrosión se refiere, en comparación con los valores obtenidos para el sustrato, lo cual se verifica con la disminución de la velocidad de corrosión en un 50 % aproximadamente, y con el mayor valor de R_p .

Para esta condición de anodizado, la capa de óxido formada proporcionó resistencia adecuada a la corrosión electroquímica como fue reportado por Li *et al.*, [7] para condiciones de deposición similares, aunque se puede notar signos de corrosión superficial en algunas zonas, no tan incidente en comparación a la establecida en el sustrato, con la presencia de picaduras y grietas en algunas regiones con atrapamiento de azufre. Con respecto a la condición (D1), se pudo notar un menor desempeño contra la corrosión, lo cual se corrobora por un valor de I_{corr} semejante al obtenido para el sustrato (AA8011), así como también por el grave deterioro superficial presentado, el cual se debe a una mayor facilidad en la salida de iones Al^{+3} , y un relativo fácil ingreso de los iones O^{-2} en el proceso de formación de la capa anódica, lo que origina que no se alcance un espesor, y características protectoras adecuadas, así como también a la porosidad presente en esta condición de anodizado y cuyo mecanismo fue reportado por Suay *et al.*, [15].

En la Figura 5, se exponen las curvas pertinentes al coeficiente de fricción (COF) y potencial a circuito abierto en función de la distancia de deslizamiento de las muestras sometidas a ensayos de tribocorrosión, los resultados obtenidos de estos ensayos se resumen en la Tabla 5.

Tabla 5. Resultados de los ensayos de tribocorrosión de los sustratos y muestras anodizadas

Identificación	D (m)*	E_{pf} (mV)**	Coefficiente de fricción (COF)
AA6061	0,59	-1073,12 \pm 1,02	0,82 \pm 0,04
AA8011	0,53	-1027,93 \pm 1,12	0,91 \pm 0,03
Condición A1	0,62	-1300,43 \pm 2,78	0,88 \pm 0,01
Condición D1	20,31	-1285,65 \pm 2,19	0,64 \pm 0,01

En cuanto a las muestras sin anodizar, se observó por MEB en las huellas de desgaste que para ambas aleaciones las características morfológicas son similares entre sí, con la formación de una capa compacta de partículas de desgaste sobre ellas, donde es evidente el desgaste adhesivo con un posterior desprendimiento, y formación de partículas de debris entre el sustrato y la contraparte.

Asimismo, para los sustratos se registró la caída de potencial libre de corrosión (E_{pf}) con el aumento del coeficiente de fricción el cual ocurrió a los pocos metros de deslizamiento del ensayo aprox. 0,5 m (Figura 5a y 5b), donde la capa natural de óxido es desprendida en la dirección del deslizamiento, registrándose fluctuaciones bruscas del (COF) la para la aleación AA8011 (Figura 5b), lo cual se infiere es la tendencia de las muestras a la regeneración de la capa pasiva natural, aunque no se completa por la acción consecutiva, y conjunta de los fenómenos de desgaste-corrosión.

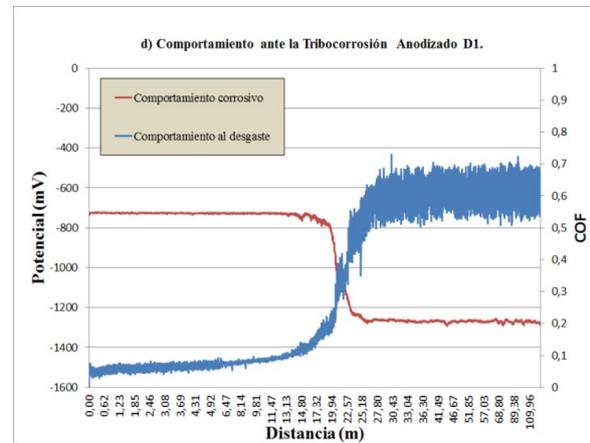
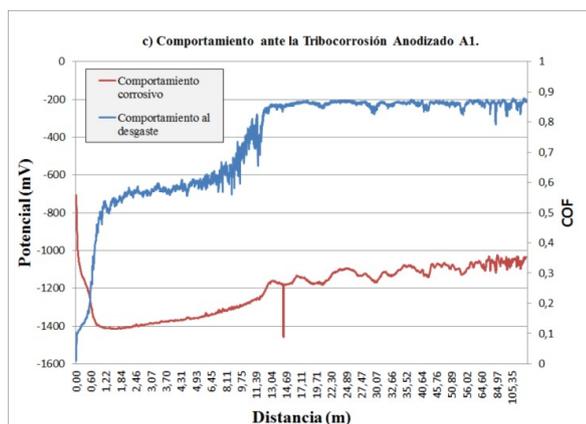
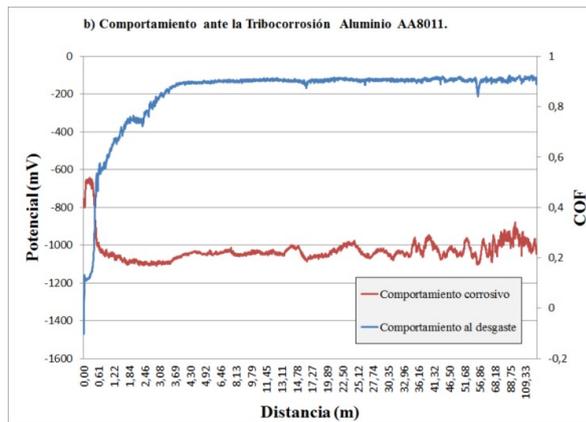
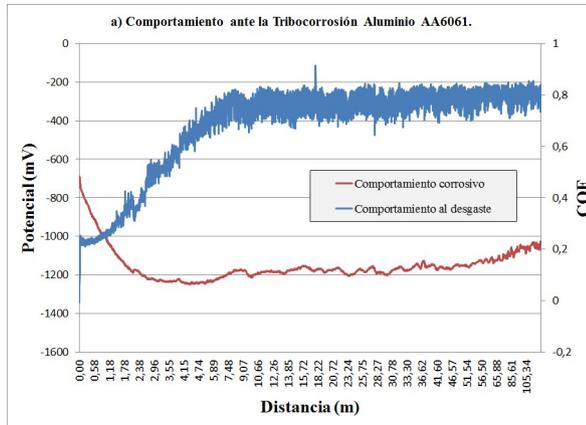


Figura 5. Coeficiente de fricción y potencial a circuito abierto, en función de la distancia de deslizamiento, de las muestras ensayadas en tribocorrosión. (a) AA6061; (b) AA8011; (c) A1; (d) D1

Para la condición de anodizado (A1), se evidenció por MEB la presencia de un desgaste adhesivo, con la delaminación de las asperezas de menor dureza, por la acción de la fuerza tangencial ejercida en los puntos de contacto, lo cual induce la deformación plástica superficial y subsuperficial, con la presencia importante de grietas.

Se nota un comportamiento similar en las curvas obtenidas para esta condición, en comparación con los sustratos ensayados, con la caída brusca del potencial a circuito abierto, y en el mismo punto, el cambio en aumento del COF, lo cual es indicativo de la poca resistencia ante fenómenos tribocorrosivos, que presenta esta condición de anodizado, donde también se observa un comportamiento altamente activo de las muestras, con una tendencia progresiva de aumento del potencial libre de corrosión, lo cual en conjunto con los picos presentados, se puede inferir una posible regeneración de la capa pasiva natural del material.

Para la condición de anodizado (D1), se identificaron por MEB la presencia de grietas pequeñas en algunas zonas de la huella de desgaste, con la aparición de un mecanismo mixto de desgaste de abrasión preponderante en el centro de la huella, y en su periferia la delaminación de las asperezas formadas.

Asimismo, en esta condición, se observa en la Figura 5d un cambio en el comportamiento con respecto a las otras condiciones ensayadas, ya que se obtuvo el rompimiento de la capa anódica a una distancia de ensayo mayor (aprox. 21 m), lo cual se indica por el decrecimiento del potencial libre de corrosión, y el aumento brusco COF, donde es notable la fluctuación en los valores registrados, esto es debido a la interacción cíclica entre los debris generados atrapados en el área de contacto del par tribológico.

Aun cuando para esta condición de anodizado (D1) presentó un menor espesor de capa anódica con la

presencia de microcavidades y menor resistencia a la corrosión, es en este caso, la que presenta mejor comportamiento contra fenómenos de acción conjunta desgaste-corrosión, deduciéndose que la adherencia presentada por esta condición es eficiente, complementado con el hecho de la menor presencia de grietas en la capa anódica establecida.

En general, todas las condiciones ensayadas, tanto los sustratos sin anodizar y con recubrimiento anódico, fueron gobernadas por un mecanismo de desgaste abrasivo severo; en algunas zonas hubo desgaste adhesivo con indicios de deformación plástica. Con respecto al fenómeno de corrosión presente en las distintas muestras, se atribuye al atrapamiento de los iones cloruro provenientes de la solución salina en distintas zonas de las superficies, donde el deterioro se encuentra asociado a una difusión del oxígeno disuelto en el medio a la superficie, cuando la solución se encuentra en movimiento, facilitando los procesos catódicos por el transporte de oxígeno en el proceso.

4. Conclusiones

En función de los resultados obtenidos de los diferentes ensayos de resistencia a la corrosión y tribocorrosión para las dos aleaciones comerciales de aluminio (AA6061 y AA8011) modificadas con distintas condiciones de anodizado se concluye lo siguiente:

- El mejor tiempo de deposición donde se alcanza los mayores espesores de capa anódica corresponde a 45 min.
 - Las muestras presentan porosidad superficial, con la creación de microcavidades donde se produce la deposición de productos corrosivos. Los sustratos presentan corrosión generalizada, con la formación de una capa gruesa de productos de corrosión, así como atrapamiento de iones Cl⁻, bajo los distintos ensayos realizados.
 - La AA6061 anodizada en ácido sulfúrico, presenta morfología de cristales *smudge*, así como el mayor espesor promedio de capa anódica correspondiente al bajo valor de densidad de corriente utilizada, con un buen comportamiento en ensayos de cámara de niebla salina y polarización potenciodinámica, aunque presenta deficiente comportamiento ante fenómenos tribocorrosivos, por la presencia de grietas superficiales.
 - La AA8011 anodizada en ácido oxálico presenta el menor espesor promedio de capa anódica, con un mejor comportamiento ante la acción conjunta desgaste-corrosión, por la calidad en adherencia del recubrimiento.
- En general, las muestras anodizadas mejoran el comportamiento contra la corrosión acelerada y tribocorrosión, en comparación con las muestras sin anodizar.

5. Agradecimiento

Al Proyecto FONACIT PEI-2011001094 *Mejoras de la resistencia a la corrosión de aleaciones de aluminio de producción nacional mediante la aplicación de un proceso de anodizado* por el financiamiento recibido para el desarrollo de esta investigación y al Departamento de Ciencia de los Materiales de la Universidad Simón Bolívar, por la colaboración recibida para los ensayos de tribocorrosión.

Referencias

- [1] M. J. Bartolomé, S. Feliu Jr., V. López, E. Escudero, J. A. González, and S. Feliu, "Efecto de las heterogeneidades superficiales de las aleaciones de aluminio sobre el crecimiento y propiedades de las capas anódicas," *Rev. Metal*, vol. 43, no. 4, pp. 252–265, Barcelona, 2000.
- [2] L. E. V. Guillén, "Estudio del proceso de anodizado en aluminio 3003 y 6063," EAE, 2012.
- [3] G. E. Thompson, Y. Xu, P. Skeldon, K. Shimizu, S. H. Han, and G. C. Wood, "Anodic oxidation of aluminium," *Philos. Mag. B*, vol. 55, no. 6, pp. 651–667, 1987.
- [4] E. Álvarez-Ayuso, "Approaches for the treatment of waste streams of the aluminium anodizing industry," *J. Hazard. Mater.*, vol. 164, no. 2, pp. 409–414, 2009.
- [5] M. J. Bartolomé, J. F. del Río, E. Escudero, S. Feliu, V. López, E. Otero, and J. A. González, "Behaviour of different bare and anodized aluminium alloys in the atmosphere," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 202, no. 12, pp. 2783–2793, 2008.
- [6] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, J. A. Szpunar, and D. Li, "Tribocorrosion behavior of aluminum/alumina composite manufactured by anodizing and arb processes," *J. Mater. Eng. Perform.*, vol. 20, no. 9, pp. 1600–1605, 2011.
- [7] X. Li, X. Nie, L. Wang, and D. O. Northwood, "Corrosion protection properties of anodic oxide coatings on an al-si alloy," *Surf. Coat. Technol.*, vol. 200, no. 5, pp. 1994–2000, 2005.
- [8] J. R. Davis, J. R. Davis, and others., "Aluminum and aluminum alloys." ASM International, 1993.

- [9] A. Bautista, R. Lizarbe, E. Otero, V. López, and J. A. González, “Nuevas alternativas a los métodos industrialmente implantados para el sellado del aluminio anodizado,” *Rev. Metal.*, vol. 35, no. 3, pp. 195–202, 1999.
- [10] A. International, “Astm b-117, standard practice for operating salt spray (fog) apparatus,” *ASTM Int. 1997 Ed.*, 1997.
- [11] G. ASTM, “Standard test method for conducting potentiodynamic polarization resistance measurements.” 2009.
- [12] B. W. Madsen, “Standard guide for determining amount of synergism between wear and corrosion,” *ASTM G119-93 Annu. Book ASTM Stand.*, vol. 3, pp. 507–512, 1994.
- [13] J. L. Gazapo and J. Gea, “Anodizing of aluminium,” *TALAT Lect.*, vol. 5203, 1989.
- [14] C. V. Hernández, F. N. Jiménez, and C. L. L. Calderón, “Crecimiento de películas de óxido de aluminio por métodos electroquímicos,” *Sci. Tech.*, vol. 1, no. 34, 2007.
- [15] J. J. Suay, E. Giménez, T. Rodríguez, K. Habbib, and J. J. Saura, “Characterization of anodized and sealed aluminium by eis,” *Corros. Sci.*, vol. 45, no. 3, pp. 611–624, 2003.

NORMAS PARA PUBLICAR EN LA REVISTA INGENIUS

Los artículos enviados a la revista INGENIUS deben ajustarse a los siguientes criterios:

Aspectos generales

1. Podrán ser publicados todos los trabajos realizados por investigadores nacionales o extranjeros, una vez que cumplan los criterios de calidad científica requeridos.
2. La revista INGENIUS publica artículos relacionados con investigaciones culminadas, revisiones bibliográficas, informes de desarrollo tecnológico, ensayos científicos, propuestas de modelos e innovaciones, productos de la elaboración de tesis de grado siempre que sean un aporte para el campo de la ciencia y tecnología.
3. La revista INGENIUS publica trabajos originales e inéditos en español e inglés; es decir, no pueden haber sido publicados a través de ningún medio impreso ni electrónico.
4. Todo artículo será sometido a un riguroso proceso de arbitraje; la evaluación del artículo se hará conforme a criterios de originalidad, pertinencia, actualidad, aportes, rigurosidad científica y cumplimiento de las normas editoriales establecidas.
5. Por tratarse de una publicación arbitrada, el Consejo Editorial aprueba su publicación en base al concepto de pares especializados. La recepción de un documento no implica compromiso de publicación.
6. Es indispensable presentar una carta dirigida al Consejo Editorial autorizando a la revista INGENIUS la publicación de la investigación, dando fe de la originalidad y de ser autor de la misma. Además, debe consignar constancia o credencial que confirme la adscripción a la Universidad o centro de investigación, tal como lo confirma el artículo.

7. Como reconocimiento a su aporte, a cada autor se le remiten dos ejemplares de la edición en la cual se publica el artículo.
8. El artículo propuesto se debe remitir a: <revistaingenius@ups.edu.ec> o <jcalle@ups.edu.ec>.
9. El sitio de consulta de ediciones anteriores de la revista es <<http://ingenius.ups.edu.ec/>>

Requerimientos técnicos

10. Los artículos pueden estar escritos sobre Microsoft Word® (.doc o .docx) o L^AT_EX (.tex). Las plantillas a ser utilizadas pueden ser descargadas del sitio web de la revista.
11. Las ilustraciones y tablas deberán estar numeradas secuencialmente incluyendo una descripción explicativa para cada una. Las ecuaciones incluidas en el artículo deberán también estar numeradas.
12. Cuando presente el artículo, no intente diseñar el manuscrito. Use un tamaño de letra de 12 puntos en todo el manuscrito. Justifique el margen derecho.
13. Use espacio después de punto, comas y signos de interrogación.
14. Use doble “enter” al final de cada párrafo, título encabezamiento. No use “enter” en ningún otro lugar, deje al programa procesador de palabras romper automáticamente las líneas.
15. No centre encabezamientos o subencabezamientos y déjelos estar alineados a la izquierda.
16. Las tablas deben estar creadas en el mismo programa usado para el cuerpo del documento, pero deben estar guardadas en un archivo separado. Use tabuladores, no espacios, para crear columnas. Recuerde que el tamaño final de las páginas impresas será aproximadamente de 21 x 28 cm,

entonces sus tablas deben estar diseñadas para ajustarse al espacio de la impresión final.

Instrucciones para preparación de manuscritos

17. El manuscrito no debe tener más de 5000 palabras de extensión e incluir algunos o todos los siguientes elementos:

Encabezamiento

- Título
- Autores y su adscripción institucional con referencia al final de la primera hoja
- Resumen en español e inglés
- Palabras clave en español e inglés

Cuerpo del trabajo

- Introducción
 - Fundamentación
 - Definiciones
 - Revisión de literatura
 - Formulación de objetivos y establecimiento de hipótesis
- Materiales, fuentes y métodos
 - Recopilación de datos
 - Tratamiento de las variables
 - Análisis estadístico
- Resultados
- Discusión
- Conclusiones

Referencias bibliográficas

- Referencias

Material adicional

- Elementos gráficos
 - Tablas
 - Agradecimientos
18. El artículo debe incluir en el encabezado: el ‘Título’, a continuación se debe informar los datos de cada uno de los autores con nombre completo, y con referencia al final de la página el título universitario de pregrado y el de posgrado más alto obtenido, cargo e institución donde labora, números telefónicos (convencional y celular), la dirección y correo electrónico. Si hay más que

un autor, indicar quien es el autor a quien la correspondencia debe ser enviada.

19. El ‘Resumen’ y el ‘Abstract’ deben ser en español e inglés, respectivamente en todos los manuscritos; deben ser de un solo párrafo, corto y conciso (máximo de 250 palabras) y resumir los resultados del artículo. Deben ser informativos no indicativos.
20. Las palabras clave serán de tres a seis y representarán los principales temas del artículo y deberán ser colocadas al final del resumen.
21. Las secciones de ‘Introducción’, ‘Materiales y métodos’, ‘Resultados’, ‘Discusión’ y ‘Conclusiones’ del artículo pueden estructurarse divididas en diferente forma. Si el artículo describe un estudio efectuado en un área particular, esta debe ser escrita en subencabezamientos bajo ‘Materiales y métodos’.
22. Los ‘Resultados’, ‘Discusión’ y ‘Conclusiones’ pueden ser en algunos casos combinados.
23. Los ‘Agradecimientos’ deben ser cortos, no deben exceder de un párrafo y se colocan al final del artículo.
24. Para la integración de citas dentro del artículo, debe usarse un corchete con un número en el interior, el mismo que hará referencia al documento de citación que constar en la bibliografía [1], y se irá colocando de forma ascendente. Cuando se trata de citas textuales se escribirá entre comillas con el texto en cursiva y a continuación se colocará el corchete con el número que corresponda siguiendo el formato de la IEEE.
25. Las ‘Referencias bibliográficas’ se colocan al final del texto, luego de la sección de conclusiones.
26. Las ‘Referencias bibliográficas’ se colocan ordenadas en orden de citación, de acuerdo el estilo de la IEEE.
27. Se debe verificar con cuidado que todas las citas colocadas en el texto, aparezcan en la lista de ‘Referencias bibliográficas’. En la lista solo deben aparecer las referencias que fueron utilizadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras, esto implica que no deben aparecer otras referencias aunque el autor las haya consultado durante la preparación del artículo.

28. La sección de ‘Referencias bibliográficas’ deberá incluirse en un archivo aparte sobre \LaTeX , proporcionando un archivo de información bibliográfica (.bib); o si el artículo está escrito sobre Microsoft Word[®] u otro procesador de texto, añadir una tabla en Microsoft Excel[®] (.xls o .xlsx). De esta manera, el formato de la revista para las referencias se coloca automáticamente, tal y como se muestra en algunos ejemplos a continuación.

Referencias

- [1] R. Balasubramani and V. Kannan, “Efficient use of MPEG-7 color layout and edge histogram descriptor in CBIR systems,” *Global Journal of Computer Science and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 157–163, 2009.
- [2] S. Berretti, A. Del Bimbo, and P. Pala, “Retrieval by shape similarity with perceptual distance and effective indexing,” *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 2, no. 4, pp. 225–239, 2000.
- [3] L. Graham, *Introduction to Mechanical Measurements*, Houston, 2006. [Online]. Disponible en: <http://cnx.org/content/col10385/1.1/>
- [4] T. Kijak, T. Furon, and L. Amsaleg, “Deluding image recognition in SIFT-based CBIR systems,” in *Multimedia in Forensics, Security and Intelligence (MiFor)*, Florence, Italy, October 29 2010.
- [5] M. Kozłowski, M. Mackiewicz-Talarczyk, M. Muzyczek, and J. Barriga, “Future of natural fibers, their coexistence and competition with man-made fibers in 21st century,” *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 556, no. 1, 2012.
- [6] D. Tahmoush, “CBIR for mammograms using medical image similarity,” *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 7628, p. 8, 2010.
- [7] X. Xu, Y. Wang, X. Zhang, G. Jing, D. Yu, and S. Wang, “Effects on surface properties of natural bamboo fibers treated with atmospheric pressure argon plasma,” *Surface and interface analysis*, vol. 38, no. 8, pp. 1211–1217, 2006.

Para más detalles consultar:

<<http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>>

Preparación de las figuras

29. Las figuras pueden ser dibujos lineales, mapas o fotografías de medios tonos en blanco y negro o a color en resolución de 300 dpi.
30. No combine fotografías y dibujos lineales en la misma figura.
31. Diseñe las figuras para que se ajusten eventualmente al tamaño final de la revista 21 x 28 cm. Asegúrese de que las inscripciones o detalles, así como las líneas, tengan tamaños y grosores adecuados de tal manera que no queden ilegibles cuando sean reducidos a su tamaño final (números, letras y símbolos deben ser reducidos al menos a 2,5 mm de altura después que las ilustraciones han sido reducidas para ajustarse a la página impresa). Idealmente, las ilustraciones lineales deben ser preparadas a aproximadamente un cuarto de su tamaño final de publicación.
32. Diferentes elementos en la misma figura deben ser deletreados a, b, c, etc.
33. Las fotografías deben grabarse con alto contraste y en alta resolución. Recuerde que las fotografías frecuentemente pierden contraste en el proceso de impresión.
34. Dibujos lineales y mapas deben ser preparados con tinta negra.
35. El texto de las figuras y mapas debe escribirse con letras fácilmente legibles.
36. Si las figuras han sido previamente usadas, es de responsabilidad del autor obtener el permiso correspondiente para evitar problemas posteriores relacionados con los derechos de autor.
37. Cada figura debe ser entregada en un archivo aparte, ya sea como mapa de bits (.jpg, .bmp, .gif, o .png) o como gráfico vectorial (.ps, .eps, .pdf)

Procedimiento editorial

Para la publicación de artículos en la revista *INGENIUS*, su presentación y revisión se realiza con dos procedimientos:

38. Cuando el artículo ha sido recibido por el editor responsable, una primera revisión se realiza dentro de un consejo editorial interno que determinará la pertinencia y solvencia científica del

documento presentado, si este es aceptado en esta revisión se pasa al siguiente proceso.

39. El segundo proceso de revisión es la evaluación por expertos nacionales o extranjeros considerando el método *blind review* considerando los siguientes pasos:

- Al artículo se le asigna un número.
- El editor asigna el artículo a un miembro del consejo editorial interno, quien supervisará el proceso de revisión.
- El miembro del consejo editorial interno asignado solicitará dos o más revisores para el artículo.
- Una vez revisado el artículo, el revisor remitirá el informe hacia el miembro del consejo editorial interno en forma digital.
- El miembro del consejo editorial interno hace recomendaciones en base a todas las revisiones.
- Posteriormente el miembro del consejo editorial interno, presenta los formatos de revisión completos al editor responsable con las recomendaciones.
- El editor confirma o discute las recomendaciones.

- Una vez confirmado, el editor informa las recomendaciones al autor y hace llegar los comentarios de la revisión.
- El editor hace llegar una copia de las recomendaciones y comentarios de la revisión al miembro del consejo editorial interno y a todos los revisores.

40. Las revisiones para la revista INGENIUS son realizadas anónimamente; el autor recibe únicamente los comentarios de los revisores.

41. Si el revisor rechaza un artículo, se da una apropiada retroalimentación a el(los) autor(es).

42. El(los) autor(es) tiene una única oportunidad para mejorar un artículo haciendo las revisiones y correcciones necesarias; por lo tanto reciben de los revisores claros, concisos y completos comentarios para mejoras.

Comentario final

43. La revista INGENIUS publica dos números por año en los meses de diciembre y junio por lo tanto es importante considerar las fechas para el envío de los artículos para su revisión.

GUIDELINES FOR PUBLICATION IN THE INGENIUS JOURNAL

The papers submitted to the INGENIUS journal must be adjusted to the following criteria:

General criteria

1. Papers written by national or foreign researchers could be published if they accomplish the required scientific quality.
2. INGENIUS journal publishes articles related to complete research, literature reviews, reports of technological development, scientific papers, proposals for models and innovations and thesis results as long as they are a contribution to the field of Science and Technology.
3. The journal publishes original papers in English or Spanish, that is, they should not have been published before through any printed or electronic means.
4. All papers will undergo a rigorous process of arbitration and the evaluation, made according to the following criteria: originality, relevance, timeliness, contributions, scientific rigor and compliance with established publishers.
5. Being an arbitrated publication, the Editorial Board approves its publication based on the concept of specialized pairs. The receipt of a paper does not imply commitment to be published.
6. It is necessary to present a letter to the Editorial Board, authorizing the journal's publication of the research, attesting to the originality and to being the author of it. In addition, recorded evidence or credentials must be given to confirm the affiliation to the university or research center, as it is stated in the paper.
7. In recognition of his or her contribution, each author will receive two copies of the edition in which the paper is published.
8. The proposed paper should be submitted to: <revistaingenius@ups.edu.ec> or

<jcalle@ups.edu.ec>.

9. The site to access previous published journals is: <http://ingenius.ups.edu.ec/>

Technical requirements

10. Articles must be written using Microsoft Word® (.doc or .docx) or L^AT_EX (.tex). The templates to be used can be downloaded from the journal website.
11. The illustrations and tables should be numbered sequentially and include a narrative description for each. The equations in the article should also be numbered.
12. When submitting the article, do not try to design the manuscript. Use a font size of 12 points in the entire manuscript. Justify the right margin.
13. Use space after periods, commas and question marks.
14. Use double "enter" at the end of each paragraph and heading title. Do not use "enter" anywhere else, let the word processing program automatically break the lines.
15. Do not center headings or subheadings and let them be left aligned.
16. Tables should be created in the same program used for the body of the document, but must be stored in a separate file. Use tabs, not spaces, to create columns. Remember that the final size of printed pages is approx. 21 x 28 cm, and that your tables should be designed to fit the space of the final print.

Instructions for preparing manuscripts

17. The manuscript should be no more than 5000 words in length and include some or all of the following elements:

Header

- Title
- Authors and their institutional affiliation
- Abstract in English and Spanish
- Keywords in English and Spanish

Body of work

- Introduction
 - Substantiation
 - Definitions
 - Review of the literature
 - Formulation of objectives and development of hypotheses
- Materials, sources and methods
 - Data collection
 - Treatment of the variables
 - Statistical analysis
- Results
- Discussion
- Conclusions

Bibliography references

- References

Additional material

- Graphic elements
 - Tables
 - Acknowledgment
18. The article must include the header title, and then the information from each of the authors: below the header the full name, and at the bottom of the page: the title, undergraduate degree and the highest obtained graduate degree, position and institution where the author works, telephone numbers (conventional and cellular), address and email. If more than one author exists, indicate who the principal author is to whom correspondence should be sent.
 19. The ‘Abstract’ should be in Spanish and English, respectively; all manuscripts must be a single paragraph, short and concise (maximum 250 words) and summarize the results of the article. The abstract should be informative not indicative.
 20. There will be three to six keywords to represent the main topics of the article and these should

be placed at the end of the abstract.

21. The sections of ‘Introduction’, ‘Materials and methods’, ‘Results’, ‘Discussion’ and ‘Conclusions’ may be structured differently. If the article describes a study in a particular area, it must be described in a subheading under ‘Materials and methods’.
22. ‘Results’, ‘Discussion’ and ‘Conclusions’ can be combined in some cases.
23. ‘Acknowledgment’ should be short, not to exceed one paragraph and placed at the end of the paper.
24. When using citations in the article, you must use a bracket with a number inside which would be included in the literature eg. [1], and it would be placed in ascending order. Textual citations must be used with quotation marks in italics and then use a bracket with the corresponding number in the IEEE format.
25. ‘References’ are placed at the end of the text, after the concluding section.
26. Las ‘References’ are placed and sorted in order of appearance.
27. It should be checked carefully that all citations are placed in the text and appear in the list of ‘References’. In the list should appear only references that were used in the main body of the paper, in tables or figures; this means that no other references should appear, even those ones that the author has consulted for the preparation of the article.
28. The section ‘References’ should be included in a separate file, for L^AT_EX, provide the bibliographic information file (.bib); or if the article is written on Microsoft Word[®] or another word processor add a table on Microsoft Excel[®] (.xls or .xlsx). Thus the references format of the journal are automatically positioned, as shown in examples below.

References

- [1] R. Balasubramani and V. Kannan, “Efficient use of MPEG-7 color layout and edge histogram descriptor in CBIR systems,” *Global Journal of Computer Science and Technology*, vol. 9, no. 4, pp. 157–163, 2009.

- [2] S. Berretti, A. Del Bimbo, and P. Pala, "Retrieval by shape similarity with perceptual distance and effective indexing," *IEEE Transactions on Multimedia*, vol. 2, no. 4, pp. 225–239, 2000.
- [3] L. Graham, *Introduction to Mechanical Measurements*, Houston, 2006. [Online]. Disponible en: <http://cnx.org/content/col110385/1.1/>
- [4] T. Kijak, T. Furon, and L. Amsaleg, "Deluding image recognition in SIFT-based CBIR systems," in *Multimedia in Forensics, Security and Intelligence (MiFor)*, Florence, Italy, October 29 2010.
- [5] M. Kozłowski, M. Mackiewicz-Talarczyk, M. Muzyczek, and J. Barriga, "Future of natural fibers, their coexistence and competition with man-made fibers in 21st century," *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, vol. 556, no. 1, 2012.
- [6] D. Tahmoush, "CBIR for mammograms using medical image similarity," *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series*, vol. 7628, p. 8, 2010.
- [7] X. Xu, Y. Wang, X. Zhang, G. Jing, D. Yu, and S. Wang, "Effects on surface properties of natural bamboo fibers treated with atmospheric pressure argon plasma," *Surface and interface analysis*, vol. 38, no. 8, pp. 1211–1217, 2006.
32. Different elements in the same figure should be spelled a, b, c, etc.
33. The photographs must be recorded with high contrast and high resolution. Remember that pictures often lose contrast in the printing process.
34. Line drawings and maps should be prepared with black ink.
35. The text figures and maps should be written in letters easily legible.
36. If the figures have been previously used, it is the responsibility of the author to obtain a permit to avoid further problems related to copyright.
37. Each figure must be submitted in a separate file, either as a bitmap (.jpg, .bmp, .gif, or .png) or vector graphic (.ps, .eps, .pdf)

For more details see:

<<http://www.ieee.org/documents/ieeecitationref.pdf>>

Preparation of figures

29. Figures may be line drawings, maps and half tone photographs in black and white or color resolution of 300 dpi.
30. Do not combine photographs and line drawings in the same figure.
31. Design figures to eventually fit to the final size of the journal 21 x 28 cm. Make sure the registration or details as well as lines are set with appropriate sizes and thicknesses so that they are not unreadable when reduced to its final size. (numbers, letters and symbols should be reduced at least 2.5 high after the pictures have been reduced to fit the printed page). Ideally, line art should be prepared to approximately one quarter of its final size of publication.

Editorial procedure

For publication of articles in the *INGENIUS*, submission and review is carried out with two procedures:

38. When the item has been received by the editor, a first review takes place with in a national editorial board to determine the relevance and scientific soundness of the submission, if this is accepted in this review it passes to the next process.
39. The second review process is the evaluation by national or foreign experts using the blind-review method following the next steps:
- The article is assigned a number.
 - The editor assigns the article to an internal editorial board member, who will oversee the review process.
 - The internal editorial board member assigns the article to two or more reviewers.
 - After reviewing the article, the reviewer forwards the report to the internal editorial board member in a digital format.
 - The internal editorial board member makes recommendations based on the reviews.
 - Subsequently, the internal editorial board member presents the complete review formats to the editor with the recommendations
 - The editor confirms or discusses the recommendations.

- Once confirmed, the publisher informs the author of there commendations and gets feedback from the review.
 - The editor makes a copy of the recommendations and commentaries which were made by the internal editorial board member and all the reviewers.
40. The reviews for the INGENIUS journal are made anonymously. The author receives only the reviewers' comments.
 41. If the reviewer rejects a paper, there is a proper feedback to the author.
 42. The author has a unique opportunity to improve an article by making revisions and corrections, so the reviewers use clear, concise and complete comments for improvements.

Final comment

43. The INGENIUS journal publishes two issues per year in the months of December and June, so it is important to consider the dates for submission of articles for review.

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA DEL ECUADOR

Javier Herrán Gómez, sdb
Rector

©Universidad Politécnica Salesiana
Turhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: srector@ups.edu.ec

CANJE

Se acepta canje con otras publicaciones periódicas.

Dirigirse a:
Secretaría Técnica de Comunicación
Universidad Politécnica Salesiana
Turhuayco 3-69 y Calle Vieja
Casilla postal 2074
Cuenca, Ecuador
Teléfono: (+593 7) 205 00 00 Ext. 1182
Fax: (+593 7) 408 89 58
Correo electrónico: rpublicas@ups.edu.ec
www.ups.edu.ec
Cuenca – Ecuador

INGENIUS, Revista de Ciencia y Tecnología, publicación semestral, N.º 16,
Julio/Diciembre 2016

Editor responsable: John Calle Sigüencia.

Diagramación y maquetación

Marlon X. Quinde / Universidad Politécnica Salesiana

Fotografía de portada

Laboratorio de Simulación de Procesos de Manufactura / Universidad Politécnica Salesiana

Diseño de portada e impresión

Centro Gráfico Salesiano: Antonio Vega Muñoz 10-68 y General Torres.

Teléfono: (+593 7) 283 17 45

Cuenca – Ecuador

Correo electrónico: centrograficosalesiano@lms.com.ec

OTRAS PUBLICACIONES PERIÓDICAS DE LA UNIVERSIDAD

UNIVERSITAS, Revista de Ciencias Sociales y Humanas.

LA GRANJA, Revista de Ciencias de la Vida.

ALTERIDAD, Revista de Educación.

RETOS, Revista de Ciencias de la Administración y Economía.

UTOPIA, Revista de Pastoral Juvenil Universitaria.

SOPHIA, Colección de Filosofía de la Educación.

