



CONGRESO INTERNACIONAL I+D+i EN SOSTENIBILIDAD ENERGÉTICA INER 2017

INSTITUTO NACIONAL
DE EFICIENCIA ENERGÉTICA
Y ENERGÍAS RENOVABLES



EL
GOBIERNO
DE TODOS





Créditos

Publicado por: Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER).

Dirección: Iñaquito N35-37 y Juan Pablo Sanz.

Código Postal: 170507 / Quito-Ecuador.

Teléfono: 593-2 393-1390

Sitio Web: www.iner.gob.ec

Se prohíbe la reproducción parcial o total de esta publicación sin previa autorización de INER.

“Las opiniones expresadas en este documento son de la entera responsabilidad de sus autores y no representan necesariamente las opiniones de INER y las organizaciones colaboradoras.”

Para fines bibliográficos, favor citar de la siguiente manera:
Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) (2018). Congreso Internacional I+D+i en Sostenibilidad Energética. Quito-Ecuador.

Coordinación: Sofía Pavón, Alexandra Cajas, INER.

Diseño y diagramación: Cristian Espinosa, INER.

ISBN: 978-9942-8620-7-5



9 789942 862075

Quito-Ecuador



Presentación



Director Ejecutivo

Mgs. Ricardo Narváez Cueva

INSTITUTO NACIONAL
DE EFICIENCIA ENERGÉTICA
Y ENERGÍAS RENOVABLES

Con la tercera edición del Congreso Internacional en Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i) en Sostenibilidad Energética, realizada en el mes de septiembre de 2017, se consolida un espacio para la investigación y el debate científico en Ecuador y la región.

En esta última edición, expertos nacionales e internacionales compartieron, a través de ponencias magistrales, exposición de artículos y póster científicos, conocimientos, experiencias y expectativas en relación a la sostenibilidad energética, planteando alternativas a la generación de energía a través de fuentes renovables no convencionales y formas más eficientes de su uso en áreas como hábitat, movilidad e industrias.

Este documento compila dieciocho artículos científicos que fueron seleccionados luego de haberse realizado una convocatoria a la que respondieron investigadores y académicos de once países del mundo. El contenido de los mismos fue evaluado por el Comité Revisor del Congreso y expuesto a manera de ponencia o poster durante los días 20, 21 y 22 de septiembre de 2017, por lo que constituye una memoria fiel del conocimiento difundido y debatido en la tercera edición del Congreso Internacional I+D+i en Sostenibilidad Energética.

El compromiso institucional es fortalecer este espacio, garantizar su vigencia y asegurar su realización durante los próximos años, con el fin de convertirlo en un punto de referencia para la investigación, principalmente local y regional en temas relacionados a la sostenibilidad energética.

Saludamos a todos los involucrados en esta iniciativa y los invitamos a formar parte de la cuarta edición del Congreso que se realizará en el trimestre final del 2019.



ÍNDICE

pág.

Beneficio de un Microorganismo de Suelo Alto Andino para la producción de Energía Renovable usando nitratos como compuesto inorgánico	05-09
Caracterización de la isla de calor urbana en Cuenca (Ecuador). Efectos de la morfología urbana	10-18
Construcción de un aerogenerador de 400W con material reciclado en la Parroquia Tarqui, Cantón Cuenca-Ecuador	19-25
Prospecto Geotérmico Chacana-Jamanco: Gravimetría Complementaria	26-30
Análisis energético de un sistema de transporte alimentado por electricidad	31-40
Estudio de la Transesterificación de Aceite de Piñón (<i>Jatropha curcas</i>) con Acetona como Co-solvente bajo Condiciones Subcríticas	41-48
Simulación Hidrodinámica por CFD para mejorar el diseño en embarcaciones	49-57
Recomendación de Algoritmos Metaheurísticos para la Resolución del Vehicle Routing Problem (VRP)	58-64
Aplicación de techos de alta reflectividad solar en viviendas de interés social en Guayaquil: Caso de estudio programa habitacional "Socio Vivienda II"	65-69
Simulación del viento como un sistema granular en interacción con una turbina Savonius	70-76
Evaluación del Uso de Tierra de Diatomeas Provenientes del Proceso de Blanqueo de Aceite de Palma para la Elaboración de Materiales de Cambio de Fase	77-86
Proyecto de Transporte Intermodal para generar una Movilidad Sustentable, caso de estudio Ciudad de Ambato	87-92
Instrumento Digital para la Determinación del Estrés Térmico en Personas	93-101
Evaluación de la intensidad de la Isla Urbana de Calor en la ciudad de Guayaquil	102-108
Isla urbana de calor en América del Sur. Simulación y monitoreo en ciudades costeras de Chile	109-113
Evaluación y optimización en base al diseño pasivo de un coliseo universitario en una zona climática templada del Ecuador	114-120
Optimización de Pareto y Lógica Difusa para el Control Coordinado de Voltaje en redes de Distribución eléctrica con presencia de Generación distribuida	121-125
Evaluación de la Contaminación Acústica en Sectores Urbanos Turísticos y de Entretenimiento. Caso de Estudio: Parroquia la Mariscal, Quito-Ecuador	126-134



Benefit of a High Andean Soil Microorganism in Renewable Energy Production using nitrates as an inorganic compound

Beneficio de un Microorganismo de Suelo Alto Andino para la producción de Energía Renovable usando nitratos como compuesto inorgánico

Alex. F. Guambo¹, Silvia. A. Paña¹, Cristina. G. Calderón¹, Magdy. M. Echeverría¹

¹Centro de Investigación de Energías Alternativas y Ambiente, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Riobamba, Ecuador

E-mail: alexfernag@gmail.com

Abstract

A bacterial strain of *Pseudomonas aeruginosa* was isolated from Andean soils at 3850 masl identified by biochemical tests in the Clinical Laboratory of the Faculty of Sciences - ESPOCH. The pure microbial culture presented the denitrifying characteristics.

Two-chambered microbial fuel cells (CCMs) were used; an anodic (bacteria) and a cathodic (partially exposed to air), separated by a cation exchange membrane (MIC), which served as an electron exchanger, in these CCMs the process of reduction of nitrogen compounds was produced while generating bioelectricity.

A total of six CCMs were tested, four with concentrations of synthetic residual water based on potassium nitrate, two of them with nitrate concentrations at 30 ppm, two with concentrations of 60 ppm and two as a control group. The production of average output voltage was 0.0598 V and 0.1055 V in relation to the supplied concentrations of organic compounds of 30 and 60 ppm respectively in batch mode. The Control Cells generated an average output voltage of 0.0480 V; this happened at the end of the experiment in 15 days for all cases. The final data representation shows a production proportional to the nitrate concentration supplied.

This study suggests that the bacterial strain identified and isolated from high Andean soils of Ecuador is capable of producing bioelectricity from a nitrogen source; The higher the concentration of the pollutant, the greater the production of bioelectricity could be.

Keywords: microorganism, High Andean Soil, pollutant, nitrates, renewable energy.

Resumen

Se aisló una cepa bacteriana de *Pseudomonas aeruginosa* de suelos andinos a 3850 msnm identificada mediante pruebas bioquímicas en el Laboratorio Clínico de la

Facultad de Ciencias – ESPOCH. El cultivo puro microbiano aislado presentó características desnitrificantes.

Se usó Celdas de Combustible Microbiano de Configuración Simple (CCMs) de dos cámaras; una anódica (bacterias) y otra catódica (parcialmente expuesta al aire), separadas por una membrana de intercambio catiónico (MIC), que servía como intercambiador de electrones, en estas CCMs ocurría el proceso de reducción de compuestos nitrogenados mientras generaba bioelectricidad.

Se experimentó un total de seis CCMs, cuatro con concentraciones de agua residual sintética a base de nitrato de potasio, dos de ellas con concentraciones de nitratos a 30 ppm, dos con concentraciones de 60 ppm y dos como grupo control. La producción de voltaje promedio de salida fue de 0,0598 V y 0,1055 V en relación a las concentraciones suministradas de compuestos orgánicos de 30 y 60 ppm respectivamente en modo batch. Las Celdas de Control generaban un promedio de voltaje de salida de 0,0480 V; esto ocurrió al final del experimento en 15 días para todos los casos. La representación final de datos muestra una producción proporcional a la concentración de nitratos suministrada.

Este estudio sugiere que la cepa bacteriana identificada y aislada de suelos alto andinos del Ecuador es capaz de producir bioelectricidad a partir de una fuente nitrogenada; mientras más alta es la concentración del contaminante mayor podría ser la producción de bioelectricidad.

Palabras clave— Microorganismo, Suelo Alto Andino, Contaminante, Nitratos, Energía Renovable

INTRODUCCIÓN:

En varios países, incluyendo Ecuador, dependen del carbón, el petróleo y el gas natural como fuente de energía. A nivel mundial, el 85% del total de la energía

comercial se genera por los combustibles fósiles, cerca del 36% proviene de petróleo, el 38% del carbón y el 23% del gas natural [1]. Dichos recursos son finitos, no renovables, con costosa extracción, por lo que en la actualidad se busca otros tipos de energía con un menor costo de producción generando una estabilidad económica, y reduciendo la actual dependencia en los combustibles fósiles y la energía nuclear.

Otro tipo de tecnología que se está desarrollando para la obtención de energía renovable, puede ser la energía eólica obtenida del viento, o la energía solar activa para el calentamiento del aire y el agua, los motores y vehículos híbridos, las celdas energéticas de hidrógeno o metanol, las celdas fotovoltaicas, y la energía obtenida a partir de biomasa [2]

Por otra parte, la biodiversidad de páramo es incalculable, sus especies vegetales y animales forman un paisaje único, sin dejar de lado a la riqueza microbiológica que posee. A causa de la altitud del páramo alto andino que en promedio tiene alrededor de 4130 msnm., su clima es variable, generando bajas temperaturas durante la noche y la presencia de vientos durante el día [3].

En los últimos años existe especial interés por el estudio de la diversidad microbiana, encontrándose una considerable cantidad de bacterias, mohos, levaduras y microalgas, que pueden tener varias aplicaciones, como es el caso de la bacteria *Pseudomona aeruginosa*, la cual pertenece a un grupo de bacterias con capacidad de producir energía al transferir electrones fuera de la célula por un mediador que ellas mismo producen [4].

Lo más interesante es que aparte de producir energía, puede depurar a la vez, aguas contaminadas con materia orgánica o inorgánica. La tecnología de estudio para lograrlo, es mediante el uso de pilas de combustible microbianas, las cuales convierten energía química en energía eléctrica que puede ser aprovechada e implementada como fuente de energía renovable, y como plantas de tratamiento de aguas.

En una celda de combustible microbiana, mientras se degrada u o xida la materia orgánica o inorgánica, mediante microorganismos, en el interior celular se producen electrones que se transportan por una serie de enzimas respiratorias en la célula bacteriana, generando energía para la misma en forma de ATP. Según la cadena transportadora de electrones, los electrones son atrapados por un aceptor terminal de electrones [5]. Sin embargo estos electrones se pueden transferir fuera de la célula a un material que se comportaría como ánodo, mediante un mediador, que en el caso de la *Pseudomona aeruginosa* es la piocianina. El funcionamiento del mediador es como aceptor de electrones desde las células bacterianas, para luego difundirse en el ánodo descargando los electrones en él, y vuelve a la

membrana celular para repetir el proceso [6]

La cámara combustible es anaerobia, por lo tanto las bacterias utilizan diferentes aceptores de electrones, diferentes del oxígeno por ejemplo, nitratos (NO_3^-), ion férrico (Fe^{3+}), sulfatos (SO_4^{2-}), carbonatos (CO_3^{2-}), y ciertos compuestos orgánicos [7].

La bacteria utilizada en el presente estudio, *Pseudomona aeruginosa* puede utilizar el ion nitrato como aceptor final (NO_3^-), éste ion es reducido a ion nitrito (NO_2^-) y finalmente a óxido nitroso (N_2O) o nitrógeno gaseoso (N_2). Por lo que, si se suministra agua contaminada con nitratos, la bacteria está en la capacidad de reducirlos y con ello generar energía renovable.

Esta cepa bacteriana era procedente de suelos de páramo en la zona de recarga de la Laguna Mapahuiña, Ecuador (9742946 N, 747817 E) en el Parque Nacional Sangay (provincia de Chimborazo), que pertenece a la microcuenca del río Zula. La temperatura media diaria es de entre 6-12 °C, con un máximo de 15 °C durante el día de tiempo y un mínimo de 3 °C en la noche, se utilizaron pruebas de tinción de Gram, donde se observó que son bacilos Gram negativos, así como 22 pruebas bioquímicas a través de la galería API 20E para su identificación como tal.

Una vez realizada la identificación de la cepa bacteriana se procedió a diseñar y construir seis celdas de combustible microbiano de cátodo parcialmente expuestas al aire cúbicas (5x5x5cm³) de acrílico de 3 mm de espesor [8]. Como membrana de intercambio anódico para la transferencia de electrones de la cámara anódica a la catódica se utilizó tejido de fibra de carbono que previamente fue tratada remojando en acetona (durante la noche anterior a la instalación) y lavándola el día siguiente 5 veces en agua destilada o desionizada; se remojó en peroxidisulfato de amonio (200 gr / L) y ácido sulfúrico concentrado (100 mL / L) durante 15 minutos; posteriormente, los electrodos se calentaron durante 30 minutos en un horno de mufla a 450 °C [9]. (Ver Fig.1)



Figura 1: Tejido de Fibra de Carbono Tratada

Como sustrato y alimentación a las *Pseudomonas* en el interior de las CCMs se preparó agua residual sintética de nitrato de potasio, siendo considerada para este experimento como agua contaminada, controlando tal variable de la forma de que sea la única en influenciar la producción de bioelectricidad, se manejaron rangos de concentraciones que permitieron valorar de mejor manera el comportamiento dentro de una celda de combustible microbiano, además de que es el reactivo más utilizado como fertilizante a nivel agronómico [10]

La especie *Pseudomona spp* es una de las bacterias que poseen propiedades fijadoras de nitrógeno [11] por ende al usar esta agua residual sintética aprovechamos estas propiedades metabólicas de la bacteria con respecto al contaminante.

El agua residual sintética nitrogenada poseía las siguientes características según la Tabla 1.

Tabla 1: Características del agua residual sintética

Solución	Características Químicas	% de agua del total de agua sintética
a) Agua Tesalia	(mg/l)	95.2%
	Calcio:	
	Magnesio:	
	Sodio:	
	Potasio:	
	Bicarbonatos:	
	Sulfatos:	
	Cloruros:	
b) Solución de nitrato de Potasio	Sólidos Disueltos:	4,76%

Se armaron dos CCMs como pruebas de ensayo en base a la configuración y a los tratamientos realizados anteriormente donde se aplicarán dos tipos de medios (Ver figura 2) el uno químico (glucosa) y el otro biológico (*pseudomona aeruginosa*), los cuales fueron de gran importancia para definir el tiempo de monitoreo debido a la estabilidad que iba tomando cada una de las celdas con los tratamientos propuestos. El registro de datos se realizó mediante un multímetro digital STEREN



Figura 2: Monitoreo de las CCMs con tratamiento químico y biológico

Posterior a las pruebas ensayo en las instalaciones del laboratorio de biotecnología perteneciente a la ESPOCH se aplicó la prueba final, en donde se procedió a colocar 2 mL de la cepa bacteriana en cada una de las seis CCMs en una cámara de flujo laminar

Se procedió a colocar el agua residual sintética previamente elaborada en cada una de las celdas dos de las cuales contenían una concentración de nitratos de 30 ppm y las dos siguientes una concentración de 60 ppm, cabe recalcar que estas concentraciones fueron determinadas debido a la Norma de calidad Ambiental y de descarga de efluentes: Recurso agua (Tulsma; 2014).

Las dos celdas restantes representaron al grupo control para establecer una comparación con las celdas que poseían como sustrato las concentraciones antes mencionadas de agua sintética. (Ver Fig 3).



Figura 3: Incorporación bacteriana en las CCMs

Finalmente se procedió a realizar conexiones para cada una de las celdas, las cuales constaban de una conexión de salida tanto para la cámara catódica y otra para la cámara anódica, formando de esta manera un circuito cerrado conectadas a un dispositivo DAQ NI 6009 que a su vez a un ordenador que registraba la cantidad de voltaje instantánea por cada una de las celdas con un tiempo de recepción de un minuto por el transcurso de 15 días de monitoreo.

Los análisis de nitratos presentes en el agua residual sintética elaborada y considerada como compuesto inorgánico para suministrar en las CCMs fueron analizadas antes y después del experimento a través de un espectrofotómetro HACH DR 2800™

El crecimiento bacteriano inicial tuvo un mejor desarrollo en Agares Mueller y Agar Nutritivo en un aproximado del 80% del total de una caja Petri en 72 horas aproximadamente.

La producción de voltaje promedio de salida de la celda CCM1 fue de 0,059 V, proveniente de la concentración de 30 ppm $\pm$ 3,3% de Nitratos, que a su vez se redujo a una concentración de 20,7 ppm $\pm$ 2,5% significando un porcentaje de reducción de 22,47% de su concentración inicial, la CCM2 produjo un voltaje promedio de salida de 0,105 V y la concentración de nitratos en este caso de 60 ppm $\pm$ 13,4% se redujo a una concentración de 40,6ppm $\pm$ 11,6% significando un porcentaje de reducción de 12,87% al final del experimento en 15 días para los dos casos.

La cantidad de voltaje producido en relación a la concentración de nitratos suministradas a las diferentes celdas, en la celda dos (CCM2) con una concentración de nitratos de 60 ppm, que recibía la concentración mayor del contaminante (nitratos) presentaba picos por encima de las demás celdas alcanzando un voltaje máximo de 0,377 V, en comparación a la celda 1 (CCM1) que contenía una concentración menor de nitratos de 30ppm que alcanzo un voltaje máximo de 0,132 V y de igual forma superior a la celda tres (CCM3) que era el grupo control que alcanzo un voltaje máximo de 0,112 V, este grupo control se encontraba formado a base de agua natural(tesalia) y de solo bacteria; para de esa manera comparar la producción de voltaje obtenida a través de esta sin la presencia del contaminante.

Por tal motivo este estudio sugiere que la producción de bioelectricidad está relacionada a la concentración del contaminante (nitratos), es decir a mayor concentración de nitratos existe una mayor producción de bioelectricidad. (Ver Fig 4)

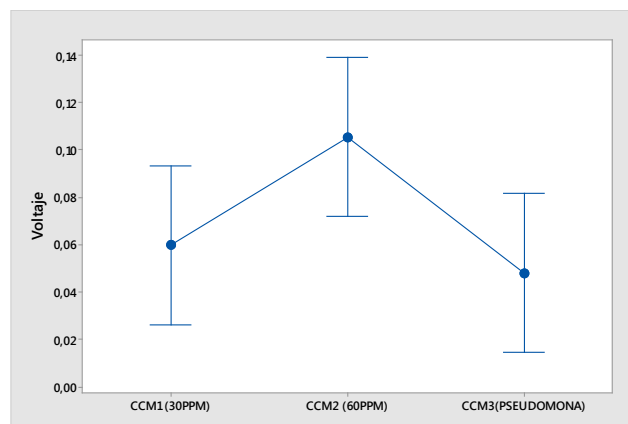


Figura 4: Producción de bioelectricidad según las concentraciones suministradas

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La cepa bacteriana Pseudomonas perteneciente a la especie aeruginosa, tiene la capacidad de generar bioelectricidad gracias a sus propiedades nitrificantes, propias de dicha especie que al entrar en contacto con el agua residual sintética a base de nitrato de potasio fue capaz de liberar electrones y producir bioelectricidad.

Este género de bacterias es considerado anaerobio facultativo, por lo tanto al encontrarse en un medio anóxico (cámara anódica) fue capaz de adaptarse al proceso de conversión de energía electroquímica a energía eléctrica mediante un compuesto inorgánico (nitrato de potasio). La mejor producción de bioelectricidad fue a una concentración de nitratos de 60 ppm con un voltaje promedio final de salida de 0,105 V y con un porcentaje de reducción final del contaminante de 12,87%.

Se sugiere usar las CCMS para producir electricidad a base de compuestos químicos y determinar la diferencia existente con las celdas que producen electricidad a base de compuestos biológicos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Guillen and J. Abreu, "Energías Renovables y Conservación de Energía (Renewable Energies and Energy Conservation)," Int. J. Good Conscienc. Abril, vol. 11, no. 1, pp. 141–155, 2016.
- [2] U.S. Energy Information Agency, "International Energy Outlook 2013," Outlook 2013, p. 312, 2013.
- [3] C. Calderón, D. Jaramillo, A. Ríos, and G. Brito, "Monitoring of Microbial Population of the Páramo Soil of the Charge Zone of Lake Mapahuiña in Chimborazo-Ecuador," Perfiles, vol. 1, no. 1, pp. 23–30, 2016.
- [4] A. Gomes, C. La Rotta, M. Nitschke, and E. González, "Evaluation of Current Output in

Pseudomonas Aeruginosa Microbial Fuel Cells Using Glycerol as Substrate and Nafion 117 as Proton Exchange Membrane, ECS Trans, vol. 41, no. 1, pp. 2011-2017, 2011

- [5] D. R. Bond and D. R. Lovley, "Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes Electricity Production by *Geobacter sulfurreducens* Attached to Electrodes," Appl. Environ. Microbiol., vol. 69, no. 3, pp. 1548-1555, 2003.
- [6] P. Murrian, K. Rofhental, M. Pfaller. Microbiología médica, Ed. España: Elsevier Mosby, 2006.
- [7] W. Li, G. Sheng, X. Liu, P. Cai, M. Sun, X. Xiao, Y. Wang, Z. Tong, F. Dong, and H. Yu, "Biosensors and Bioelectronics Impact of a static magnetic field on the electricity production of *Shewanella* -inoculated microbial fuel cells," Biosens. Bioelectron., vol. 26, no. 10, pp. 3987-3992, 2011.
- [8] Revelo, D., Hurtado, N. Y Ruiz, J., 2013. Celdas de Combustible Microbianas (CCMs): Un Reto para la Remoción de Materia Orgánica y la Generación de Energía Eléctrica Microbial Fuel Cells (MFCs): A Challenge for the Removal of Organic Matter and Electricity Generation. Información Tecnológica, vol. 24, no. 6, pp. 17-28. DOI 10.4067/S0718-07642013000600004.
- [9] Feng, Y., Yang, Q., Wang, X. Y Logan, B.E., 2010. Treatment of carbon fiber brush anodes for improving power generation in air-cathode microbial fuel cells. Journal of Power Sources, vol. 195, no. 7, pp. 1841-1844. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2009.10.030.
- [10] IPNI, 2017. Nitrato de potasio [en línea]. 2017. S.l.: s.n. Disponible en: [https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/E33AED1504ADCE3D85257BBA0059BEAE/\\$FILE/NSS-ES-11.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss-es.nsf/0/E33AED1504ADCE3D85257BBA0059BEAE/$FILE/NSS-ES-11.pdf).
- [11] Rodriguez, N. y Toro, C., 2013. Estandarización del tiempo de incubación y concentración de CaCO₃. SO₄ (NH₄)₂ y KNO₃ para la prueba del NPM con bacterias nitrificantes y desnitrificantes usando como matriz compost. S.l.: s.n.



Alex Guambo G. Autor nació en Riobamba, Ecuador, en 1991. Recibió una Ingeniería en Biotecnología Ambiental de la ESPOCH en 2015. Desde 2013 hasta la actualidad ha estado involucrado en el Desarrollo de Proyectos de Investigación, Redacción de Artículos Científicos en el CEAA. Su campo de investigación incluye la bioelectricidad y las energías renovables.



Silvia Alexandra Paña. - Nació en Riobamba en 1991. Recibió su título de Ingeniera en Biotecnología Ambiental de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en 2017. A mediados del año 2015 inicio se ha venido involucrando con su apoyo y asistencia en proyectos de investigación para el Centro de energías alternativas y ambiente (CEAA) perteneciente a la ESPOCH.



Cristina Gabriela Calderón Tapia. Nació en la ciudad de Riobamba-Ecuador en 1990. Recibió su título de Ingeniera en Biotecnología de la Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE, Ecuador en el 2014, y su título de Máster Universitario en Genética Molecular y Biotecnología de la Universidad de Sevilla, España en el 2016. Sus campos de investigación están relacionados con la generación de energías renovables a partir de microorganismos, el desarrollo de bioenergía y depuración de aguas contaminadas mediante consorcios microbianos.



Magdy Echeverría G. Nació en Riobamba, Ecuador, en 1963. Es investigadora profesional y profesora principal en la Escuela Politécnica Superior Chimborazo ESPOCH, Ecuador. Título de tercer Nivel Dra en Química en el ESPOCH, Dra (Ph.D.) Ciencias Ambientales de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, UNMSM, Perú, Magister en Gestión Ambiental (UNACH); Magister en Gestión de Proyectos Educativos y Sociales (UNACH); Diploma Superior en Liderazgo y Gestión (UNACH); Diploma Superior en Las Nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación y su Aplicación en la Práctica de la Enseñanza Ecuatoriana (UNL); Diploma Superior en Formulación y Evaluación de Proyectos de Investigación. Actualmente profesora titular en la ESPOCH (desde noviembre de 1995).

Characterizing urban heat island in Cuenca (Ecuador). Effect of urban morphology

Caracterización de la isla de calor urbana en Cuenca (Ecuador). Efectos de la morfología urbana.

A. Bustamante¹

D. Orellana²

¹Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador

E-mail: andres.bustamantec@ucuenca.ec

²Facultad de Arquitectura y Artes Aplicadas, Universidad Tecnológica Indoamérica, Quito, Ecuador

E-mail: dianaorellana@uti.edu.ec

Abstract

The present investigation of experimental type compares the morphological incidence of urban canyons in the urban heat island (ICU) of the historical center of Cuenca. Six study canyons are selected according to north-south and east-west orientation, and based on H/W ratio values between facade heights (H) and street widths (W). Selected canyons are studied based on morphological descriptors such as the sky view factor (SVF) and the relative height factor (FHR). In addition, using the Ecotect software, the radiation absorbed by the horizontal and vertical surfaces of the canyon is calculated based on properties of its materials. Exploratory data of ambient temperature and wind speed are taken into the canyons on days of the last week of November 2016, which coincides during period of high radiation and temperature. Temperature of each canyon is compared with the data from the Llacao rural station of similar altitude with respect to the urban center, for the study of ICU in the day-time period (6am to 6pm) and night-time period (6pm to 6am). Finally, during day-time period it is identified that the Huayna Cápac canyon with an H/W of 0.28, a SVF of 0.66, a FHR of -0.36, north-south orientation and with the highest radiation absorption on facades and streets exceeded in 2° C to the Presidente Córdova canyon with H/W of 1.47, SVF of 0.34, FHR of -0.67, east-west orientation and with the lowest radiation absorption on surfaces of canyon.

Index terms— Cuenca; morphology; sky view factor; urban canyon; urban heat island.

Resumen

El presente trabajo es de tipo experimental y compara la incidencia morfológica de cañones urbanos en la isla de calor urbana (ICU) del centro histórico de Cuenca. Se seleccionan seis cañones de estudio de acuerdo a la orientación norte-sur y este-oeste, y en base a valores de la proporción H/W obtenido de alturas de fachadas (H) y anchos de vía (W). Los cañones seleccionados se estudian en base a descriptores morfológicos como el factor de vista de cielo (SVF) y el factor de altura relativa (FHR). Adicionalmente, mediante el uso del software Ecotect se calcula la radiación absorbida por las superficies horizontales y verticales de los cañones en base a propiedades de los materiales. Al interior de los cañones se toman datos exploratorios de temperatura ambiente y velocidad de vientos en días de la última semana de noviembre de 2016 que coincide en periodo de alta radiación y temperatura. La temperatura de cada cañón se compara con los datos de la estación rural de Llacao de similar altitud al centro urbano, para estudiar la ICU en el periodo de día (6h a 18h) y de noche (18h a 6h). Finalmente, para el periodo de día se identifica que el cañón de Huayna Cápac con un H/W de 0.28, un SVF de 0.66, un FHR de -0.36, orientación norte-sur y con mayor absorción de radiación en fachadas y vías supera en 2 °C al cañón de Presidente Córdova con H/W de 1.47, SVF de 0.34, FHR de -0.67, orientación este-oeste y con la menor radiación absorbida en superficies del cañón.

Palabras clave— Cañón urbano; Cuenca; factor de vista de cielo; isla de calor urbana; morfología.

Recibido: (05-01-2018), Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial
Bustamante, A.; Orellana, D. (2018). "Caracterización de la isla de calor urbana en Cuenca (Ecuador). Efectos de la morfología urbana". El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

1. INTRODUCCIÓN

Una de las grandes problemáticas urbanas del siglo XXI es la isla de calor urbana (ICU) que se define como el incremento térmico del centro urbano respecto a la zona rural. Este fenómeno está identificado en ciudades altamente urbanizadas, en las que factores como la escasa vegetación, fuentes de calor antropogénico, y materiales empleados en construcción son asociados como causantes de la ICU [1], [2].

Estos materiales de construcción se identifican en la morfología urbana propia de las ciudades y pueden estudiarse en escalas de actuación meso y micro. Para esta última escala se usa un modelo ideal -cañón urbano- [1], [5] que es la configuración espacial entre fachadas y vías, donde se evalúa la temperatura interior y se estudian configuraciones de geometría y orientaciones que definen las ganancias térmicas por radiación. Además se han realizado mediciones de temperatura en distintos puntos de un cañón [4].

En estos estudios iniciales de morfología se puede identificar la propuesta de algunos factores geométricos como: el ratio H/W que relaciona la altura de fachada y anchos de vía; el sky view factor -SVF- y el factor height relative -FHR- que determinan el grado de obstrucción del entorno en base a las características de la geometría; la orientación de las calles; y las propiedades físicas de los materiales como el albedo. El SVF se ha usado en estudios de clima urbano, biometeorología, clima forestal, arqueología, recursos en energías renovables y otras aplicaciones [5]. Por su parte, el FHR se utiliza como indicador de incidencia del entorno desde un punto de evaluación, y puede estar al interior o al exterior del cañón y es útil para definir la incidencia de radiación.

En inicios de este nuevo siglo el cambio climático es reconocido de forma global y la creciente urbanización refuerzan el rol de la morfología urbana que no solo se lo estudia como una simple aproximación por la modificación del balance de energía, sino se vuelve un factor especial para mitigar el incremento térmico [6] que en la mayoría de casos resulta perjudicial y se asocia al alto consumo energético, concentración de polución del ambiente y estrés térmico [7]. Es así que en el contexto global el entendimiento de la morfología supone una vía fundamental hacia posibles soluciones desde el diseño urbano.

Estudios han caracterizado la morfología en relación a la ICU [8], [9], sin embargo, una primera diferenciación para efectos de sus agravantes está bien planteada desde el conocimiento de la latitud y la densificación edificatoria propia de las ciudades. Así la importancia de la morfología tiene un papel indispensable en ciudades cálidas relacionado a un alto consumo de energía por climatización [10]. Este último aspecto de incremento de consumo energético se evidencia en ciudades de la costa del pacífico -tropicales

y subtropicales- entre estas Guayaquil, Lima, Antofagasta y Valparaíso, en donde la ICU es identificada considerando categorías del tejido urbano, como morfologías típicas que van de una baja hasta una alta densificación en altura [11].

Por otro lado, el estudio de la morfología urbana en relación a la ICU ha sido relegado en ciudades de climas no cálidos y densificaciones bajas en alturas como el caso de Cuenca, donde se ha identificado la isla de calor con una variación térmica de 2 °C [12] y se ha evaluado el espacio público destacando la importancia de la vegetación [13] que de hecho es la estrategia más sugerida para mitigar el impacto de la ICU [7]. No obstante, el estudio de los cañones urbanos para la ciudad de Cuenca no es suficiente para abordar la ICU.

En este sentido, considerando el limitado conocimiento de la ICU desde efectos de la morfología en Cuenca, resulta necesaria una caracterización de la misma como un aspecto básico que permitirá la generación de propuestas y estudios desde el diseño urbano. Así, el objetivo del presente estudio es evaluar el aspecto morfológico a través del análisis y comparación de cañones urbanos en el mes más cálido con el fin de determinar las confluencias y divergencias entre ellos, que sirvan como base para la caracterización de la ICU en Cuenca.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Área de Estudio

La presente investigación se desarrolló al sur de la República del Ecuador en el centro histórico de Cuenca en las coordenadas 2°54'08"S y 79°00'19"O, que está en la zona climática continental lluviosa [14]. La delimitación específica se basó en la unidad funcional del Centro Histórico de la Ciudad establecida en el Plan de Movilidad y Espacios Públicos [15] (ver Fig. 1), y que está conformada por 5025 edificaciones. Previo a la determinación de los casos evaluados, se realiza un diagnóstico del número de pisos a través de registros fotográficos desde Google Street View, y se identifica los anchos de vías en base a la geometría obtenida de la base de datos predial del Municipio de Cuenca.

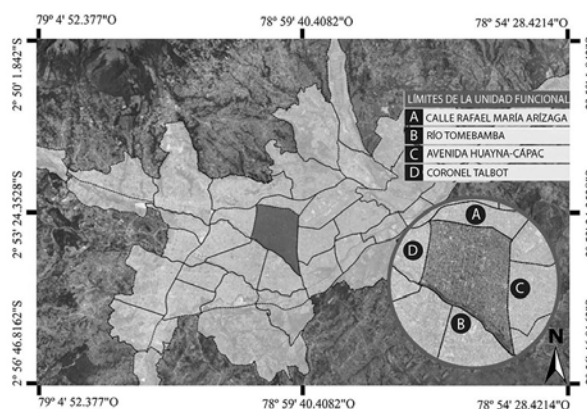


Figura 1: Unidad Funcional del Centro Histórico de Cuenca.

2.2. Intensidad de ICU

Para evaluar la intensidad del fenómeno de la ICU se utilizó la expresión 1, empleada en varias investigaciones [1], [3], [16], [17]:

$$UH_{\text{máx}} = \text{máx. (Turban - Trural)} \quad (1)$$

Donde:

UH_{max} = Intensidad máxima de Isla de Calor

Turban = Temperatura en la zona urbana

Trural = Temperatura en la zona rural

En base a la expresión 1, se encontraron diferencias por cada hora de estudio entre los datos tomadas in situ (urbe) y la estación meteorológica (rural). Para ello se seleccionó una estación ubicada en la zona rural a una altitud similar a la del área estudiada, debido a que la expresión 1 debe asumirse en un mismo nivel (evitar diferencias térmicas por altitud). En este caso como punto de partida para la caracterización se seleccionó la estación rural de Llacao de similar altitud (2550 msnm) que es la más próxima en altitud respecto al área urbana.

Por otro lado, los periodos de evaluación de la ICU se diferencia de día y noche que coinciden con la actividad humana [18]. Entonces se estudia de 18 h a 6 h para el periodo nocturno [19]. Además, este periodo de 18 h y 6 h coincide con la puesta y salida del sol.

2.3. Mediciones In Situ

La ICU se evalúa en el mes más cálido y con la más alta radiación. En Cuenca la temperatura mensual máxima de 21,6 °C corresponde a noviembre [20]. Las mediciones se realizaron en la tercera semana del mes de noviembre del 2016 en días de cielo semi despejado y sin lluvia. Se usaron simultáneamente anemómetros de similares características con sensores de temperatura (rango de 29°C a 70°C y resolución de 0.1°C), velocidad de vientos (rango de 0.6 a 40 m/s y resolución de 0.1 m/s) y humedad relativa (rango de 10-90% y resolución de 0.1%), se estima un margen de error del 1%. Además, se generaron registros cada 10 minutos. Los equipos se situaron siguiendo recomendaciones como orientarlos a un mismo lugar y a una misma altura [21] y en base a recomendaciones de otros estudios [19], [22], [23].

2.4. Elaboración de Modelos y evaluación de los descriptores morfológicos

Se seleccionaron casos de estudio de acuerdo al ratio H/W que es un coeficiente entre la relación de altos de fachada y anchos de vía, y de acuerdo a orientaciones predominantes este-oeste y norte-sur. Se elaboran modelos tridimensionales de cada cañón urbano que se menciona a continuación.

Primero se hace un levantamiento fotográfico de cada fachada. Luego estas fachadas son rectificadas con medidas reales a través del software OnSite-photo 2007. La determinación de estas medidas nos permite modelar los tramos en el software Revit 2016. En una última etapa estos modelos son exportados al software Ecotect Analysis 2011.

Por otro lado los descriptores morfológicos [24] empleados fueron los siguientes:

Sky View Factor (SVF)

EL SVF es determinante en la entrada y salida de radiación, así como en la ventilación. En un estudio de microescala, este parámetro define la percepción visual externa y se define desde un punto desde la calle, que corresponde a la zona visible de cielo de donde proviene la luz celeste y radiación solar [24]. El valor del SVF va de 0 con un cielo totalmente cerrado, a 1 con un cielo totalmente abierto.

Para la determinación del SVF, se utilizó el software Ecotect Analysis 2011, que mediante un procedimiento de cálculo bidimensional el porcentaje de cielo visible se genera a partir de un modelo tridimensional de los cañones estudiados [25].

Factor de Altura Relativa (FHR)

Este factor define la influencia del entorno en el acontecer climático. Para esto nos basamos en que un lugar puede estar más bajo o más alto en relación a los demás puntos del entorno, que en este caso serían las demás edificaciones [24].

El procedimiento de cálculo considera la relación de ángulo entre la diferencia de altura entre el punto a evaluar y cada punto del entorno circundante y el trayecto horizontal al que esta cada punto del entorno. Si el punto está más bajo se considera negativo y si está más alto es positivo. Para su cálculo se utilizó el procedimiento [24] que se basa en el modelo del Eixample de Barcelona [26]

Radiación en superficies

La relación entre variables de morfología se complementa con el cálculo de radiación. La radiación que absorben algunas superficies es en base a sus propiedades físicas y por la liberación de su energía que son determinantes en el incremento de la ICU. Así, esta investigación analizó específicamente la morfología implícita en el cañón urbano. Se utilizó el software Ecotect Analysis 2011 para este cálculo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Morfologías del estudio

Luego de registrar los anchos de vías y altos de fachada, se elabora el siguiente mapa (ver fig. 2). Los resultados muestran que el 62% de edificaciones mapeadas son menores a 3 pisos y el 58% de ancho de vías está en el rango de 10 m a 15 m. Se observa que los valores de H/W se encuentran alrededor de 0.28 cuando presentan vías superiores a 15 m y menores a 3 pisos, y se alcanzan valores de H/W de 1.5 en casos de edificaciones mayores a 6 pisos y vías menores a 10 m. Se estudiaron cañones urbanos con valores opuestos entre ratios altos y bajos y un valor medio entre estos. Entonces, se eligieron tres casos de morfologías por cada orientación norte-sur y este-oeste (ver tabla 1).

Tabla 1: Pares de casos de estudio

Norte-sur	Este-oeste
Huayna Cápac (H)	Larga (4)
Altura: < 3 pisos	Altura: > 3 pisos
Vías: > 20 m	Vías: 10-15 m
ratio H/W: 0,28	ratio H/W: 0,38
Tarqui (H)	Presidente Córdova (12)
Altura: 3-6 pisos	Altura: > 6 pisos
Vías: > 10 m	Vías: 10-15 m
ratio H/W: 1,25	ratio H/W: 1,47
Padre Aguirre (K)	Sucre (5)
Altura: 3-6 pisos	Altura: < 3 pisos
Vías: 10 m	Vías: > 10 m
ratio H/W: 0,71	ratio H/W: 0,83

* Los cañones enumerados se pueden verificar en la Fig. 2

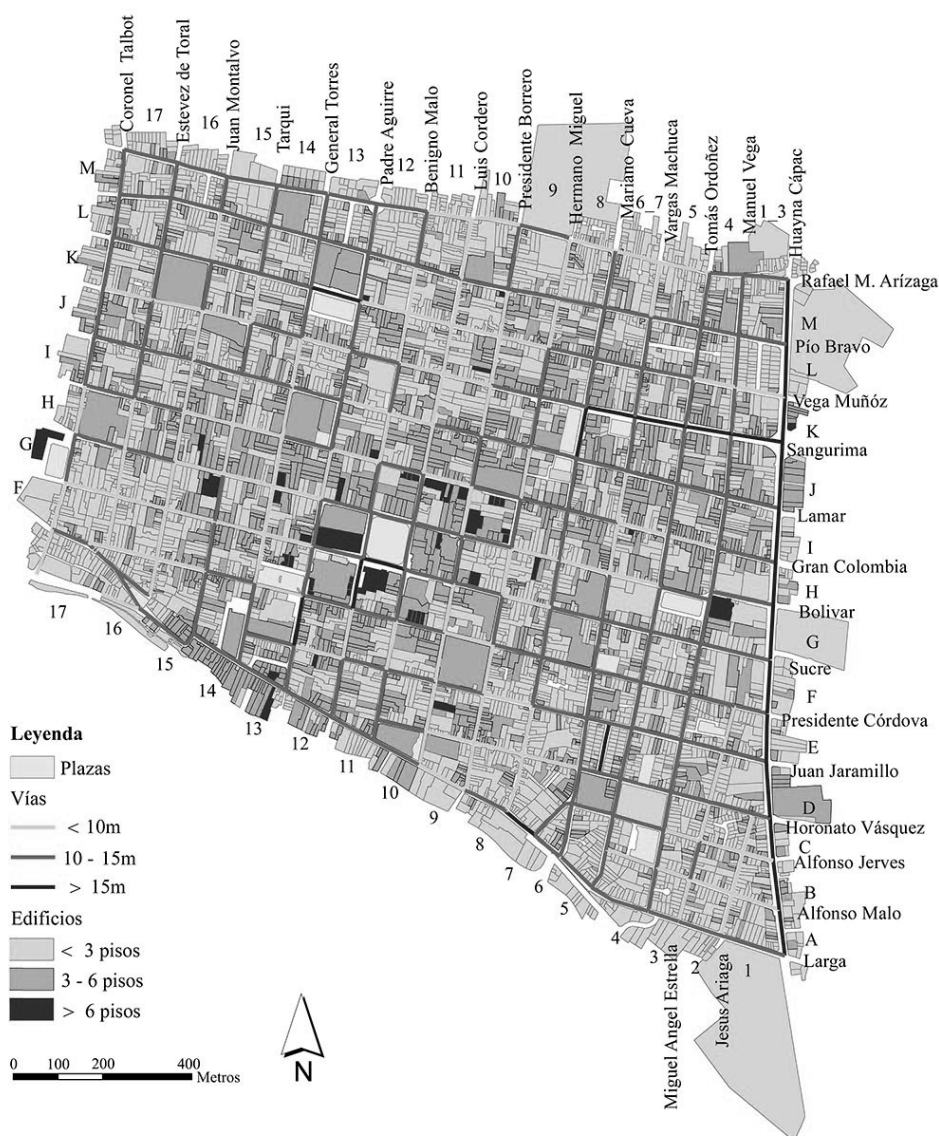


Figura 2: Mapeo de Morfologías en la unidad funcional del centro histórico de Cuenca.

3.2. Registros de temperaturas

Los resultados de ICU tanto de día y noche para los casos evaluados se muestran en la tabla 2. Los resultados muestran ICU similares para los tramos de igual orientación. Para el periodo de día (6h a 18h), en el caso de Huayna Cápac, Tarqui y Padre Aguirre que son cañones orientados al norte-sur, la máxima diferencia bordea los 6 °C. Por otro lado en la dirección este-oeste los cañones Larga, Presidente Córdova y Sucre también presentan un incremento térmico cercano a 4°C, pero inferior a los cañones norte-sur. Finalmente podemos encontrar una diferencia de hasta 2 °C por morfologías en el periodo de día para los cañones de Huayna Cápac y Sucre de diferente orientación.

En cuanto al comportamiento nocturno (18h a 6h) en el caso de Huayna Cápac y Tarqui que son cañones orientados al norte-sur, son los únicos en enfriarse respecto a Llaqueo, y alcanzan una temperatura inferior hasta en 4°C. En este grupo de cañones norte-sur solo Padre Aguirre se mantiene más caliente en 1°C respecto a Llaqueo. En cuanto al grupo de tramos este-oeste todos tienen temperatura mayor a Llaqueo. Finalmente se muestra que entre el cañón norte-sur de Huayna Cápac y el cañón de Larga en orientación este-oeste se puede hallar una diferencia superior a 6°C por morfologías.

3.3. Registro de vientos

En la fig. 3 se muestra el comportamiento de vientos. Los tramos que registran mayor incidencia de vientos fueron Huayna Cápac en sentido norte-sur y Presidente Córdova en sentido este-oeste. Por otro lado, el tramo de Larga en sentido este-oeste no registra vientos. Además, una observación importante es que las mayores intensidades de vientos se registran en horas cercanas al medio día, que coinciden con los mayores registros de temperatura. De esta observación, resulta más complicada la interpretación de los vientos, no solo asociado a la morfología, también debido a la temperatura y orientación.

3.4. Ratio H/W, SVF y FHR

Se debe tomar en cuenta que los ratios H/W mayores a 1 muestran tendencia de predominio de altura, mientras que ratios H/W más cercanos a 0 muestran un predominio de ancho de vías. La Fig. 4 describe la tendencia de todos los seis casos estudiados en relación de la ICU y H/W en los periodos de día y noche así como por orientaciones.

En el caso de día se observa que no existe correlación ($R^2=0,27$), esto debido al limitado número de casos. Sin embargo se observa una tendencia de que menor ratio existe mayor ICU, y además se puede observar que los tramos norte-sur se calientan más que los tramos este-oeste para el periodo de 6h a 18 h.

Para el caso nocturno no se identifica ninguna correlación entre H/W e ICU ($R^2=0,02$). La tendencia muestra un comportamiento opuesto al de día, es decir a mayor ratio H/W existe mayor ICU. De este último resultado se muestran la tendencia de que mayor ratio mayor temperatura [27], además que la ICU se lo identifica como un fenómeno nocturno [19].

Tabla 2: Intensidad de ICU entre cañones urbanos y estación de Llaqueo

Cañones del estudio	T° Periodo de 6 a 18h			T° Periodo de 18h a 6 h		
	Cañón	Llaqueo	ICU día	Cañón	Llaqueo	ICU noche
Huayna Cápac	24	16.6	5.8	9.4	13.6	-3.8
Tarqui	23.6	16.6	4.8	9.9	13.6	-3.3
Padre Aguirre	23.3	16.6	5.8	14.56	13.6	1.3
Larga	21.8	16.6	4.4	15.7	13.6	2.8
Presidente Córdova	21.3	16.6	3.9	15.4	13.6	2.55
Sucre	21.2	16.6	3.8	13.81	13.6	0.5

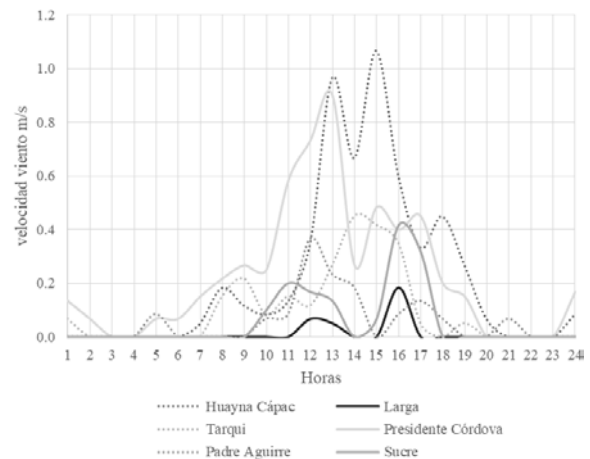


Figura 3: Registro de velocidad de viento en los cañones de estudio.

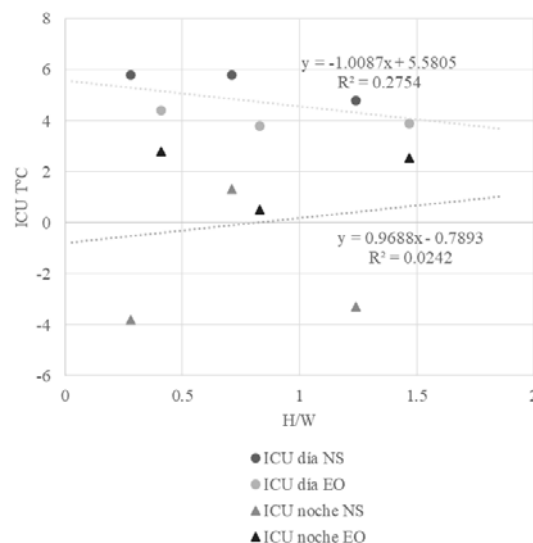


Figura 4: Relación de Temperatura máxima y Ratio H/W

De los modelos evaluados en Ecotect, se obtiene los porcentajes del SVF para los tramos de estudio en la fecha de estudio (ver tabla 3). La misma tabla muestra que los cañones con mayor SVF corresponden a Huayna Cápac (0,66) y Padre Aguirre (0,57), frente al tramo con menor SVF que corresponde al cañón de la Presidente Córdova (0,34). Adicionalmente la misma tabla muestra los valores obtenidos manualmente para el valor de FHR.

Tabla 3: Valores de SVF y FHR de casos de estudio

Cañones del estudio	SVF	FHR
Huayna Cápac	0.66	-0.36
Tarqui	0.44	-0.55
Padre Aguirre	0.57	-0.43
Larga	0.58	-0.41
Presidente Córdova	0.34	-0.67
Sucre	0.45	-0.54

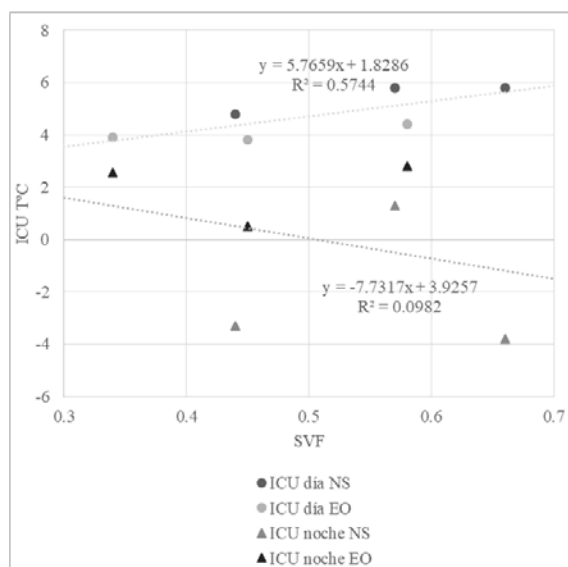


Figura 5: Relación de SVF y temperatura

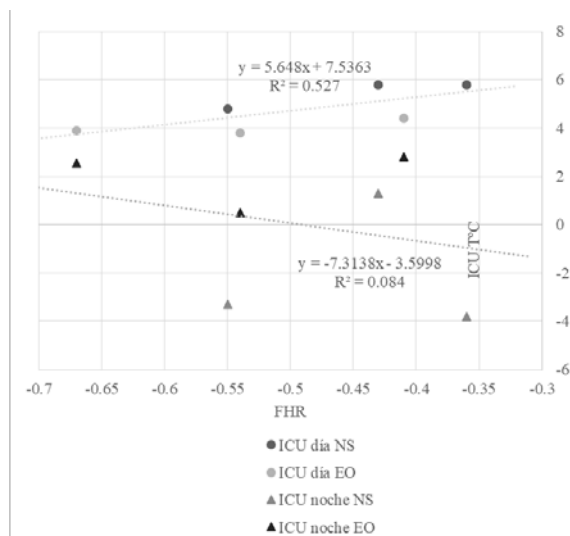


Figura 6: Relación de FHR y temperatura

La Fig. 5 describe la tendencia de todos los seis casos estudiados en relación de la ICU y SVF en los periodos de día y noche, así como por orientaciones.

En el caso de día se observa que existe correlación positiva moderada ($R^2=0,57$), y se observa una tendencia de que menor ratio existe menor ICU, y además se puede observar que los tramos norte-sur se calientan más que los tramos este-oeste para el periodo de 6h a 18 h. En este caso podemos observar resultados similares en los estudios de Carrasco [28] y en la mayoría de estudios de SVF que coinciden con esta tendencia de a mayor SVF mayor ICU, de hecho se puede sugerir que la latitud no incide, más bien depende de la geometría y orientación. Para el caso nocturno se identifica ninguna correlación entre SVF e ICU ($R^2=0,09$). De todos modos, la tendencia muestra un comportamiento opuesto al de día, es decir a mayor SVF existe menor ICU.

Finalmente, el FHR (ve fig. 6) muestra el mismo comportamiento que el del SVF, incluso muestra los mismos valores de R^2 en los periodos de día y noche y según orientaciones del estudio. En consecuencia tanto el SVF como el FHR muestran la misma información.

3.5. Superficies y Radiación

En el software Ecotect Analysis 2011 se evaluaron los casos de estudio en el periodo diurno de 6h a 18h, considerando la semana con mayor radiación del mes de noviembre de 2016. Los ficheros climáticos empleados en los modelos se generaron en base de la información de la estación meteorológica urbana de El Vecino que reúne la información necesaria.

De forma general, los cañones urbanos a nivel de calzada y de veredas presentan pisos de piedra y veredas de piedra y baldosa con excepción de la calzada de Huayna Cápac que es de asfalto. A nivel de fachadas tienen un predominio de enlucidos y de color tipo pastel y las cubiertas son de teja característico del centro de la ciudad. Es importante notar que los valores del albedo según el color van de no reflejantes de valor 0 (negro) a reflejantes de valor 1 (blanco). Los valores promedios de albedo para las superficies del estudio fueron: Superficies de piso: 0.3; Superficies de Fachada: 0.5; y Superficies de cubierta: 0.3; que al menos a nivel de paredes y pisos son similares a los usados en el estudio de Palme [11].

Finalmente, la fig. 7 muestran todos los cañones y la radiación absorbida en el periodo de 6h a 18h en un día promedio (de la semana de noviembre de 2016 estudiada) en rangos diferenciados desde el valor más bajo (oscuro) hasta el más alto (claro) en Wh/m² (cantidad de energía recibida durante el tiempo de evaluación). La definición de un rango estándar de radiación absorbida no se considera, ya que en este caso se hace un análisis en un periodo particular y para una tipología de materiales puntual.

La misma fig. 7 muestra que las superficies horizontales absorben más radiación que las verticales. La radiación acumulada es mayor en el cañón de Huayna Cápac tanto a nivel de vía (21 113 Wh/m²) como a nivel de fachada (8 339 Wh/m²) con menor ratio H/W y alto SVF en sentido norte-sur, y por otro lado la radiación es menor en el cañón de Presidente Córdova a nivel de vía (10 431 Wh/m²) y fachada (2 958 Wh/m²) con un mayor ratio H/W y bajo SVF en sentido este-oeste. Se encuentra una relación clara entre radiación y geometría.

En el presente estudio las superficies de vías y techos tienen valores bajos de albedo que permiten la mayor absorción de radiación. De la consideración anterior planteamos dos análisis. El primero que al interior del cañón urbano las ganancias significativas por radiación son por calzadas y veredas. Por otro lado, en el caso de valores mayores de SVF tiene mayor facilidad para dispersar calor.

El segundo aspecto, llevado a un límite superior del y considerando que cerca del 60% de las áreas urbanas están cubiertas por techos y pavimentos [29] citado en [30], este fenómeno de ICU podría amplificarse debido a la incidencia por cubiertas que tienen menor albedo y serían las responsables de liberar mayor energía de radiación absorbida en la noche.

3.6. Discusión final

El mapeo de la zona de estudio y la selección de morfologías fue fundamental para encontrar diferencias en una ciudad de densidad baja en altura. Así el rango de morfologías estuvo entre 0.25 a 1.7 (H/W) y a pesar de este rango limitado se hallaron tendencias importantes en el comportamiento de la ICU. Otros estudios [19], [22] muestran mayores valores para H/W que llegan hasta 4 o 5, en los cuales se define fácilmente la incidencia por morfología. Los cañones evaluados en Cuenca varían térmicamente y el rango edificatorio de esta parte de la ciudad es significativo en la ICU.

Así, muestran que una mayor densidad edificatoria está asociada al incremento térmico de la ciudad [31]. Se evaluó un periodo de temperatura y radiación alta, aunque las diferencias de estas son mínimas entre meses. En este caso se observó una oscilación térmica de hasta 15 grados por día para los tramos norte-sur. Por tal razón, la realidad en Cuenca debe priorizarse en base a un estudio diario antes que mensual, al menos en el comportamiento térmico de ICU.

Se responde a la hipótesis de que la morfología modifica el clima e incide en la contribución de la ICU. De hecho, un aspecto fundamental del estudio que condiciona el desempeño térmico de los cañones es la orientación que agrupa los casos de estudio a pesar de sus diferencias morfológicas. Por otro lado, Cabras considera la orientación como algo secundario [22].

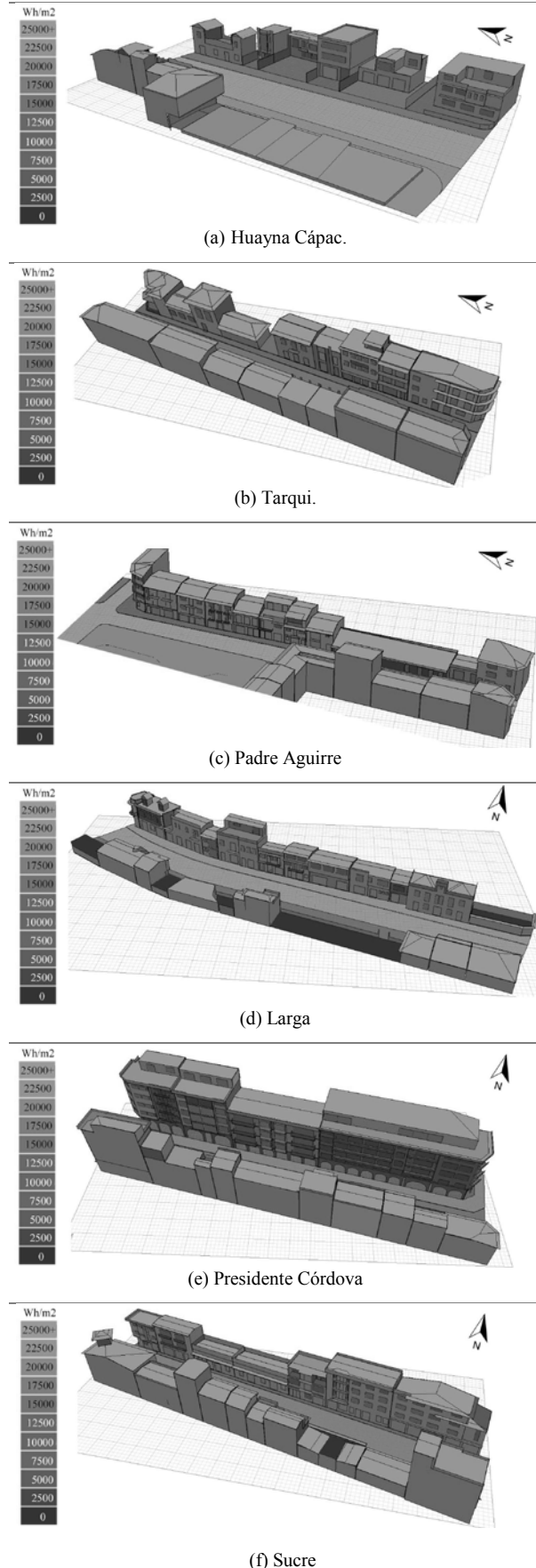


Figura 7. Radiación en superficies en casos de estudio.

La aplicación de la fórmula de intensidad de la ICU se asume para una superficie plana de altitud uniforme, tanto para la urbe como el campo. En nuestro caso de estudio esta fórmula no se puede aplicar directamente en relación a cualquier área rural, ya que previo a esto se debe seleccionar un área de similar altitud como punto de partida para evaluar el clima.

El SVF y el FHR son indicadores que se relacionan a la morfología del cañón. Estos definen y ubican de forma precisa el punto de evaluación que en este caso coincide con el punto de medición. Por otro lado el tema de vientos, más allá de identificar su dirección, resulta más importante la intensidad del mismo ya que de alguna forma el cañón le obliga una direccionalidad que al final influye en la ventilación del mismo [24]

Una limitación es el tamaño de muestra que considera 6 casos de estudio, sin embargo cada caso de estudio fue modelado en computadora, y tal proceso demandan mayor tiempo para el análisis detallado de cada cañón urbano.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Si bien se evaluó la morfología, la orientación condiciona el comportamiento térmico de los cañones del estudio. De esta manera se observa que los cañones norte-sur se calientan más y pierden más fácil calor. Por otro lado los cañones en el sentido este-oeste tienen una menor oscilación térmica.

El SVF Y FHR resultan útiles ya que son factores que reconoce la obstrucción del entorno en 360° en comparación al H/W que reconoce solo determinada orientación. El SVF mostró una tendencia en la ICU, donde un mayor SVF gana más temperatura en el día, pero un mayor SVF también pierde más temperatura de noche.

Las superficies horizontales como pavimentos y cubiertas absorben más radiación por su bajo valor de albedo, así estas inciden más al momento de liberar calor y contribuir en la generación de ICUs.

Los factores explicados geométricamente tienen relación con otros factores que modifican el clima, como el flujo vehicular y la vegetación no abordados. Finalmente, un reto para las ciudades andinas sugiere instrumentos válidos para evaluar nuestro clima que en este caso nos lleva a realizar una fuerte consideración de la topografía andina.

AGRADECIMIENTOS

La investigación forma parte del programa de la Maestría en Arquitectura Bioclimática de la Universidad de Cuenca, la misma que brindó la instrumentación y asesoramiento. Se agradece a las personas propietarias de los inmuebles que facilitaron el acceso para la toma de mediciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T. R. Oke, "Canyon geometry and the nocturnal urban heat island: Comparison of scale model and field observations," *J. Climatol.*, vol. 1, no. 3, pp. 237–254, 1981.
- [2] D. Perico-agudelo, "The Public Space of the City: O espaço público da cidade :," 2009.
- [3] T. R. Oke, "Street design and urban canopy layer climate," *Energy Build.*, vol. 11, no. 1–3, pp. 103–113, 1988.
- [4] R. Priyadarsini, W. N. Hien, and C. K. Wai David, "Microclimatic modeling of the urban thermal environment of Singapore to mitigate urban heat island," *Sol. Energy*, vol. 82, no. 8, pp. 727–745, 2008.
- [5] T. Hämmerle, T. Gál, J. Unger, and A. Matzarakis, "Different aspects in the quantification of the sky view factor in complex environments," *Acta Climatol. Chorol.*, pp. 53–62, 2014.
- [6] A. Rosas-Lusset and V. M. García, "La influencia de la configuración de los cañones urbanos en el confort del peatón," *Rev. Electrónica Nov. Sci.*, vol. 6, no. 1, pp. 228–253, 2013.
- [7] A. M. Rizwan, L. Y. C. Dennis, and C. Liu, "A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island," *J. Environ. Sci.*, vol. 20, no. 1, pp. 120–128, 2008.
- [8] A. G. Touchaei and Y. Wang, "Characterizing urban heat island in Montreal (Canada) - Effect of urban morphology," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 19, pp. 395–402, 2015.
- [9] M. Taleghani, L. Kleerekoper, M. Tenpierik, and A. Van Den Dobbelsteen, "Outdoor thermal comfort within five different urban forms in the Netherlands," *Build. Environ.*, vol. 83, pp. 65–78, 2015.
- [10] C. M. Nakata-osaki, L. Cristina, L. De Souza, D. S. Rodrigues, P. De Pós-graduação, and E. Urbana, "Uma ferramenta para cálculo da máxima intensidade da ilha de calor noturna," no. 1, pp. 1–10, 2015.
- [11] M. Palme, L. Inostroza, G. Villacreses, A. Lobato-Cordero, and C. Carrasco, "From urban climate to energy consumption. Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect," *Energy Build.*, vol. 145, pp. 107–120, 2017.
- [12] V. Guillén-Mena and D. Orellana, "Un acercamiento a caracterizar la isla de calor en Cuenca, Ecuador," pp. 1–14, 2016.

- [13] V. Guillén-Mena and D. Orellana, "La influencia de la vegetación arborea urbana para disminuir el nivel de polución y alcanzar el confort climático," *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, pp. 67–75, 2016.
- [14] M. Palme, A. Lobato, J. Castillo, G. Villacreses, and M. Almaguer, *Estrategias para mejorar las condiciones de habitabilidad y el consumo de energía en viviendas*. Quito: INER, 2016.
- [15] I. Municipio de Cuenca, "Tomo III," in *Plan de Movilidad y Espacios Públicos*, Cuenca, 2015.
- [16] W. T. L. Chow and M. Roth, "Temporal dynamics of the urban heat island of Singapore," *Int. J. Clim.*, vol. 26, pp. 2243–2260, 2006.
- [17] G. J. Steeneveld, S. Koopmans, B. G. Heusinkveld, L. W. A. Van Hove, and A. A. M. Holtslag, "Quantifying urban heat island effects and human comfort for cities of variable size and urban morphology in the Netherlands," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 116, no. 20, pp. 1–14, 2011.
- [18] M. Palme, A. Lobato, and C. Carrasco, "Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Effect in Cities of Latin-American Pacific Coast," *Procedia Eng.*, vol. 169, no. November, pp. 199–206, 2016.
- [19] C. Nakata and L. de Souza, "Verification of the influence of urban geometry on the nocturnal heat island intensity," *J. Urban Environ. Eng.*, pp. 286–292, 2013.
- [20] Universidad de Cuenca, "Temperatura Ambiente en el periodo 2006-2015," Cuenca, 2016.
- [21] T. R. Oke, "Initial guidance to obtain representative meteorological observations at urban sites," *World Meteorol. Organ.*, no. 81, p. 51, 2004.
- [22] E. Cabras, "Efectos de la morfología de las calles en el fenómeno de la isla de calor urbana en la ciudad de Barcelona," *Universidad Politécnica de Cataluña*, 2014.
- [23] T. C. C. Nascimento, J. D. S. G. Júnior, and R. V. R. Barbosa, "Estudo Comparativo Entre Cânions Urbanos Formados Em Ruas Com Diferentes Configurações: Influência Da Verticalização Para O Clima Urbano," no. 1, 2015.
- [24] C. Carrasco, "Morfología y Microclima urbano. Análisis de la forma espacial y materiales como modeladores del microclima de tejidos urbanos mediterráneos costeros. El caso de la ciudad de Valparaíso," *Univesitat Politécnica de Catalunya*, 2008.
- [25] I. Tumini and E. Higuera García, "Urban microclimate and thermal comfort modelling: strategies for urban renovation," *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.*, vol. 7628, no. April, 2016.
- [26] A. Isalgué, J. Roset, and H. Coch, *Environmental Evaluation of an Urban Sector. REBUILD: The European Cities of Tomorrow - Shaping our European Cities for the 21st Century.*, Butera et. ETA-Florence, 1998.
- [27] N. E. Theeuwes, G. J. Steeneveld, R. J. Ronda, B. G. Heusinkveld, L. W. A. van Hove, and A. A. M. Holtslag, "Seasonal dependence of the urban heat island on the street canyon aspect ratio," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 140, no. 684, pp. 2197–2210, 2014.
- [28] C. Carrasco, M. Palme, and M. A. Gálvez, "Factor de cielo visible y el efecto isla de calor en Valparaíso," *Rev. Urbano*, vol. 34, pp. 26–33, 2016.
- [29] H. Akbari, H. Arthur, and Rosenfeld, "WhiteRoofsCooltheWorld, Directly OffsetCO2 and DelayGlobalWarming." p. 2pp, 2008.
- [30] K. M. Al-obaidi, M. Ismail, A. Malek, and A. Rahman, "Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review," *Front. Archit. Res.*, vol. 3, no. 3, pp. 283–297, 2014.
- [31] J. Fernández and N. García, "Caracterización de islas frescas urbanas - IFU- e la ciudad de Santiago de Cali, Colombia," *Entorno Geográfico*, vol. 9, no. 1, pp. 122–144, 2013.



Andrés Bustamante.- Nació en Cuenca en 1988. Recibió su título de Arquitecto en la Universidad de Cuenca en 2015; El presente artículo forma parte del programa para la obtención de Master en Arquitectura Bioclimática de la Universidad de Cuenca.



Diana Orellana.- Nació en Cuenca en 1986. Recibió su título de Master en la Universidad Politécnica de Cataluña. Su campo de investigación se encuentra relacionado con el urbanismo sustentable.

Construction of a 400W wind generator with recycled material in the Parish Tarqui, canton Cuenca-Ecuador

Construcción de un aerogenerador de 400W con material reciclado en la Parroquia Tarqui, cantón Cuenca-Ecuador

D. Icaza¹

A. Lojano²

¹Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador
Dirección de Carrera Ing. Eléctrica
E-mail: dicazaa@ucacue.edu.ec

²Universidad Católica de Cuenca, Cuenca, Ecuador
Estudiante de Ingeniería Eléctrica
E-mail: maurilojano@gmail.com

Abstract

The present article corresponds to the construction of a wind turbine of 400W of horizontal axis, constructed in base of recycled materials, specialized software was used like the MATLAB to carry out the analysis of data, besides the tests of performance were realized in Parish Tarqui being the Average wind speed in this sector of 5.3 m/s and wind turbine performance is 40%. This project reveals the process, the materials used and the operating conditions involved in order to have adequate energy production in shelter houses.

Resumen

El presente artículo corresponde a la construcción de un aerogenerador de 400W de eje horizontal, construido en base de materiales reciclados, se utilizó software especializado como el MATLAB para realizar el análisis de datos, además se realizaron las pruebas de funcionamiento en la Parroquia Tarqui siendo la velocidad promedio del viento en este sector de 5,3 m/s y el rendimiento de la turbina eólica es del 40%. Este proyecto revela el proceso, los materiales utilizados y las condiciones operativas que involucran para tener una producción de energía adecuada en viviendas tipo refugio.

Index terms— Construction of wind turbine, Tarqui, Innovation, Recycled materials, energy production.

Palabras clave— Construcción de aerogenerador, Tarqui, Innovación, Materiales reciclados, producción de energía.

I. INTRODUCCIÓN

En la Parroquia Tarqui ubicada a 12 km de la ciudad de Cuenca se pretende realizar la instalación de un generador eólico construido a base de materiales reciclados los cuales pueden ser aprovechados de manera óptima para la generación de energía eléctrica limpia y renovable.

A continuación se indica el lugar donde se realizará la implementación del aerogenerador.



Figura 1. Ubicación en la Parroquia Tarqui- Ecuador.

En este punto de coordenadas se realizará la investigación con la implementación del generador eólico previamente construido.

La energía eólica busca aprovechar la energía del viento para generar energía eléctrica, en este procedimiento se utiliza la energía del viento y, mediante un generador o alternador, convertir la misma a energía eléctrica que además cabe recalcar que es una fuente de energía limpia y de esta manera no se estaría contaminado el medio ambiente[5].

Es importante señalar que para este tipo de generación se deberá tener presente el origen del viento, la altura del sitio y la ubicación del aerogenerador, con estas condiciones necesarias y suficientes podríamos decir que nuestro aerogenerador funcionaría normalmente.

Un aerogenerador está conformado, básicamente, por dos conjuntos principales: por un lado, un rotor compuesto por un eje y la o las palas que es o son accionadas por el viento y, por el otro, un generador que se mueve por arrastre del rotor[16].

Aerogenerador de Eje Horizontal:

La principal desventaja de este tipo de modelo de eje horizontal radica en que toda la maquinaria y el control del aerogenerador deben ser dispuestos a gran altura y soportados por una estructura que resista el peso[2].

II. CONSTRUCCIÓN DEL GENERADOR EÓLICO DE TRES ASPAS DE EJE HORIZONTAL.

Para la construcción del generador eólico se debe de tener los siguientes materiales, los mismos que se presentan a continuación, con el detalle de cada uno de ellos y el proceso que se tuvo que realizar para la construcción del generador eólico casero con materiales reciclados. Estos pueden ser conseguidos sin ningún inconveniente tal como se detalla en la tabla 1.

Tabla 1. Listado de materiales.

Cantidad	Materiales
1	Generador eléctrico
1	Discos para corte de acero
1	Tubo PVC de 1m
15	Tornillo
15	Tuercas
8	Escuadras
1	Chumacera
5	Cable # 14

Descripción de los elementos principales.

El generador eléctrico es el corazón o el centro para el funcionamiento del aerogenerador el mismo que está expuesto a constante generación eléctrica. Es un motogenerador, se lo puede usar ya que tiene imanes permanentes y un bobinado.

Consta además de un eje que tiene un material magnético que induce una corriente en el estator que a su alrededor tiene un bobinado de alambre de cobre. Y al hacer girar este dispositivo se tendrá una corriente.

La chumacera sirve como base para que el aerogenerador pueda girar sobre su propio eje cuando el viento este en diferentes posiciones.

La pletina se utiliza para sujetar el motor generador, esto se complementará con los tornillos y tuercas que servirán para apretar contra el motor generador. Este material es muy fácil y barato de conseguir puede ser comprado en una ferretería, así como los tornillos de la que sí deberían de ser un material galvanizado para garantizar su durabilidad

Los tornillos serán acorde a como se vaya a ajustar el motor generador y el tipo de pletina que vaya a usar.

El disco de diamante se utiliza para sujetar las hélices del aerogenerador que además se deberá de realizar agujeros para de esta manera las hélices queden

ajustadas, este material que será parte de la construcción para las hélices pueden ser conseguidas en lugares de construcción ya que en la mayoría de casos los arrojan a la basura.

El tubo PVC es un material muy resistente ya que se lo usa para conexiones de agua fría o caliente, este material también puede ser conseguidos en lugares de construcción porque muchas veces quedan retazos o restantes por las conexiones que se realizan.

Como se podrá ver en la figura 2 y figura 3, el tubo PVC está diseñado de tal manera que pueda soportar agua y la variación del clima por lo que es ideal realizar las hélices del aerogenerador casero con este tipo de material.



Figura 2. Hélice Armada.



Figura 3. Hélices separadas.

Como se muestra en la figura 3 el corte deberá tener esa forma ya que con este tipo de aspas se mueve de una manera muy correcta.

Después de la explicación de cada uno de los elementos con la que se construyó el aerogenerador se muestra el Aerogenerador ya terminado.



Figura 4. Armado del aerogenerador.

Después de la construcción como se ve en la figura 4 se puso en marcha o en funcionamiento al aerogenerador el cual funcionó sin ningún inconveniente ya que el viento en promedio está entre los 5.3 m/s en la parroquia Tarquí donde se instaló.

Este aerogenerador puede generar 12 voltios en corriente continua por lo que se tendrá que instalar un controlador, el mismo que cumple la función de regular la tensión generada para que el cargador inversor pueda alimentar de manera correcta al banco de baterías[7]. Además la tensión que nos entregará el inversor debe de ser en corriente alterna y de manera continua cuando el generador esté en funcionamiento[8]. Y cuando el generador no esté en funcionamiento por falta de viento se tomará la energía almacenada en el banco de baterías[1]. Como se observa en la figura 5 es un aerogenerador bastante sencillo pero muy útil para las zonas donde se requiere el servicio eléctrico, pero lo más destacable es que es realizado con materiales reciclados.



Figura 5.- Aerogenerador Instalado en la Parroquia Tarquí en Ecuador.

Este aerogenerador es uno de tres hélices como se muestra en la figura 5 y puede girar a grandes velocidades

Con la velocidad del viento que es de 5,3 m/s promedio según pruebas, en la Parroquia Tarqui se generó la energía suficiente que puede ser almacenada en baterías de 12V, sin embargo lo que también queremos demostrar es que se puede realizar estas construcciones para lugares remotos donde es imposible acceder a las líneas de la empresa distribuidora de energía y esta fuente puede suplir en gran medida estas necesidades donde la carga es pequeña.

El funcionamiento del aerogenerador es muy regular dadas las excelentes y permanentes velocidades de viento en todo el sector. Este ritmo de funcionamiento tranquilamente puede replicarse en localidades rurales adyacentes a la Parroquia Tarqui, tales como localidades de Victoria del Portete, Santa Ana, Quingeo, Sanbartolomé, inclusive a la Amazonía y Galápagos en Ecuador, donde existen vientos similares y/o superiores y sobre todo carecen de servicio de energía eléctrica.

III. FORMULACIÓN

Para poder verificar el funcionamiento correcto del aerogenerador se utilizará las siguientes ecuaciones para el análisis de la energía generada y la velocidad del viento las mismas que posteriormente son representadas en Matlab.

Generador eólico

La Potencia de la turbina está dada por [3];

$$P_{WT} = 0.5 * C_p * \rho_{air} * A * v^3 * \eta_{aer} \quad (1)$$

Donde; P_{WT} = Potencia producida por el barrido de las aspas por unidad de área. C_p = Coeficiente de Betz.

ρ_{air} = Densidad del aire, A es el área de barrido por las palas del aerogenerador y v es la velocidad de la turbina.

Teniendo en cuenta el rendimiento interno de la turbina eólica, la siguiente se puede escribir;

$$\eta_{cl} = \eta_{fmeo} * \eta_g * \eta_{mp} \quad (2)$$

Donde; η_{fmeo} , η_g son las eficiencias por fricción y generación, mientras η_{mp} es la eficiencia en la caja de

multiplicación de velocidad expresada en la ecuación 2.

Para determinar la potencia de salida tomamos en consideración la ecuación 1 y lo expresamos en potencia monofásica AC en la ecuación 3;

$$P_{1f} = \sqrt{3} * \eta_{cl} * U_{line} * I_{line} * \cos\phi \quad (3)$$

Donde P_{1f} es la potencia monofásica en AC, I_{line} es la corriente de línea, $\cos\phi$ representa el factor de potencia, y η_{cl} es el rendimiento de conversión del sistema eólico.

Controlador de carga:

La ecuación 4 del controlador de carga está dado por;

$$P_{Cont-dc} = V_{bat} (I_{rect}) \quad (4)$$

Donde; La potencia en la salida del controlador está dado por el voltaje nominal DC de la batería V_{bat} multiplicado por la corriente I_{rect} , proporcionada a partir de la contribución del aerogenerador.

Banco de Baterías:

Normalmente, las baterías son conectadas con la finalidad de obtener un voltaje de 12V, estrechamente relacionados al voltaje de entrada al inversor, en nuestro caso disponemos las baterías para obtener un voltaje nominal a 12V y suplir la necesidad de energía en los instantes donde no hay generación de energía, es decir no hay viento. El número de baterías conectadas en serie están determinadas por la ecuación 5;

$$N_{sBat} = \frac{V_{WT}}{V_{Bat}} \quad (5)$$

Inversor de Carga:

Las características del inversor están dadas por la potencia de ingreso al inversor de carga P_{inv-ip} y la potencia nominal a la salida del equipo P_{inv-op} . La eficiencia del inversor está dada por η_{inv} , a continuación la relación matemática 6:

$$P_{inv-ip} * \eta_{inv} = P_{inv-op} \quad (6)$$

Para diversas aplicaciones se toma en cuenta la relación matemática entre la energía aprovechada vs la energía generada. Esta relación es definida como la probabilidad de pérdida de carga (LLP), la ecuación 7 se indica a continuación [13];

$$LLP = \frac{\text{Energy_Demand}}{\text{Energy_Served}} \quad (7)$$

La potencia AC a la salida del inversor $P(t)$ se calcula utilizando la eficiencia del inversor η_{inv} , el voltaje AC de salida en los bornes del inversor V_{fn} , la corriente fase-neutro I_o y el $\cos\phi$ como se muestra a continuación en la relación matemática 8;

$$P(t) = \sqrt{3} \eta_{inv} V_{fn} I_o \cos\phi \quad (8)$$

Finalmente, el rendimiento del sistema está dado por;

$$\eta_{sistema} = \frac{P(t)}{P_{WT}} \quad (9)$$

Esquema de Generación de Energía Eólica.

En la figura 6 se muestra uno de los esquemas más usados para la conexión del aerogenerador hacia la carga con sus respectivos banco de baterías, inversores y el controlador de carga[11].

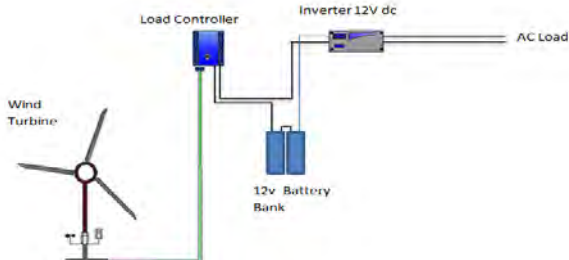


Figura 6. Esquema general de conexiones eléctricas.

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

Con el fin de resolver la ecuación (1) a (9) antes mencionada, este modelo de simulación se codificó en MATLAB y se pueden usar como una herramienta de optimización y diseño para sistemas eólicos[3]. Con el propósito de validar y ajustar los resultados simulados de la producción prevista, se utilizaron los datos in situ para comparar los resultados en diversas condiciones. Posteriormente se muestran los resultados numéricos obtenidos en MATLAB, así como las validaciones del modelo de simulación propuesto[15].

A continuación en la figura 7, se representan las ecuaciones de potencia en función de la velocidad[10].

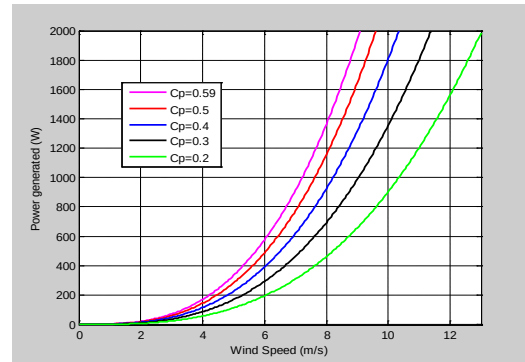


Figura 7. Curva de Potencia-velocidad para diferentes valores de C_p .

La velocidad del viento está en los 5,3 m/s promedio según las mediciones realizadas en la Parroquia Tarqui.

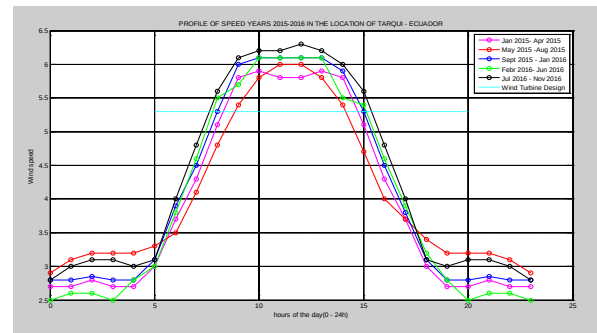


Figura 8. Perfil de datos de velocidad del viento caracterizados años 2015-2016.

Como se observa en la figura 8, se tabularon las mediciones de velocidad del viento en el sitio donde posteriormente se instaló el aerogenerador, tomadas durante las diversas horas del día en la estación meteorológica.

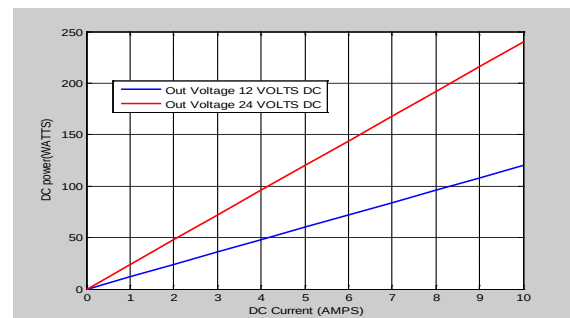


Figura 9. Curva de Potencia-corriente para diferentes valores de voltaje DC.

Cuando la carga no tenga alimentación eléctrica proveniente de la generación de energía a partir del viento se puede suplir de la energía almacenada en el banco de baterías que puede cargarse cuando el aerogenerador esté en funcionamiento[6].

El rango numérico de los resultados mostrados en la Figura 14 se basa en los datos reportados en la Referencia [12] y da la eficiencia de conversión de energía teniendo en cuenta las pérdidas en el proceso de transformación energía eléctrica. Es claro desde la figura 7 a la 9 que seleccionados los valores correspondientes para las variables de decisión, es decir, la velocidad de viento, la eficiencia y la potencia de ser el caso, un diseñador puede elegir las variables de decisión deseadas para alcanzar las soluciones óptimas según sus consideraciones, las limitaciones de diseño, la viabilidad económica, etc. [4]. De acuerdo con los resultados obtenidos a partir de los resultados simulados en la Figura 9, el rendimiento térmico y eléctrico se puede incrementar si aumenta la velocidad del viento. Por otro lado, los resultados también muestran que el aumento de potencia es sensible a la eficiencia de conversión de energía[14]. Este tema es de gran importancia en el análisis de diseño de ingeniería, ya que conduce a un mayor rendimiento del sistema eólico[17].

Validación del modelo numérico:

Con el fin de validar el modelo numérico descrito en las ecuaciones (1 a 9), hemos construido las figuras 7 a la 10. Después de analizar los datos de velocidad del viento en el sitio donde se instaló la estación ambiental, se concluyó que los datos son bastante consistentes y que muestran un patrón de relación entre el modelo matemático empleado y los datos obtenidos en sitio tal como se muestra en la figura 10. Es muy evidente a partir de estas cifras que nuestro modelo numérico predijo bastante bien la producción de la turbina eólica. Sin embargo, al analizar la figura 10 se observa que nuestro modelo predijo bastante bien los datos de la energía eólica hasta la velocidad del viento de 6 m/s y más allá de ese punto hubo algunas diferencias entre la predicción del modelo y los datos obtenidos in situ[9]. Creemos que estas diferencias se deben al coeficiente Betz variable C_p y las pérdidas cinéticas y mecánicas a altas velocidades del viento. Además, dado que nuestro modelo asume un coeficiente de Betz constante, no pudo tener en cuenta las pérdidas mecánicas y cinéticas encontradas a alta velocidad.

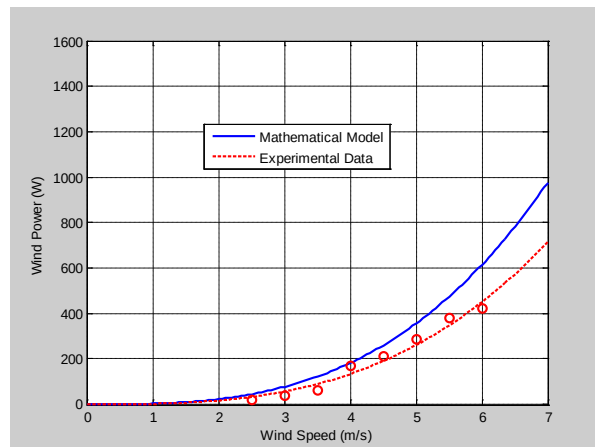


Figura 10. Comparación entre el modelo teórico y mediciones en campo.

En la figura 8 se muestran los promedios trimestrales en relación a los distintos cuatrimestres en los años 2015 - 2016, existen picos de datos de corta duración donde se logran obtener velocidades de hasta 7.8 m/s que nos dan sus respectivos valores de potencias según se indica en la figura 10 y se puede apreciar la curva promedio formada por los datos obtenidos en campo.

V. CONCLUSIONES

- Se presentaron e integraron simultáneamente las ecuaciones de conversión de energía que describen la potencia total generada por el sistema de generación de energía eólica en la localidad de Tarqui.
- En el modelo de simulación, las ecuaciones de conversión de energía antes mencionadas se codificaron con MATLAB y se utilizaron como herramienta de optimización y diseño.
- Con el fin de validar y ajustar los datos de entrada se analizaron en diversas condiciones. El modelo construido se comparó con los datos obtenidos in situ.
- Con la construcción de este aerogenerador se contribuye al reciclaje de materiales de acuerdo a lo utilizado para el montaje del mismo.
- Instalar aerogeneradores pueden llegar a facilitar muchísimo el estilo de vida en el Sector de Tarqui y lugares de similares características en el Austro Ecuatoriano y así producir energía limpia para alimentar la carga de una vivienda de campo.
- Considero muy positiva la experiencia obtenida en este estudio y se nota que al diseñar un aerogenerador de mayores dimensiones permitirá un mayor barrido de sus aspas y por ende obtener mayor potencia.

VI. RECOMENDACIONES.

- Este tipo de aerogeneradores de bajas potencias son recomendados para usar en lugares lejanos y en zonas rurales ya que en varios lugares no hay acceso a las líneas de distribución energética como en nuestro caso. Además recomiendo a las distintas Universidades en Sudamérica y particularmente a las Ecuatorianas a que sigamos investigando en el campo de las energías renovables.

VII. REFERENCIAS.

1. Department of Energy, "Potential Benefits of Distributed Generation and Rate Related Issues that may Impede their Expansion, A Study Pursuant to Section 1817 of the Energy Policy Act of 2005" 2007.
2. Binayak, B., Shiva, R. P., Kyung-Tae L., Sung-Hoon A., "Mathematical Modeling of Hybrid Renewable Energy System: A Review on Small Hydro-Solar-Wind Power Generation", International Journal of Precision engineering and Manufacturing-green Technology, Vol. 1, No 2, pp. 157-173, 2014.
3. Kavitha Sirasani, S.Y. Kamdi, "Solar Hydro Hybrid Energy System Simulation" International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE), Volume-2, Issue-6, pp. 500-503, January 2013.
4. Mustafa Engin, "Sizing and Simulation of PV-Wind Hybrid Power System", International Journal of Photoenergy, Volume 2013, ID 217526, pp.1-10, 2013.
5. Akikur, R.K., Saidur, R., Ping, H., Ullah, K.R., "Comparative Study of Stand-Alone and Hybrid Solar Energy Systems Suitable for Off-Grid Rural electrification: A review", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 27, 738-752, 2013.
6. Bhandari, B. "Design and Evaluation of tri-hybrid Renewable System (THRES)," Ph. D. Thesis, Department of Mechanical & Aerospace Engineering, Seoul National University, 2014.
7. Bekele, G and Tadesse, G "Feasibility Study of Small Hydro/Pv/Wind Hybrid System for off-Grid Rural Electrification in Ethiopia", Applied Energy, Vol 97, pp.5-15, 2012.
8. Fadaenejed, M, Radzi, M. A., AbKadir, M.Z. and Hizam, H., "Assessment of Hybrid Renewable Power Sources for Rural Electrification in Malaysia", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 30, pp. 299-305, 2013.
9. Saha, N.C., Acharjee, S., Mollah, M.A.S., Rahman, K.T., and Rafi, F. H. M., "Modeling and Performance Analysis of a Hybrid Power System", Proc. of International Conference on Informatics Electronics & Vision (ICIEV), pp. 1-5, 2013.
10. Mustafa, E., "Sizing and Simulation of PV-Wind Hybrid Power System", International Journal of Photoenergy, Vol 2013, Article ID 217526, 10 pages., 2013.
11. Saib, S. and Gherbi, A, (2013), Modeling and Simulation of Hybrid Systems (PV/Wind/Battery) connected to the Grid, International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control, Setif, 24-26 November, 2013.
12. Singh, G and Chauhan, D.S. "Development and Simulation of Mathematical Modeling of Hydraulic Turbine", ACEEE International Journal on Control and Instrumentation, Vol.02, N0,02, 2011
13. M. Ikhsan*, Agus Purwadi, Nanang Hariyanto, Nana Heryana, Yanuarsyah Haroen" Study of Renewable Energy Sources Capacity and Loading Using Data Logger for Sizing of Solar-Wind Hybrid Power System" 4th International Conference on Electrical Engineering and Informatics (ICEEI 2013)
14. Yueqing Zonhan WindPower Co. Ltd., "Operating & Installation Manual", ZH1.5 kw wind turbine system. 2015.
15. Bosma B. and Kallio G. "RENEWABLE-ENERGY LABS FOR AN UNDERGRADUATE ENERGY-SYSTEMS COURSE", American Society for Engineering Education, 2009.
16. Mohammed S. Benghanem, and Saleh N. Alamri., "Modeling of photovoltaic module and experimental determination of serial resistance" JTUSCI, August 2008.
17. Sami, S. and Icaza, D. "Modeling, Simulation of Hybrid Solar Photovoltaic, Wind turbine and Hydraulic Power System", IJEST, International Journal of Engineering Science and Technology, Volume 7, Issue 9, September 30, 2015.



Daniel Icaza Álvarez. Born in Cuenca, Ecuador in 1980. He received his degree in Electrical Engineering from the Universidad Politécnica Salesiana in 2005; Master in Telecommunications Management at the Universidad Politécnica Salesiana 2008; Currently he serves as the Career Director of Electrical Engineering at the Universidad Católica de Cuenca.

E-mail: dicaaaa@ucacue.edu.ec

Chacana-Jamanco Geothermal Prospect: Complementary gravity survey

Prospecto Geotérmico Chacana-Jamanco: Gravimetría Complementaria

D. Asimbaya¹ M. Sugioka² B. Pilicita¹ M. Urquizo¹

¹Corporación Eléctrica del Ecuador – Unidad de Negocios Termopichincha, Pichincha, Ecuador

E-mail: danilo.asimbaya@celec.gob.ec

E-mail: byron.pilicita@celec.gob.ec

E-mail: matilde.urquizo@celec.gob.ec

²Agencia de Cooperación Internacional del Japón – JICA

E-mail: sugioka.manabu@friends.jica.go.jp

Abstract

The Chacana-Jamanco Geothermal prospect is located to 42 km at eastern of Quito in the western side of Andes Eastern Cordillera, above 3300 m.a.s.l. It is part of the resurgent silicic Chacana caldera with some hot springs and hydrothermal deposits. Some possible reservoir temperatures were estimated in the previous studies up to 180°C.

Here, we present the result of complementary gravity survey conducted in 2017 in addition to that in 2011 to improve geological structures analysis associated with hot springs. The gravity survey was conducted in April 2017 with a CG-5 gravimeter and two differential GPS for more accurate positioning of each measurement point. 71 points of relative gravity were obtained and integrated with the previous ones; one negative anomaly in the Jamanco area is recognized and clear eastern border is found in the anomaly implying one possible deep fault related to the Tumiguina fault. Although any clear anomaly is not detected related with Tambo fault neither structural link to the hot springs, the target area is well restricted and some other different approach like gradient drilling is recommended.

Index terms: Geothermal prospect, Ecuador, Chacana-Jamanco, gravity survey.

Resumen

El prospecto Geotérmico Chacana-Jamanco está ubicado a 42 km al oriente de Quito, al occidente de la Cordillera Oriental de los Andes, sobre los 3300 m.s.n.m. Forma parte de la caldera resurgente silícica de Chacana con múltiples vertientes termales y depósitos hidrotermales. Estudios previos indican posibles temperaturas en reservorio de hasta 180°C.

Presentamos un estudio de gravimetría complementaria, realizada en 2017, adicional a la campaña de 2011 con el objeto de mejorar el análisis de estructuras geológicas asociadas a vertientes termales. La campaña de campo se realizó en el mes de abril de 2017 con un gravímetro CG-5 y dos GPS diferenciales para mayor precisión en el posicionamiento de cada sitio de medición. Se obtuvieron 71 puntos de gravedad relativa y producto de la integración con los datos previos, se identificó una anomalía negativa en el área de Jamanco y un claro límite oriental en dicha anomalía que implicaría la presencia de una posible falla profunda relacionada con la falla Tumiguina. Aunque el análisis no ratificó la presencia de la falla Tambo y una estructura vinculada con las vertientes termales, el área para perforación se restringió y se recomendó un enfoque diferente como la perforación de pozos de gradiente.

Palabras clave: Prospecto geotérmico, Ecuador, Chacana – Jamanco, estudio de gravimetría.

Recibido: 30-01-2018, Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Asimbaya, D.; Sugioka, M.; Pilicita, B.; Urquizo, M. (2017). "Prospecto Geotérmico Chacana-Jamanco: Gravimetría Complementaria". El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

1. INTRODUCCIÓN

El prospecto geotérmico Chacana-Jamanco se encuentra a 60 km al este de la ciudad de Quito en la provincia de Napo. Por la zona atraviesan líneas de alto voltaje, la mayor de 500 kV, en funcionamiento desde el 2016. La topografía en el área es principalmente montañosa con elevaciones que fluctúan entre los 3100 a 4100 m.s.n.m. con temperatura y pluviometría promedio anual de 8°C y 1528 mm, respectivamente; el acceso a la zona es a través de vías de primer orden (Figura 1a).

El prospecto se implanta al occidente de la cordillera real de los Andes, en la mitad sur de la caldera silícea resurgente de Chacana, que ha mostrado una actividad volcánica permanente desde hace 2.5 Ma hasta la más reciente en 1760 DC [1], Figura 1b.

Múltiples vertientes termales además de zonas con depósitos y alteración hidrotermal, propiciaron a que la Corporación Eléctrica del Ecuador, CELEC EP, realizara estudios de pre factibilidad inicial en 2011 para el prospecto geotérmico Chacana-Jamanco.

Los resultados de los estudios geocientíficos de superficie (geología, geoquímica y geofísica) muestran 3 estructuras geológicas principales (Fallas Tambo, Jamanco y Tumiguina) y una anomalía relacionada a una capa sello en el área de Jamanco (Figura 1c), la cual albergaría un sistema geotérmico con temperaturas estimadas en reservorio de 180°C [2].

Sin embargo de los estudios gravimétricos realizados en 2011 no existe mayor detalle, en el área marcada de interés por Magneto-telúrica, que permita respaldar la existencia de estas estructuras geológicas, su relación con las vertientes termales y su continuidad en profundidad.

A continuación se presenta los resultados de un estudio complementario de gravimetría, con el principal objetivo de confirmar estructuras geológicas en las inmediaciones a la anomalía de Magneto-telúrica detectada en los estudios previos, su relación con el sistema geotérmico del prospecto Jamanco, y además restringir el área de enfoque para los estudios futuros.

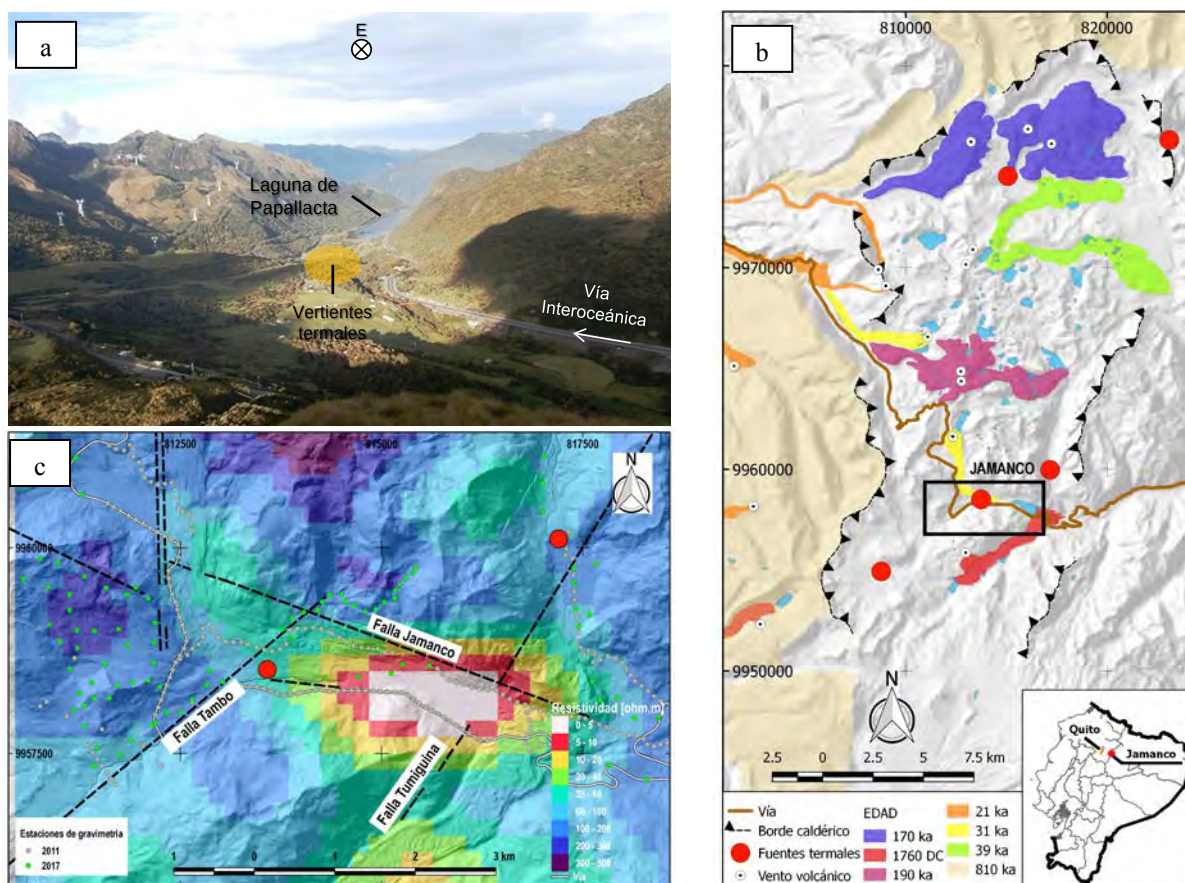


Figura 1: (a) Vista panorámica del área de Jamanco. (b) Actividad volcánica principal en la caldera de Chacana. Modificado de CELEC/SYR 2012. (c) Ubicación de los puntos de gravimetría en las inmediaciones a la anomalía detectada por Magneto-telúrica (a 2890 m.s.n.m.) y fallas geológicas principales en el área de Jamanco; en círculo rojo las zonas con vertientes termales.

2. METODOLOGÍA

La campaña de gravimetría se realizó en el mes de abril de 2017 con un gravímetro CG5-Autograv y dos GPS's diferenciales (base – móvil) para el posicionamiento exacto de cada punto de medición. Las estaciones de gravedad en el área de Jamanco fueron ubicados estratégicamente con la ayuda de imágenes satelitales y ortofotografías, esta última proporcionadas por el SigTierras. La ubicación de los puntos se realizó considerando (Figura 1c):

- Ubicación de los puntos de medición de la campaña de 2011.
- Estructuras geológicas estimadas en el estudio previo.
- Resultados de la campaña de Magneto-telúrica.
- Ubicación de las aguas termales.
- Accesibilidad y vegetación.

Considerando el objeto del estudio los puntos de medición fueron separados aproximadamente cada 250 m, disminuyendo el espaciamiento en zonas de interés. Para la integración de los datos se replicaron puntos de la campaña de 2011.

El procesamiento convencional de datos para obtener la Anomalía de Bouguer se realizó conforme lo describe LaFehr 1991 & Hinze et al. 2005 [3], [4], usando SRTM's del área. Posteriormente se realizó la corrección de distorsión topográfica conforme Xia & Sprowl 1991 [5]. La determinación de la densidad del área se la realizó en base a lo expuesto por Parasnis 1952 [6].

3. RESULTADOS

De la campaña de campo realizada en el área de interés se obtuvieron 71 nuevos puntos de medición y con la integración de datos, sumaron un total de 310 puntos de gravimetría.

La densidad calculada para el área fue de $2,20 \text{ g/cm}^3$ y una vez obtenida la anomalía de Bouguer se minimizó la influencia de topografía local en la gravedad, para obtener la anomalía de Bouguer real, Figura 2.

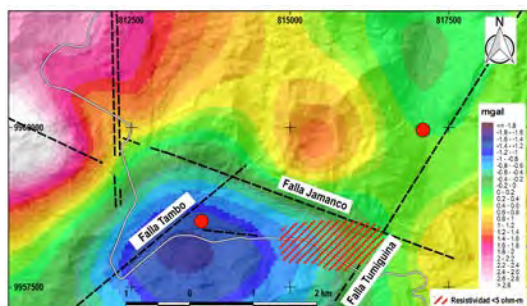


Figura 2: Anomalía de Bouguer Real (Rojo gravedad alta, verde moderada y azul baja). En círculo rojo las zonas con vertientes termales.

Los resultados evidenciaron 3 zonas con alta anomalía y una de baja, en las inmediaciones al área de Jamanco.

Los valores de la anomalía de Bouguer Real se analizaron correlacionándolo con la componente topográfica de la anomalía de Bouguer; esto permitió observar un comportamiento de los datos de gravedad obtenidos en función de la densidad o de la anomalía que generaría, como se aprecia en la Figura 3.

Los valores se clasificaron cuantitativamente y se identificaron 6 grupos:

- Grupos 1 y 2: Densidad mayor a $2,2 \text{ g/cm}^3$. Probablemente relacionadas con rocas volcánicas.
- Grupos 3, 4 y 6: Densidad aproximadamente igual a $2,2 \text{ g/cm}^3$.
- Grupo 5: Zona de Transición. Relacionado a una zona de falla.

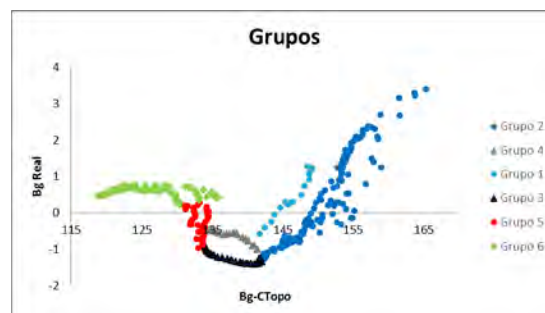


Figura 3: Clasificación de los datos en función de la anomalía de Bouguer Real y la topografía

En la figura 4 se puede observar la distribución de los grupos clasificados en el área de estudio, la ubicación de los puntos que contienen el grupo 5, relacionado a una zona de transición o zona de falla, coincidió con la extensión de la Falla Tumiguina, corroborando su presencia e indicando una probable continuidad en profundidad.

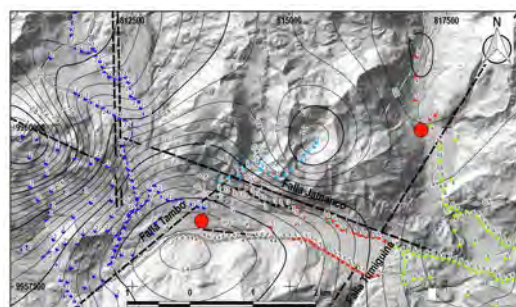


Figura 4. Mapa de distribución de las estaciones de gravedad en función de la densidad calculada.

4. DISCUSIÓN

El estudio corrobora que los grupos 1 y 2 corresponden a la serie de domos andesíticos a dacíticos del Pleistoceno temprano, mapeados en el estudio del

2011 [2]; así como la presencia de la falla geológica Tumiguina que conforme este estudio se encuentra levemente hacia el oeste de la marcada en estudios anteriores (Figura 5).

4.1. Fallas geológicas y vertientes termales

No se encontró evidencia que justifique un bloque levantado, hacia el sureste de la laguna de Papallacta como lo evidenció los resultados de gravedad previos [2]. El contraste de los valores de gravedad obtenidos en este estudio, separados por la falla Tumiguina, indican un movimiento probablemente de origen normal con una influencia muy profunda y con el bloque oriental levantado.

Las Fallas geológicas Tambo y Jamanco, no evidenciaron un contraste en los valores de gravedad, por lo que su naturaleza no puede ser de tipo normal o inversa; así como no se evidencia una relación directa con la emanación de las fuentes termales en la zona. Sin embargo las evidencias en superficie asociadas a la existencia de estas fallas [7], [8], puede indicar un movimiento principalmente transcurrente.

Una distribución de la gravedad, restringido a la zona donde emergen las vertientes termales, indican una probable estructura de dirección aproximadamente E – O, que atravesaría la zona en donde vierten las termas de Jamanco.

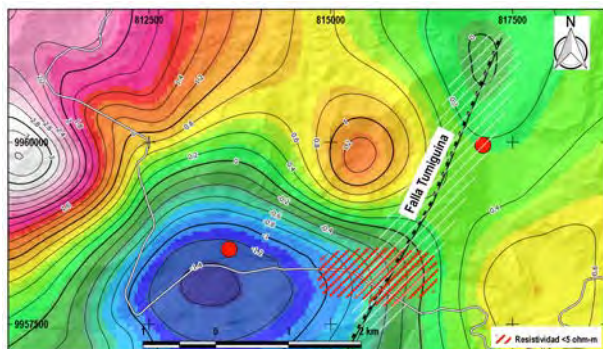


Figura 5: Extensión de la falla Tumiguina detectada en este estudio.

La incidencia profunda de esta falla, detectada en este estudio, además de las evidencias geológicas detectadas en estudios previos [9], [10] y su gran extensión podría marcar el borde estructural de la caldera de Chacana en su parte centro sur-oriental, como lo proponen estudios anteriores [2], [8], [10].

4.2. Relación con Magneto-telúrica

En la falla Tumiguina, de tipo normal, debido a su naturaleza se puede esperar una buena permeabilidad, por lo que la falla serviría como vía principal para el ascenso de fluidos geotermales, corroborado por la anomalía de baja resistividad detectada por Magneto-Telúrica, ubicada en la extensión SO de la falla.

La baja anomalía de gravedad, representada por zonas de densidad aproximadamente igual $2,20 \text{ g/cm}^3$, corresponderían a productos volcánicos del relleno de la caldera, con menor densidad que los cuerpos volcánicos aledaños.

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El estudio de gravedad presentado, complementa los resultados geocientíficos obtenidos en 2011, incrementando el factor de éxito para el desarrollo de un proyecto geotérmico en el prospecto Jamanco.

El modelo conceptual que proponemos resalta a la falla Tumiguina como una estructura geológica con buena permeabilidad, que podría albergar un reservorio geotérmico justo por debajo de la zona de baja resistividad. La extensión de esta falla en dirección NE y la emanación de vertientes termales en las cercanías a esta falla, en el poblado de Papallacta, representarían la salida lateral (outflow) hacia el NE del sistema geotérmico, Figura 6.

A pesar que los estudios de 2011 muestran a las vertientes termales en Jamanco como una salida lateral desde el reservorio hacia el oeste [2], este estudio no encontró una relación estructural con las vertientes que permita afirmar lo mencionado; futuros estudios permitirán inferir si las vertientes en Jamanco tienen alguna conexión con una estructura de dirección E-O.

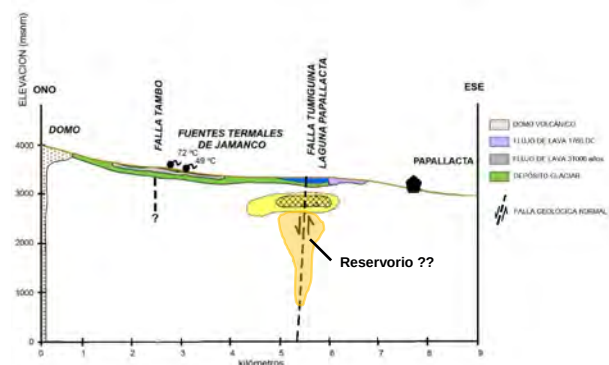


Figura 6: Modelo Geotérmico propuesto, modificado de CELEC/SYR 2012.

Debido a la cercanía de líneas de alto voltaje en el sector de Jamanco se dificulta obtener resultados confiables en cuanto a métodos electromagnéticos como Magneto-Telúrica; por lo que es recomendable realizar perforaciones poco profundas para evaluar el prospecto geotérmico.

AGRADECIMIENTOS

De manera especial a todos quienes conforman la Subgerencia de Proyectos de Generación No Convencionales de la Unidad de Negocios CELEC EP – Termopichincha, su gerente y a los pobladores del área de estudio que apoyan el desarrollo de la geotermia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. L. Hall and P. A. Mothes, "The Chacana caldera complex in Ecuador," IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 3. p. 12004, 2008.
- [2] CELEC/SYR, "Estudio de Prefactibilidad Inicial para Elaborar el Modelo Geotérmico Conceptual del Proyecto Chacana," Inf. Técnico No Publ. Prep. por SYR, p. 183, 2012.
- [3] T. R. LaFehr, "An exact solution for the gravity curvature (Bullard B) correction," Geophysics, vol. 56, no. 8, pp. 1179–1184, 1991.
- [4] W. J. Hinze, C. Aiken, J. Brozena, B. Coakley, and D. Dater, "New standards for reducing gravity data: The North American gravity database," Geophysics, vol. 70, no. 4, pp. J25–J32, 2005.
- [5] J. Xia and D. . Sprowl, "Correction distortion in gravity data," Geophysics, vol. 56, no. 4, pp. 537–541, 1991.
- [6] D. S. Parasnis, "A study rock densities in the English Midlands," Geophys. Suppl. to Mon. Not. R. Astron. Soc., vol. 6, no. 5, pp. 252–271, 1952.
- [7] H. Yepes and P. Ramon, "Proyecto Ríos Orientales - Estudio Preliminar del peligro sísmico," Informe Técnico No Publicado preparado para UEPRO de EMAAP-Q. p. 46 pp, 2000.
- [8] B. Pilicita, "Estudio de fuentes termales, fallas geológicas, descarga de calor en la caldera de Chacana y el aprovechamiento actual del recurso Geotérmico," 2013.
- [9] M. L. Hall, P. Mothes, and J. Cotten, "El Complejo caldérico de Chacana - Ecuador," Instituto Geofísico - EPN. Quito - Ecuador, 2008.
- [10] F. Villares, "Estudio Geovulcanológico de la zona sur de la caldera Chacana, Provincias de Napo – Pichincha," 2010.



Danilo Asimbaya Amaguaña.-

Nació en Tumbillo, Ecuador en 1987. Recibió su título de Ingeniero Geólogo de la Universidad Central del Ecuador en 2013; Diplomado de especialización en Geotermia de la Universidad de El Salvador, El Salvador 2014. Sus campos de investigación están relacionados con la exploración geológica y geofísica hacia la búsqueda de recursos geotérmicos.



Manabu SUGIOKA.-

Nació en Tokyo, Japón. Recibió su título de Master en geofísica de la Universidad de Tokyo, Japón en 2003. Sus campos de actividades están relacionados con desarrollo de los proyectos geotérmicos, en la etapa de estudio geocientífico, gestión de financiamiento, hasta el desarrollo de recursos.



Byron Pilicita Masabanda.-

Nació en Quito, Ecuador en 1984. Recibió su título de Ingeniero Geólogo en la Escuela Politécnica Nacional en 2013; realizó el diplomado en la Universidad de la Naciones Unidas en el programa de entrenamiento Geología en Geotermia. Sus campos de investigación están relacionados con la exploración geológica en prospectos geotérmicos e integración de datos geocientíficos para elaboración de modelos conceptuales de sistemas geotérmicos.



Matilde Urquiza Cabrera.-

Nació en Guayaquil en 1979. Recibió su título de Ingeniera en Electricidad especialización Potencia en la Escuela Superior Politécnica del Litoral en 2008 y de Master Europeo en Energías Renovables en la Universidad de Zaragoza en 2011. Realizó su diplomado en Especialización de Geotermia en la Universidad de El Salvador en el 2013 y actualmente se encuentra liderando el área de geotermia en CELEC EP, para llevar adelante estudios de proyectos geotérmicos en Ecuador.

Energy analysis of an electricity-powered transport system.

Análisis energético de un sistema de transporte alimentado por electricidad.

Francisco Torres¹, Andrés López², Mateo Coello³, Daniel Cordero⁴

¹ Facultad de Ciencia y Tecnología, Centro de Investigaciones ERGON, Universidad del Azuay,
E-mail: ftorres@uazuay.edu.ec

² Facultad de Ciencia y Tecnología, Centro de Investigaciones ERGON, Universidad del Azuay,
E-mail: alopezh@uazuay.edu.ec

³ Facultad de Ciencia y Tecnología, Centro de Investigaciones ERGON, Universidad del Azuay,
E-mail: mfcoello@uazuay.edu.ec

⁴ Facultad de Ciencia y Tecnología, Centro de Investigaciones ERGON, Universidad del Azuay,
E-mail: dacorderom@uazuay.edu.ec

Abstract

This paper proposes an energy analysis of a system of transport fueled by electricity, in which the light vehicles will circulate by a specific route, considering the mobility characteristic of the city and vehicular flow, the public power red feeds the traffic line and by induction, energy is transmit to the vehicle, which has a receiving device to generate the charge on the batteries and activate the electric motor of the same. Using a mathematical model determines the energy consumption generated in the system according to the number of vehicles that can circulate in the route and the charge capacity of the batteries. By analyzing the energy consumption generated in the electrical system in comparison with the energy demand caused by the use of gasolines for the operation of vehicles with alternative internal combustion engines circulating along the same route and in the same quantity, the problem to be solve is that the energy consumed for mobility generated by gasoline-powered vehicles is greater than the energy consumption of an electric mobility system, with which 82% of energy demand can be reduced to apply the electrical system.

Index terms— Energy, mobility, electricyti, route, consumption, vehicle.

Resumen

El artículo propone un análisis energético de un sistema de transporte alimentado por electricidad, en el cual los vehículos livianos circularán por una ruta específica, considerando la movilidad característica de la ciudad y flujo vehicular, el carril de circulación es alimentado por la red eléctrica pública y mediante inducción se transmite energía al vehículo, que tiene un dispositivo receptor para generar la carga en las baterías y activar el motor eléctrico del mismo. Mediante un modelo matemático se determina el consumo de energía generado en el sistema según la cantidad de vehículos que puedan circular en la ruta y la capacidad de carga de las baterías. Analizando el consumo de energía generado en el sistema eléctrico en comparación con la demanda de energía provocada por la utilización de gasolinas para el funcionamiento de vehículos con motores de combustión interna alternativos que circulen por la misma ruta y en la misma cantidad, el problema a resolver es que, el consumo de energía para movilidad generado por los vehículos que funcionan a gasolina es mayor al consumo de energía que tiene un sistema de movilidad eléctrico, con el cual se puede disminuir el 82% de la demanda de energía al aplicar el sistema eléctrico.

Palabras clave— Energía, movilidad, electricidad, ruta, consumo, vehículo.

Recibido: Colocar fecha de envío (Ej: 05-08-2017), Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial
Forma sugerida de citación: Colocar Primer Apellido y la inicial del nombre de todos los autores Ej: Torres, F.; López, A.; Coello, M.; Cordero, D.; (2017). Nombre del trabajo técnico entre comillas Ej: “Análisis energético de un sistema de transporte alimentado por electricidad.”. Revista Técnica “energía”. No. 13, Pp. El número de página lo colocará el Consejo Editorial.
ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

El consumo energético mundial aumenta considerablemente y las fuentes generadoras de energía deben satisfacer la demanda de las fábricas, del transporte y de la vivienda. El transporte es el principal consumidor de energía no renovable, el combustible que se utiliza proviene principalmente de la explotación del petróleo; por lo que, es importante ofrecer una alternativa energética para el transporte, como puede ser el uso de la energía hidroeléctrica como fuente de energía primaria. En este contexto se plantea analizar las necesidades y prestaciones que un sistema de movilidad eléctrico alternativo requiere para su funcionamiento, considerando que las tecnologías de transporte no convencionales y medioambientalmente más sostenibles tendrán una elevada penetración a nivel mundial. La utilización de vehículos para el transporte de pasajeros y mercancías implica consumo de energía, siendo la gasolina y el diésel las principales fuentes en la actualidad, pero con los avances tecnológicos se ha introducido la utilización de vehículos eléctricos e híbridos, con el propósito de disminuir las emisiones contaminantes emitidas por los automóviles y reducir el consumo de combustibles.

La investigación parte de un análisis de un modelo de movilidad alternativo donde a los vehículos con motores de combustión interna alternativos (MCIA) se dote de propulsión eléctrica. La energía eléctrica para propulsar estos vehículos se obtiene de una infraestructura vial mediante rieles. El estudio propone el análisis energético que depende por una parte de la configuración del tren motriz, de las características de la ruta establecida y por último el modelo de gestión de este sistema alternativo. Se estimará la demanda de energía del sistema propuesto y la capacidad de funcionamiento de este sistema. Por ejemplo, algunas de las condiciones a considerar para la estimación que es necesario establecer: la cantidad de saturación máxima del viario eléctrico, velocidad de circulación adecuada, longitud del recorrido, características del carril exclusivo de circulación; un factor importante es el estudio energético que demandarán los vehículos, para lo que se realiza una comparación entre el consumo de gasolina con relación al consumo eléctrico.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación pretende desarrollar una herramienta que puede replicar la forma de realizar el análisis del consumo energético de un sistema de movilidad eléctrico alternativo que funciona en un carril específico, analizando la posibilidad de incluir un sistema de movilidad alternativo eléctrico para vehículos que circulan en una ruta y carril específico; mediante un análisis de las características viales que posee la ciudad, también se consideran aspectos como la velocidad de circulación, cantidad de vehículos que soporta el sistema, características del carril exclusivo para los vehículos que funcionen con el sistema alternativo de propulsión, y un factor importante es el estudio energético que demandan los vehículos,

también se realiza una comparación entre el consumo de gasolina con relación al consumo eléctrico.

Se determina las variables que intervienen en el cálculo del consumo energético, como es el consumo de gasolinas y cantidad de vehículos livianos, el equivalente mecánico del calor en motores de combustión interna alternativo (MCIA), la inducción de carga inercial, la masa del vehículo, el coeficiente de resistencia al aire, el área frontal del vehículo, coeficientes de resistencia a la rodadura, el radio dinámico de la rueda, la densidad del aire, el valor de la gravedad, utilizando las variables indicadas se determina la fuerza necesaria para el desplazamiento del vehículo, torque, potencia y el consumo energético, se realiza la validación de la pendiente de la ruta, características del tren motriz mediante la relación de transmisión final de la caja de marchas y según el cuadro de torque y potencia máximos que genera el motor eléctrico, son necesarios para realizar un diagrama de cubrimiento y obtener la configuración del sistema motriz del vehículo, la energía que provee el sistema de alimentación de electricidad pública es importante para determinar la cantidad de vehículos que pueden circular, así como el consumo y el ahorro de energía que tiene la propuesta de movilidad; de esta manera se realiza una comparación entre el consumo de energía de un sistema de movilidad eléctrico en relación al vehículo convencional.

3. PAPER METODOLÓGICO

Para analizar el consumo energético en el transporte se debe considerar las fuentes de energía primaria que se extrae de los recursos naturales directamente. Como son: la energía hidráulica, la energía solar, la energía geotérmica, la energía eólica o mediante la exploración del subsuelo o por ospección para el petróleo o gas natural. La fuente de energía secundaria se produce desde la energía primaria que para poder ser aprovechada por los consumidores se debe transformar o modificar mediante procesos físicos y/o químicos generando otro tipo de energía como es la electricidad, el gas licuado de petróleo (GLP), gasolinas, diésel y entre otros productos no energéticos como asfaltos y lubricantes derivados del petróleo, en consecuencia existen pérdidas de energía, según lo explica el segundo principio de la termodinámica [1].

Por ello, la matriz de demanda (incluido el consumo de no energéticos y consumo propio) de energía muestra el consumo de energía final o neta por sector. Los sectores que más demandan energía son transporte (49%), seguido por la industria (17%), el consumo residencial (13%), consumo propio (12%), comercial y servicios públicos (4%) y uso no energético (3%) [2].

Así el transporte, demanda el 60% de la producción de petróleo en el mundo, se considera que para el año 2030 sea el 75% de la producción mundial, aumentando considerablemente la demanda energética para el transporte. Los países que pertenecen a la OECD (*Organization for Economic Cooperation and Development*) están aplicando políticas que aumenten la

eficiencia en el consumo de combustible de los vehículos y conseguir que la demanda de energía por el transporte aumente en un 0.46% anual entre el año 2010 hasta el 2035, sumando a esto a los países que no forman parte de la OECD, se tendrá un incremento del 1.8%. [3]

Por lo tanto, en el sector transporte los combustibles más consumidos son la gasolina (44%) y diésel (43%). El fuel oil también tiene una importante participación (8%) debido al consumo de transporte naviero de gran calado. La electricidad en transporte es casi inexistente [2].

Siendo así en el Ecuador el consumo de gasolinas, diésel, fuel oil y GLP alcanzó los 81,6 millones de barriles en 2014. Esta cifra superó en 4 millones de barriles el consumo con relación al 2013, cuando se registraron 77,6 millones de barriles. La demanda de gasolinas aumento en 6,43%, la cifra pasó de 24,9 millones de barriles en 2013, a 26,5 millones de barriles al 2014 [4].

El ciclo de conducción determina el comportamiento del vehículo según la velocidad que necesite en un tiempo de funcionamiento por una ruta preestablecida, permitiendo realizar un análisis del consumo de energía, de las emisiones contaminantes emitidas a la atmósfera, del funcionamiento del motor, ya sea eléctrico o de combustión interna, también se puede verificar el comportamiento de la transmisión. Existen dos tipos de ciclos de conducción, estado estable, donde se mantiene en tramos constante la velocidad del motor y la carga, y el transitorio donde la velocidad del vehículo y del motor cambia constantemente, se pueden obtener en laboratorios o con pruebas de carretera. El ciclo de conducción transitorio estandarizado “New European Driving Cycle” (NEDC), que es utilizado para analizar vehículos de trabajo liviano en la Unión Europea con periodos de aceleración constante, desaceleración y velocidad, teniendo poca relación con la situación real de conducción [5].

Es necesario indicar que en el parque automotor nacional, según las estadísticas de transporte publicadas por el Instituto Ecuatoriano de Estadísticas y Censos [6], entre los años 2003 y 2013, se observa que el parque automotor del Ecuador presentó una tasa de crecimiento anual de 7,8%. En 10 años casi un millón de vehículos se sumaron al parque automotor, alcanzando en el 2013 un total de 1,7 millones de vehículos matriculados.

En el año 2014, se matricularon en el país 1'752.712 vehículos; 34.826 vehículos más en relación al año 2013, siendo del total del país el 94,5% automotores de uso particular y el 56% son vehículos que apenas tienen entre uno y siete años de uso (2008 – 2015), y en la provincia del Azuay se matricularon 105.178 vehículos [6].

Según las cifras expuestas existe un aumento del total de vehículos matriculados en el país desde el año 2013 al año 2014 de un 2%, y el consumo total de combustible en un 5%. En la Fig. 1 se observa cual ha

sido el aumento del consumo de gasolina en los últimos 15 años. En el año 2000 se consumieron 11,6 millones de barriles de gasolina y en el año 2014 fueron 26,5 millones de barriles de gasolina; por lo que el aumento es del 128,4% en 14 años.

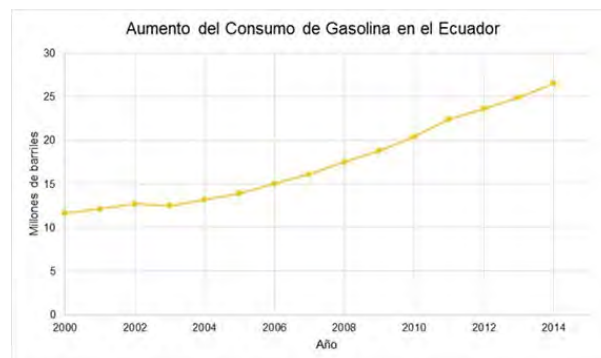


Figura 1: Aumento del consumo de gasolina en el Ecuador.

En la Provincia del Azuay para el año 2013 se matricularon 100.225 vehículos y para el año 2014 se matricularon 105.178 vehículos, existiendo un aumento anual del 4,9%, de los cuales 100.542 son particulares, 3.330 son de alquiler, 802 son del Estado, 426 de l Municipio y 78 de gobiernos seccionales. Del total de vehículos matriculados en la provincia del Azuay el 34% corresponde a automóviles, siendo el equivalente a 35.761, el 25% a jeeps con su equivalente a 26.295, el 24% a camionetas, con el equivalente de 25.243, el 8% a motocicletas, siendo el equivalente 9.466 y el 9% a otros siendo 8.414 [6].

Según los datos obtenidos de la cantidad de vehículos que indica el INEC para la provincia del Azuay, y la cantidad de vehículos que han realizado la revisión en los CRTV de la ciudad de Cuenca y la cantidad de vehículos registrados por la EMOV, para los años 2013 y 2014 se puede observar que entre los CRTV y la EMOV existe una variación en los datos del 2,5% en el año 2013 y del 1,3% para el 2014. En la Fig. 2 se observa la cantidad de vehículos registrados en los centros, empresa e instituto.

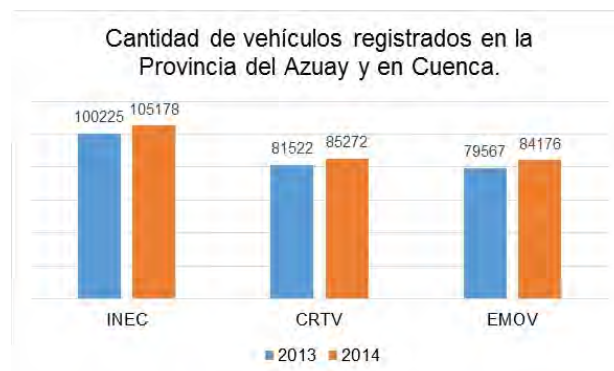


Figura 2: Cantidad de vehículos registrados en la Provincia del Azuay y en Cuenca, 2013 y 2014.

En el Ecuador el consumo de gasolina en el año 2014 fue de 26,48 millones de barriles, mientras que en el 2013 se registraron 24,93 millones de barriles, con un

incremento anual de 6,2% [4].

En la provincia del Azuay para el año 2011 se despachó de gasolina extra 47'292.466 galones y de gasolina súper 8'515.306 galones, para el año 2012 de gasolina extra 51'035.358 galones y de gasolina súper 7'672.253 galones, habiendo un incremento en la cantidad total de gasolinas del 5,2% [7].

En el año 2013 se consumió de gasolina extra 53'210.000 galones y de gasolina súper 6'980.000, existiendo un aumento en el total de gasolinas de 2,5% en relación al 2012, en el año 2014 se consumió de gasolina extra 55'970.000 galones y de gasolina súper 6'910.000 galones, existiendo un aumento en la cantidad total de gasolinas de 4,5% [4].

En la ciudad de Cuenca, para el año 2011 el consumo de gasolina extra para el sector automotriz fue de 40'032.819 galones, de gasolina súper fue de 7'790.388 galones, siendo un total de 47'823.207 galones [8].

En el año 2014 la cantidad de gasolinas consumida en el Cantón Cuenca, con un incremento del 4,3% en relación al año 2013 fue de 53'888.314 galones. En la Fig. 3 se indica la cantidad de consumo de gasolinas por años tanto para la Provincia del Azuay como para el Cantón Cuenca.

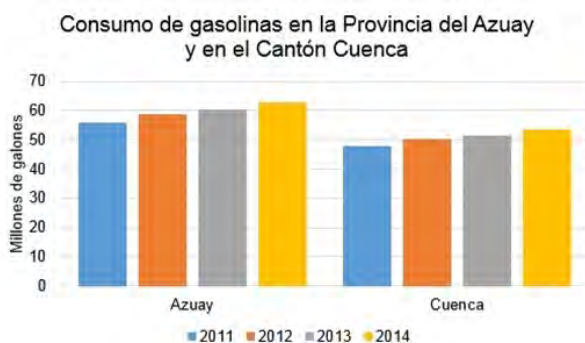


Figura 3: Cantidad de consumo de gasolina en la Provincia del Azuay y en el Cantón Cuenca.

El gasto de combustible y poder calorífico: Los motores basan su funcionamiento en el proceso de combustión, cuyo resultado es la liberación de energía contenida en los enlaces químicos en forma de energía térmica, lo que permite al motor obtener trabajo mecánico. Por ello, es clave conocer la cantidad de energía liberada [9].

$$\dot{Q}_{lib} = \dot{m}_f PC \quad (1)$$

$\dot{Q}_{lib}$ = Potencia térmica liberada,

$\dot{m}_f$ = Gasto de combustible.

PC = Poder calorífico del combustible.

El poder calorífico inferior (PCI) equivale aproximadamente al trabajo máximo obtenible de la combinación combustible/aire, a través de evoluciones reversibles, constituye una referencia para compararlo con el trabajo del motor. El valor del PCI para gasolinas comunes es de 42.700 a 43.000 KJ/kg o 29.000 a

29.600KJ/l [9].

El rendimiento efectivo de un MCIA de encendido provocado es la relación entre la potencia efectiva desarrollada por el motor y la potencia térmica del combustible [9].

$$\eta_e = \frac{N_e}{\dot{m}_f PCI} \quad (2)$$

N_e = Potencia efectiva. PCI = Poder calorífico inferior.

El poder calorífico inferior (PCI) equivale aproximadamente al trabajo máximo obtenible de la combinación combustible/aire, a través de evoluciones reversibles, constituye una referencia para compararlo con el trabajo del motor. El valor del PCI para gasolinas comunes es de 42.700 a 43.000 KJ/kg o 29.000 a 29.600KJ/l [9].

El rendimiento efectivo de un MCIA de encendido provocado es la relación entre la potencia efectiva desarrollada por el motor y la potencia térmica del combustible [9].

Considerando que 1 litro de gasolina proporciona 29.600kJ de energía y que 1kwh es igual a 3.600kJ, entonces la energía generada por 1 litro de gasolina equivale a 8,2 kWh. La energía utilizada por el MCIA para movilidad con un rendimiento del 35% es de 2,88kWh; un galón equivale a 3,785 litros, y en el Cantón Cuenca se consumieron en el año 2014 un total de 53'888.314 galones de gasolinas, entonces son 203'967.269 l/anual, consumiendo una energía de 1.677,1GWh por año con el total de la energía producida por la gasolina, por vehículo liviano son 21.853kWh por año. En la Fig. 4 se muestra el incremento en la generación de energía y de vehículos livianos en el Cantón Cuenca desde el año 2011 hasta el año 2014.

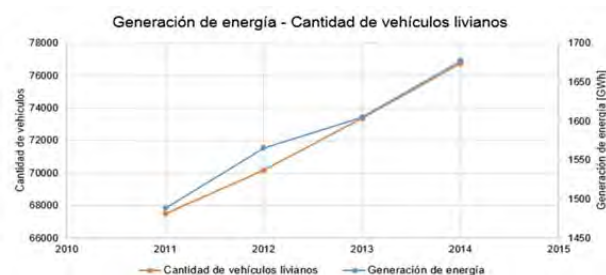


Figura 4: Generación de energía y cantidad de vehículos livianos en el Cantón Cuenca.

En la actualidad existen varios tipos de vehículos para movilización, utilizando energía eléctrica o energía proveniente de combustibles fósiles; por lo que, mediante un análisis económico y ambiental basado en la metodología well-to-wheel (WTW) en el entorno europeo o lo que se puede llamar también de la fuente a la rueda entre vehículos eléctricos (EV), híbridos (HBEV) para compararlos con los motores de combustión interna alternativos (MCIA), y determinar cuales tienen mayores beneficios, considerando distintas circunstancias de manejo y diferentes ciclos de

conducción a nivel mundial. Se determinó también que los gases de efecto invernadero emitidos hacia el medio ambiente en la región de la Unión Europea (UE) son menores en relación a los MCIA, pero en costos y consumo de energía basados en diez años (un ciclo de vida) son muy similares, si se reducen los costos de las baterías se puede inclinar la balanza hacia los EV's [10]. Para alimentar el vehículo es necesario aplicar la transmisión inalámbrica de energía, que se clasifica en tres principios de funcionamiento; por radiación electromagnética, por campo eléctrico y por campo magnético, esta última es la más utilizada para el transporte.

El efecto de inducción de campo eléctrico, utiliza principios de polarización de cargas capacitivas para inducir una corriente en un material receptor, permitiendo obtener resultados de eficiencia energética próximos al 90% en un rango reducido a unos pocos centímetros, y el tercer método, efectos de inducción por campo magnético, permite realizar una transferencia a distancias intermedias (desde unos centímetros hasta un par de metros) [11].

En la Universidad de Stanford (EE.UU.) han desarrollado una tecnología con la que se podría recargar, sin necesidad de parar, los vehículos eléctricos que circulan por una autopista especial o por un carril. Estas carreteras estarían equipadas con mecanismos liberadores de energía que transferirían de forma inalámbrica a las bobinas receptoras de los vehículos que tienen el sistema eléctrico y que se cargarían a medida que los mismos pasen por encima de estos dispositivos [12].

El Reino Unido ha empezado a realizar las primeras pruebas para recargar baterías de vehículos eléctricos mientras circulan por carreteras. El objetivo es crear una red de carga inalámbrica por debajo del asfalto. De esta forma, los conductores de los vehículos eléctricos no necesitarán realizar una parada para recargar sus baterías, sumado a una considerable reducción de las emisiones de gases que genera el parque automotor. La política del gobierno pretende establecer puntos de recarga en autopistas cada 32 kilómetros. No es la primera iniciativa que se lleva a cabo en el mundo, ya que Corea del Sur implementó esta modalidad para que el transporte público pueda cargar sus baterías de forma inalámbrica mientras circulan por una ruta de 12 kilómetros acondicionada con este sistema. El sistema de carga inalámbrica en movimiento está basado en un cableado especial ubicado debajo del asfalto, que emite un campo electromagnético que es recibido por un receptor ubicado en la parte inferior de los vehículos eléctricos [13].

Un sistema de distribución se considera que comienza en una estación eléctrica de potencia con sus respectivos transformadores, los cuales a través de las líneas de subtransmisión transportan la energía hacia las subestaciones de distribución a otro nivel de tensión, y por medio de circuitos primarios, transformadores de distribución, y la red secundaria llega hacia los

consumidores finales. La capacidad de la subestación debe cubrir las necesidades del sistema, la energía proporcionada a los consumidores debe provenir de una subestación, si no es una cercana, desde otra lejana [14]. Aunque un vehículo eléctrico no produce emisiones contaminantes durante su funcionamiento, la generación de energía eléctrica necesaria para mover el vehículo eléctrico da lugar a emisiones contaminantes dependiendo de cómo se haya generado dicha energía.

El caso ideal sería recargar los vehículos eléctricos a través de fuentes de energía renovables como la energía eólica, la energía hidráulica o la energía solar. Cabe destacar que los vehículos eléctricos, aparte de tener una elevada capacidad de reducir las emisiones de CO₂, también tienen un impacto positivo en la reducción de otros gases contaminantes, quizá menos conocidos, pero muy perjudiciales para la salud, como son las partículas en suspensión (PM) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) [15].

4. RESULTADOS

La energía necesaria para que un vehículo se movilice autónomamente, se analiza desde las características dinámicas. De esta forma se determina la fuerza indispensable en la rueda para producir el movimiento, luego se determinan las prestaciones del sistema de propulsión, como es el torque y la potencia, que permitirán, mediante una caja de marchas cubrir las exigencias de la ruta por donde circulará el vehículo.

La ruta será determinada en la ciudad de: Santa Ana de los Cuatro Ríos de Cuenca, ubicada a 2.500 m.s.n.m. Con sus contrastes de modernidad y patrimonio, tiene una alta actividad económica, demandando de las parroquias rurales y urbano parroquiales un fácil acceso a la ciudad. En esta ciudad se ha realizado un estudio de la movilidad para tratar de establecer las mejores estrategias para mejorar la misma. El conocimiento de los lugares donde se generan los viajes y sus destinos, facilita la comprensión de la ciudad y por tanto la identificación de las mejores estrategias para fortalecer las dinámicas de movilidad deseables que puedan garantizar el desarrollo de la ciudad. El Centro Histórico y El Ejido son las zonas con mayor confluencia de destinos de viaje, como puede observarse a través de la Fig. 5 líneas de deseo de viajes, en los modos motorizados de vehículo privado [16].

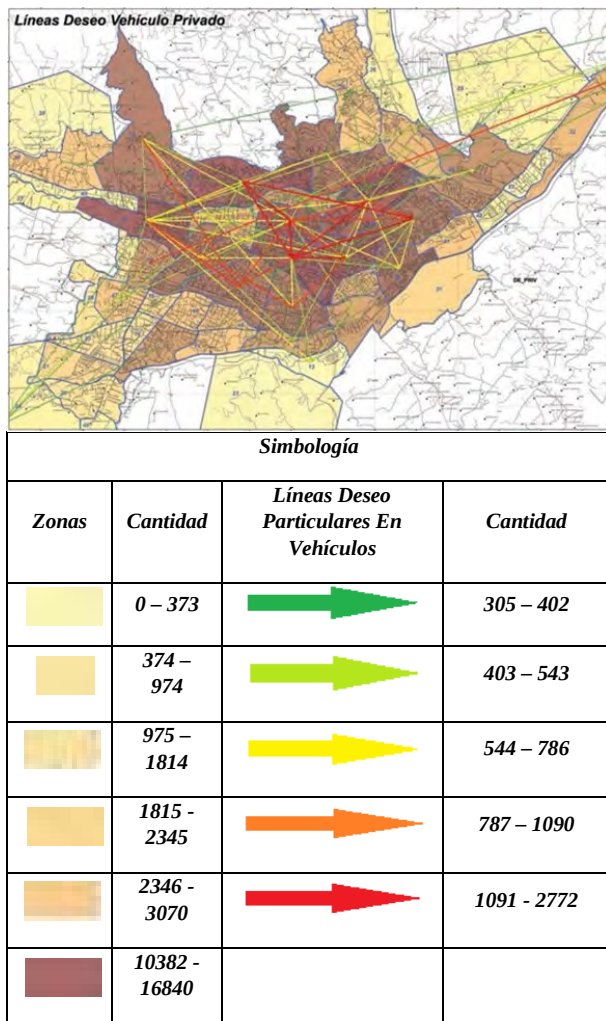


Figura 5: Simbología Líneas de Deseo Vehículo Privado.
Fuente: GAD Municipal 2014

4.1 Determinación de energía

Para determinar la energía necesaria para la movilidad de un vehículo liviano en el cantón Cuenca, según el análisis de la conducción, es necesario considerar que las características del vehículo pueden variar dependiendo de la marca y del modelo; por lo que, los cálculos de energía se basan en los parámetros dinámicos de un vehículo liviano. Para ello, se analizó el valor común del peso, el coeficiente de la resistencia al aire (Cd), el área frontal aproximada y el valor máximo del coeficiente de resistencia a la rodadura en hormigón o a sfalto (fr); dichos valores son característicos y por normativa de un vehículo liviano. Se utilizan valores para que sea un caso de estudio puntual, sin embargo, el estudio puede ser reproducido con otros valores según el tipo de vehículo que más se justifique dependiendo de la ciudad en análisis. La energía obtenida en cada ruta se determina mediante el análisis dinámico del vehículo, además se consideran las características del vehículo liviano; se determina la pendiente en la ruta, la distancia recorrida, la velocidad y la aceleración.

Para determinar si la energía positiva consumida entre las 10 repeticiones de cada ruta y entre las 7

diferentes rutas es significativa, en la tabla 1, se indican las energías obtenidas en las 7 rutas.

Tabla 1: Energía positiva obtenida en cada recorrido.

Ruta	Energía Positiva por repetición (E) (kWh)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2.2	1.7	2.1	1.8	2.0	2.2	2.1	2.4	2.1	2.2
2	1.7	2.1	1.9	2.3	2.3	2.4	2.5	2.3	2.2	2.1
3	2.0	2.3	2.3	2.4	2.3	2.2	2.2	2.3	2.2	2.3
4	2.7	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.1	3.5	2.8	3.2
5	2.0	2.5	2.4	2.0	2.1	2.2	2.1	2.0	2.1	2.2
6	6.8	6.6	7.3	7.0	7.2	6.9	6.6	6.2	6.7	6.8
7	3.9	3.9	3.9	3.8	3.9	3.3	3.9	3.6	3.8	3.4

4.2 Soporte del número de vehículos que funcionan en el carril específico del sistema

Esta primera parte estará en función de la potencia instalada. Después se calculará en función de la demanda de energía dependiendo de lo calculado según el uso del vehículo. En cada subestación existen transformadores y alimentadores, que distribuyen la energía a los consumidores, para el sistema se utilizan alimentadores autorizados por la Empresa Eléctrica Regional Centrosur C.A., basados en las normas INEN 2110, con capacidades de 30 hasta 500 kVA, y ya que, están conectados en anillo se considera la disponibilidad de energía existente entre todas las subestaciones que se encuentran en el sector de las rutas, que tiene un valor de 58.663 kW.

La potencia necesaria para el funcionamiento de carga sin cables mediante inducción necesita 100 kW con una eficiencia del 75% si el vehículo está en movimiento y del 83% si está estático [18].

Para determinar la cantidad de vehículos que funcionan en el sistema es necesario determinar la potencia de carga que puede entregar el sistema considerando las pérdidas, tanto en la entrega de energía como en la transmisión de energía, se considera también la capacidad de las baterías y la demanda de energía de la ruta.

La potencia disponible para el sistema de movilidad alternativo está dado por:

$$Pd = Pt \times n. \quad (3)$$

Pd = potencia entregada [kW], Pt = potencia disponible [kW], N = 60% de la potencia disponible.

Potencia efectiva del sistema de transmisión de energía inalámbrica está dado por:

$$PI = Po \times \eta_i \times \eta_r. \quad (4)$$

PI = potencia en la transferencia inalámbrica de energía [kW], Po = potencia inicial [kW]

Para calcular el número de vehículos que pueden funcionar en el sistema se considera la energía que pueden tener las baterías, cuántos vehículos pueden ser abastecidos con una potencia de 74,25 kW y cuántos abastece la potencia de 35.198 kW.

El número de vehículos en el sistema está determinado por:

Energía de las baterías:

$$E_b = \frac{V \times C}{1.000} \quad (5)$$

E_b = energía en las baterías [kWh], V = voltaje de las baterías [V], C = capacidad de las baterías [Ah]

Cantidad de vehículos en el sistema está determinada por:

$$N1 = \frac{P_i}{E_b} \quad (6)$$

$$N2 = \frac{P_d}{P_i} \times N1 \quad (7)$$

$N1$ = número de vehículos según la potencia en la transferencia de energía inalámbrica. $N2$ = número de vehículos en el sistema por hora.

El sistema eléctrico según la longitud de 55,16 km de la ruta con mayor demanda de energía (ruta 6) puede satisfacer a 8.458 vehículos y con una distancia de 16,75 km de 2.568 vehículos. Para obtener estos datos se realiza una aproximación con medidas típicas del vehículo utilizado y medidas comunes de intersecciones y espacios entre vehículos, considerando una longitud de cada vehículo de 4 m y con una distancia entre ellos de 2 m. También se considera que cada 100 m existe una intersección con un ancho de 8 m; por lo que, se genera una longitud total de vehículos de 33,83 km y de 10,27 km, entonces al aplicar la distancia máxima en la ruta y con la capacidad de las baterías de 60 Ah dentro del sistema caben desde 3.819.

En la Fig. 6 se indica en las barras de color naranja la cantidad de vehículos livianos que circulan en el sistema durante una hora y en las barras de color azul la energía necesaria, dependiendo de la capacidad de la batería, puesto que se pueden utilizar distintos tipos de baterías, donde a mayor demanda de energía es menor la cantidad de vehículos que pueden funcionar en el sistema.

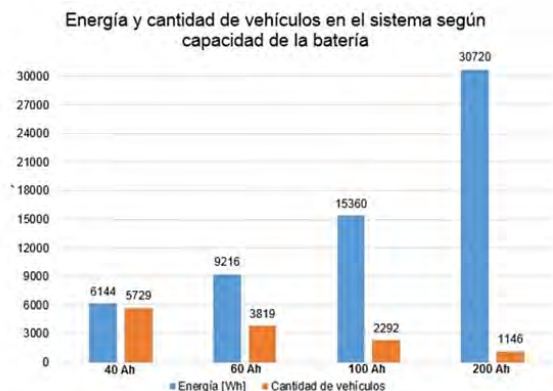


Figura 6: Demanda de energía y cantidad de vehículos en el sistema.

4.3 Consumo de energía en el sistema

Con el propósito de determinar la máxima demanda de energía que genera el sistema, se considera la ruta con mayor distancia de 55,16 km y con mayor energía consumida de 7,25 kWh, donde la cantidad de vehículos en el sistema depende de la capacidad de las baterías, también se consideran parámetros como: El tiempo que el sistema funciona al 100%, el porcentaje de viajes que se efectúan desde y hacia al Centro Histórico de la ciudad y a El Ejido que es un 33% de viajes de vehículos privados y por motivos de trabajo.

De esta manera el análisis de la demanda de energía en el sistema funcionando con el 100% de demanda y durante 6 horas, considerando que las horas con mayor demanda en los viajes son desde las 07h00 hasta las 9h00, de 12h00 a 14h00 y de 18h00 a 20h00, debido a que son las horas características de entrada y salida de trabajos, así como también de centros educativos.

Consumo de energía en el sistema al 100% durante 6 horas está determinado por:

Cantidad de vehículos durante 6 horas:

$$N3 = N2 \times t \quad (8)$$

$N3$ = cantidad de vehículos, t = tiempo [h]

$$E1 = \frac{E \times N3}{1.000} \quad (9)$$

$E1$ = demanda de energía [MWh], E = demanda de energía máxima en la ruta [kWh]

En la tabla 2 se indica los valores obtenidos de la demanda de energía según la capacidad de la batería y la cantidad de vehículos que funcionan en el sistema.

Tabla 2: Demanda de energía y cantidad de vehículos en el sistema al 100 % durante 6 horas.

Capacidad de la batería (C) [Ah]	Demanda de Energía (E1) [MWh]	Número de vehículos en el sistema (N3)
40	249,20	34.373
60	166,14	22.915
100	99,68	13.749
200	49,84	6.875

En la Fig. 7 se indica la cantidad de vehículos que funcionan en el sistema al 100% de demanda y durante 6 horas, la disminución de consumo de energía se debe a la menor cantidad de vehículos que puede soportar el sistema, puesto que la demanda de energía de las baterías aumenta desde 6,14 kWh hasta 30,72 kWh, como se mostró en la figura 11. La demanda de energía de la ruta es de 7,25 kWh por vehículo, al disminuir la cantidad de vehículos que soporta el sistema disminuye la demanda de energía total.

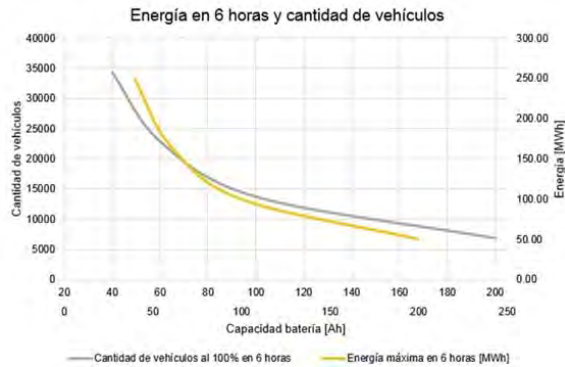


Figura 7: Demanda de energía en 6 horas y cantidad de vehículos en el sistema.

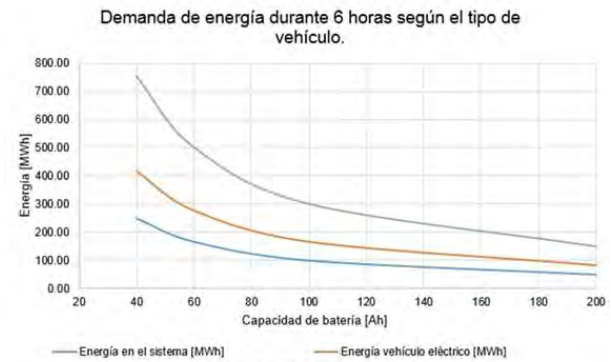


Figura 8: Demanda de energía durante 6 horas según el tipo de vehículo.

4.4 Ahorro energético

La demanda de energía en el sistema se considera según el rendimiento que existe en el sistema de inducción de energía (75%), en el regulador (99%), en las baterías (99%), en el controlador (97%), en el motor eléctrico (89%) y en la caja de cambios (95%), finalmente en el sistema se obtiene un rendimiento del sistema eléctrico (EV) es de 60% y con el MCIA y la caja de marchas el rendimiento es de 33%. [9]

Demanda de energía del sistema eléctrico (EV) y del MCIA está determinado por:

$$E_v = \frac{E_1 \times 100}{60} \quad (10)$$

$$E_M = \frac{E_1 \times 100}{33} \quad (11)$$

E_v = energía necesaria para el sistema eléctrico. E_M = energía necesaria para el MCIA.

Ahorro energético:

$$AE = 100 - \left(\frac{E_M \times 100}{E_v} \right) \quad (12)$$

AE = ahorro energético del sistema eléctrico E_v .

En la tabla 3 y en la Fig. 8 se indican los valores de la demanda de energía considerando la demanda energética de la ruta funcionando al 100% durante 6 horas, la demanda energética para satisfacer el sistema con propulsión eléctrica (EV) es desde 415,34 MWh y con el MCIA es de 755,16 MWh; por lo tanto, el ahorro energético utilizando un sistema eléctrico para movilizarse es del 82%.

Tabla 3: Demanda de energética según el sistema de propulsión al 100% durante 6 horas.

Capacidad de la batería [Ah]	40	60	100	200
Demanda energética de la ruta (E_1). [MWh]	249,2	166,1	99,7	49,8
Demanda energética del EV. [MWh]	415,3	276,9	166,1	83,1
Demanda energética del EM. [MWh]	755,2	503,4	302,1	151,0
Ahorro energético entre EV y MCIA (AE). [%]	82	82	82	82

En la Fig. 9 se indica la demanda de energía del sistema con un vehículo eléctrico de 276,89 MWh y la demanda de energía del sistema con un vehículo que funciona con el MCIA y caja de marchas de 503,44 MWh, donde existe un ahorro de energía del 82% en caso de utilizar el sistema de movilidad eléctrico, se indica 4 grupos de columnas cada una representa la demanda de energía y el ahorro energético según la capacidad de la batería, la misma que define la cantidad de vehículos que pueden funcionar en el sistema.



Figura 9: Ahorro energético.

5. CONCLUSIONES

La presente investigación pretende generar una solución para disminuir el consumo de energía que se genera en el transporte, mediante un sistema de movilidad eléctrico alternativo, alimentado por la red de electricidad pública, que tiene una ruta específica en la ciudad, que satisface la demanda de circulación. Comparado con la utilización de vehículos convencionales, dotados de un motor de combustión interna alternativo a gasolina, se obtiene como resultado una disminución en el consumo de energía del 82%, soportando el carril de circulación en 24 horas de uso continuo desde 27.498 hasta 137.491 vehículos. En la ruta número 6 con una distancia de 55,16 km se pueden tener 8.458 vehículos considerando separación entre ellos e intersecciones, estableciendo una distancia ocupada por los vehículos de 33,83 km; en el caso de una distancia de la ruta de 16,75 km se pueden tener 2.568 vehículos con una distancia de 10,27 km; entonces al considerar las distancias máximas y cantidad de vehículos máxima que es de 5.729 vehículos, indica que dentro de la ruta con mayor

distancia caben todos los vehículos que satisface el sistema.

A partir de esta investigación se propone para futuros análisis determinar la disminución de gases contaminantes que se puede generar con la aplicación del sistema de movilidad alternativo, también se puede hacer una caracterización de la configuración del sistema de propulsión del vehículo considerando otros tipos de automóviles, que pueden variar en masa, tipo de motor eléctrico, y hacer una comparación con otros tipos de motores de combustión interna, como es el motor Diésel, la investigación también permite que se abra un análisis de las características de las baterías que se pueden utilizar para alimentar el motor eléctrico y recibir la carga del sistema, otra nueva investigaciónes la caracterización del sistema de transmisión inalámbrica de energía, que con nuevas tecnologías se puede disminuir la potencia de 100kW requerida en esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sears & Zemansky. Física universitaria, 1. Décima segunda edición. Volumen 1. Universidad Autónoma Metropolitana. Unidad Azcapotzalco. México (2009)
- [2] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2013. Balance Energético Nacional (2013)
- [3] Atabani, a. E. et al. A review on global fuel economy standards, labels and technologies in the transportation sector. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), pp.4586–4610 (2011)
- [4] Asociación de la Industria Hidrocarburífera del Ecuador, 2015. El Petróleo en Cifras (2014)
- [5] Barlow, T. et al., A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions. , p.280. (2009)
- [6] INEC, 2014. Anuario de Estadísticas de Transportes INEC 2014. , p.198. (2014)
- [7] C. V. Arellano, “Determinación y análisis de las emisiones de contaminantes primarios y rendimiento vehicular mediante la variación del octanaje y contenido de azufre en la gasolina y Diésel,” p. 185, (2013).
- [8] EMOV, 2014. Rendición de Cuentas (2014)
- [9] Payri. F, Desantes. J.M., Motores de combustión interna alternativos. Editorial Revert SA. Universitat Politècnica de Valencia. España (2011)
- [10] Faria, R. et al. A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. , 61, pp.19–30 (2012)
- [11] Laborde, E.S., Transferencia Inalámbrica de Energía para Sistemas de Bajo Consumo Utilizando Resonancia Magnética Fuertemente Acoplada (2015)
- [12] Crean una tecnología inalámbrica para recargar coches eléctricos que circulan por la autopista. <http://www.rtve.es/noticias/20120215/crean-tecnologia-inalambrica-para-recargar-coches-electricos-circulan-autopista/498088.shtml>
- [13] Llegan los primeros carriles de recarga inalámbrica para coches eléctricos. <http://www.abc.es/tecnologia/noticias/20150819/abci-carril-recarga-inalambrica-coches-201508191846.html>

[14] Chalco, J.G.I., Determinación del área de influencia de la subestación # 8 y diseño preliminar de alimentadores Empresa Eléctrica Regional Centrosur C.A. (2010)

[15] Observatorio Tecnológico de la Energía. Mapa Tecnológico Movilidad Eléctrica. , pp.20–20. (2012)

[16] GAD Municipal. Categorización de la demanda de transporte de Cuenca. (2014)

[17] Aparicio Izquierdo, Francisco. Teoría de los vehículos automóviles. Madrid. Universidad Politécnica de Madrid (1995)

[18] BAE, JH. Korea gallops ahead in a race for dynamic on-the-go wireless charging EV system. 2013. <http://itersnews.com/?p=44874>



Diego Francisco Torres.- Nació en Cuenca, Ecuador en 1980. Recibió su título de Magíster en Sistemas Vehiculares de la Universidad del Azuay en 2016; de Especialista en Docencia Universitaria en 2012 de la Universidad del Azuay. Sus campos de investigación están relacionados con el consumo de

combustible en motores de gasolina, aumento de torque y potencia en vehículos, análisis energético de vehículos.



Andrés López Hidalgo.- Nació en Cuenca, Ecuador en 1980. Recibió su título de Doctor en sistemas propulsivos en medios de transporte, también el Master Universitario en Motores de Combustión Interna Alternativos en 2014, en la Universidad Politécnica de Valencia. España. Sus campos de investigación están

relacionados con el consumo de combustible en motores de gasolina, aumento de torque y potencia en vehículos, análisis energético de vehículos y emisiones contaminantes en vehículos y autobuses.



Mateo Fernando Coello.- Nació en Cuenca en 1986. Graduado en la maestría de Planificación y Gestión Energética, en la Universidad Estatal de Cuenca en el 2012. Actualmente docente a tiempo completo en la facultad de Ciencia y Tecnología, miembro de la junta

académica de la escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz y miembro del Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería automotriz (ERGON) de la Universidad del Azuay



Daniel Guillermo Cordero.-

Nació en Cuenca en 1980. Recibió su título de Doctor en Ciencias de Ingeniería en 2015 del Tecnológico de Monterrey. Su campo de investigación se encuentra relacionado con la evaluación de desempeño mecánico, energético y ambiental de un vehículo eléctrico, desarrollo de ciclos de conducción, reducción del consumo de combustible y emisiones contaminantes en vehículos y autobuses.

Study of Transesterification of Pinion Oil (*Jatropha curcas*) with Acetone as Cosolvent at Subcritical Conditions

Estudio de la Transesterificación de Aceite de Piñón (*Jatropha curcas*) con Acetona como Co-solvente bajo Condiciones Subcríticas

E. Camacho¹

L.I. Jaramillo²

¹Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Química, Quito, Ecuador
E-mail: elicammo89@hotmail.com

²Escuela Politécnica Nacional, Departamento de Ingeniería Química, Quito, Ecuador
E-mail: lorena.jaramillo@epn.edu.ec

Abstract

The use of fossil fuels has increased the greenhouse effect around the world, causing a worldwide alarm. Ecuador is dependent on petroleum derivatives, but petroleum reserves are being depleted by the day. Therefore, research about non-traditional alternative energies has increased in the country. This research focused on the transesterification reaction of pinion oil with methanol at subcritical conditions to obtain biodiesel. First, transesterification without acetone was done at 1.5; 1.4 and 1.25 MPa and of 363.15; 373.15 and 378.15 K. As well, acetone was added to the reaction varying the molar ratio of methanol/acetone of 1:1, 1:1.5 and 1:2. Yield and biodiesel properties were obtained from both cases. Additionally, the reaction products were analyzed by gas chromatography. Viscosity and cetane number improved considerably the biodiesel quality. In the experiments without acetone, the highest yield and properties similar to commercial diesel were obtained at 363.15 and 1.5 MPa. At these conditions the yield was 93.00 %, the cetane number was 48.10 and the kinematic viscosity was 5.42 cSt. When methanol to acetone molar ratio was 1:1.5, the yield increased to 96.00%, the cetane number to 50.00 and the kinematic viscosity decreased to 4.41 cSt. The methyl esters most abundant were pinolenic (40%) and linoleic (33%). Biodiesel properties with acetone were similar to the norm INEN: 1489 for diesel N°2. To sum up, acetone promotes the miscibility between alcohol and oil, increasing the production of esters. Pressure was the main variable that affected the quality of biodiesel at most, producing a fuel similar to diesel N°2 and suitable for engines.

Index terms— Acetone, biodiesel, pinion oil, subcritical conditions, transesterification

Resumen

El uso de combustibles fósiles ha incrementado el efecto invernadero, generando alarma a nivel mundial. El Ecuador es dependiente de derivados del petróleo, los cuales se están agotando, por lo que se han promovido investigaciones sobre energías alternativas no tradicionales. Esta investigación profundizó en la reacción de transesterificación de aceite de piñón con metanol bajo condiciones subcríticas para obtener biodiesel. Inicialmente, la transesterificación sin acetona se desarrolló a 1,5; 1,4 y 1,25 MPa y 363,15; 373,15 y 378,15 K. Posteriormente, se añadió acetona, variando las relaciones molares metanol/acetona en 1:1, 1:1,5 y 1:2. El rendimiento y las propiedades del biodiésel fueron obtenidos para los dos casos. Adicionalmente, los productos de la reacción fueron analizados por cromatografía de gases. La viscosidad y el número de cetano denotaron mejoramiento considerable en la calidad del biodiesel. Los experimentos sin acetona determinaron que a 1,5 MPa y 363,15 K, se obtuvo el mejor rendimiento (93,00%), número de cetano de 48,10, la viscosidad cinemática disminuyó a 5,42 cSt. La relación molar metanol/acetona 1:1,5 incrementó el rendimiento a 96,00%, el número de cetano a 50,00 y la viscosidad cinemática disminuyó a 4,41 cSt. Los ésteres metílicos más abundantes fueron el pinolénico (40%) y linoleico (33%). Las propiedades del biodiésel con acetona fueron similares a las de la norma INEN: 1489 para diésel N°2. Los resultados concluyen que la acetona promueve la miscibilidad entre el alcohol y el aceite, incrementado la producción de ésteres. La presión fue la variable más influyente en la calidad del biodiésel, permitiendo producir un combustible con características similares al diésel N°2 y apto para el uso en motores.

Palabras claves—acetona, biodiésel, aceite piñón, condiciones subcríticas, transesterificación.

1. INTRODUCCIÓN

Los problemas ambientales que el mundo enfrenta en la actualidad promueven la búsqueda de nuevas alternativas energéticas para mejorar la condición climática del planeta.

Una de estas alternativas son los biocombustibles que contribuyen a disminuir los gases de efecto invernadero, desarrollar las plantaciones agrícolas de productos no comestibles y disminuir el consumo de combustibles fósiles (Arpel, 2009, p.158).

Existen varios tipos de biocombustibles, los más estudiados son el bioetanol y el biodiésel. El bioetanol se obtiene a partir de caña de azúcar, maíz, sorgo, remolacha o residuos vegetales, mientras que el biodiésel se obtiene a partir de aceites vegetales. Los mayores productores de bioetanol y biodiésel a nivel mundial son Brasil y Alemania con 45 % y 63 % respectivamente (Torres, 2012, p. 17).

Actualmente existen varios estudios sobre transesterificación a elevada presión y temperatura. Cao, Han y Zhan (2005) trabajaron a 100 MPa y 723,15 K para obtener biodiésel de soya alcanzando altos rendimientos con un consumo energético muy elevado. En los últimos años se han buscado alternativas para disminuir la presión y la temperatura. Sánchez, Encinar, Martínez y González (2015) obtuvieron biodiésel de aceite de castor en condiciones subcríticas con exceso de metanol a una temperatura de 493,15 K, obteniendo 70 % de rendimiento (p.96).

La transesterificación usualmente se ha realizado con diferentes tipos de catalizadores, los cuales promueven formación de jabones, subproductos y efluentes. Siendo el uso de co-solventes una alternativa en desarrollo para disminuir los inconvenientes mencionados anteriormente. Los co-solventes promueven la formación de ésteres, aumentan la miscibilidad de los reactantes y disminuyen la viscosidad, no se han realizado estudios del efecto de un co-solvente en la calidad del biodiésel del aceite de piñón (Lombeida, 2015, p.1; Mora, 2013, p.1; Toinga, 2016, p.1; Wang, Xiu, Xiao y Yin, 2008, p.3115).

Debido a los problemas económicos y ambientales mencionados anteriormente, surge la necesidad de producir biocombustibles por métodos no tradicionales. Si bien existen varios estudios a condiciones ambientales y a condiciones supercríticas, no se ha profundizado el análisis a condiciones subcríticas en ausencia de catalizador y con el uso de acetona. Por esta razón el proyecto se considera uno de los primeros estudios en evaluar condiciones menos

severas de presión y temperatura para la obtención del biodiésel, siendo una técnica económicamente y ambientalmente viable (ATSDR, 2016; Dermibas, 2009, p.14; Pardal, 2012, p. 36).

Por lo expuesto anteriormente, el presente trabajo evaluó el rendimiento del biodiésel, en dos condiciones diferentes: la primera sin el uso de catalizador a diferentes condiciones de presión y temperatura, y la segunda con co-solvente.

El trabajo se divide en introducción, marco teórico, metodología, resultados y conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Producción de biodiésel a partir de aceites no comestibles

El biodiésel se produce a partir de grasas vegetales y animales, las cuales pueden ser comestibles y no comestibles. Las plantas de las que extraen grasas no comestibles presentan ventajas tales como: crecer en suelos improductivos, no desplazar a zonas agrícolas y ser tóxica para consumo humano y animal. Adicionalmente, utilizando materias primas que no contribuyan a la crisis alimentaria, el costo total de producción de biodiésel disminuye del 75 % al 60 % (Avilez, Chan, Galaz, Loyola y Ucan, 2012, p. 95). Entre los aceites no comestibles más utilizados en producción de biodiésel se pueden mencionar al aceite de piñón, ricino, cártamo y algodón.

El desarrollo de biocombustibles empezó en el siglo XIX, cuando se probó el aceite vegetal directamente en el motor. Las pruebas fueron fallidas, debido a la formación de depósitos de carbón y coque en los inyectores, aumento de la densidad del lubricante y formación de gel en el aceite. Para disminuir el daño causado en el motor se probó la mezcla de aceite vegetal (20 %) con una parte de diésel (80 %), mejorando así la viscosidad y volatilidad, (Pardal, 2012, p.15).

Las microemulsiones es otro método común en el cual se forman microestructuras a partir de líquidos inmiscibles, obteniéndose un combustible con características similares al diésel N°2. También se ha estudiado el craqueo térmico o pirólisis, que trata de la conversión de cadenas largas de carbono en otras más pequeñas, utilizando energía calórica para formar combustibles con características muy similares a la gasolina y diésel (Pardal, 2012, p.16).

La transesterificación es la técnica más usada que consiste en la reacción de una grasa con un grupo alcohólico (metanol o etanol) con un catalizador, produciendo la formación de ésteres y

glicerina, como se puede observar en la Fig. 1 (Pardal, 2012, p. 17).

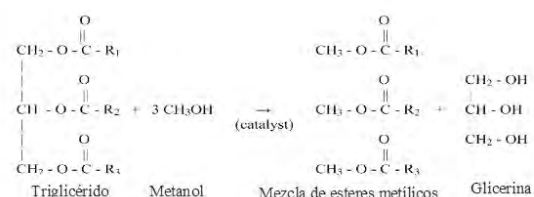


Figura 1: Reacción de transesterificación

En la figura anterior se observa que en la transesterificación, primeramente se convierten los triglicéridos a diglicéridos y posteriormente a monoglicéridos. En la transesterificación se consideran los siguientes parámetros que inciden en el rendimiento del biodiésel: materia prima, condiciones de reacción, relación molar alcohol/aceite, tipo y cantidad del catalizador y la agitación (Sánchez y Huertas, 2012, p. 24).

La transesterificación se puede realizar con el uso de catalizadores y sin el uso de los mismos. En la transesterificación catalítica pueden formarse jabones debido a la presencia de agua y ácidos grasos libres en la materia prima, por lo que el alcohol debe ser anhidro sin superar el 0,06 % en volumen de agua (Leung, Leung y Wu, 2010, p.1083). Otros inconvenientes de este método son: recuperación del catalizador, generación de efluentes y corrosión en los equipos (Leung, 2010, p.1083).

Los problemas generados por el uso de catalizadores, han impulsado el estudio de nuevas alternativas para la producción de biodiésel. Entre estas técnicas no convencionales se mencionan: la transesterificación con catalizadores heterogéneos, en condiciones supercríticas, con baño y sonda de ultrasonido y en condiciones subcríticas. Todos estos métodos han permitido obtener rendimientos de biodiésel superiores al 90 % (Cao, Han, Zhang, Sun y Li, 2005, p.347, Leung, Xuan y Leung, 2010, p.1085, Liu, Huayang, Yujun, Shenlin y Xianglan, 2008, p.2).

Estos nuevos métodos disminuyen la cantidad de efluentes, la contaminación causada por catalizadores y la cantidad de subproductos, eliminan la etapa de lavado y evitan la saponificación de los productos de reacción. Lo que a su vez influye en el tiempo de reacción y producción de biodiésel que disminuye a 60 minutos con relación a otros métodos que pueden durar de 2 a 48 horas (Fukuda, 2001, p. 412, Rojas, Girón y Torres, 2009, p. 2009).

En la actualidad, el aceite de piñón ha llamado la atención para obtención de biodiésel mediante transesterificación por su bajo costo. En el Ecuador se utiliza aceite de piñón únicamente

para generación eléctrica, por este motivo se pretende darle mayor valor agregado como materia prima para obtención de biodiésel (INER, 2013, p.5).

3. METODOLOGÍA

3.1 Caracterización del aceite de piñón

La muestra de aceite de piñón, otorgada por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, se caracterizó 48 horas después de ser recibida. Para la caracterización se tomaron en cuenta las propiedades y métodos que se detallan en la Tabla a continuación:

PROPIEDADES	MÉTODO
Humedad	AOAC 926.12
Índice de acidez	INEN 38
Índice de peróxido	AOAC 965.33
Ácidos grasos libres	NTE INEN-ISO 5508
Índice de yodo (Wijs)	AOAC 920.159
Índice de refracción	AOAC 921.08
Índice de saponificación	AOAC 920.160
Densidad relativa	INEN 35

Tabla 1: Propiedades físico-químicas y métodos de caracterización del aceite de piñón

3.2 Determinación de las mejores condiciones de presión y temperatura de la reacción de transesterificación de aceite de piñón en función del rendimiento de biodiésel, viscosidad y número de cetano.

La transesterificación se realizó en el reactor batch de alta presión (300 atm, 350 ° C) existente en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Escuela Politécnica Nacional. Se utilizó un diseño experimental factorial 32 para determinar la presión y temperatura que favorezcan el rendimiento de la reacción de transesterificación. La experimentación se realizó por duplicado, manteniendo el constantes el tiempo en 60 minutos y la relación volumétrica aceite/metanol en 10:1, en total se realizaron 18 experimentos. En la Tabla 2 se detalla el diseño propuesto (Pardal, 2012, p.38).

Relación volumétrica aceite de piñón-metanol (10:1)	
Presión (MPa)	Temperatura (K)
1,50	363,15
	373,15
	378,15
1,40	363,15
	373,15
	378,15
1,25	363,15
	373,15
	378,15

Tabla 2: Condiciones de operación de la reacción de transesterificación

MUESTRA	ANALITOS	UNIDAD	RESULTADOS
Aceite de piñón	Humedad	%(g/100g)	0,060
	Índice de acidez (%Ácidos grasos libres)	mg KOH/ gramos aceite	1,540
	Índice de peróxido	meq.O ₂ /kg. aceite	2
	Índice de yodo (WIJS)	cgl/g	114
	Índice de refracción		1,471
	Saponificación	mg KOH	187
	Densidad	g/mL	0,915

Tabla 3. Resultados de caracterización del aceite de piñón

3.3 Evaluación del uso de acetona como co-solvente en la reacción de transesterificación.

Determinadas las mejores condiciones de presión y temperatura que resultaron de los ensayos realizados sin co- solvente, se realizaron las pruebas con co-solvente (acetona). Se utilizó un diseño experimental unifactorial aleatorio al azar, variando las concentraciones molares de metanol – acetona en 1:1; 1:1,5 y 1:2, La reacción se realizó manteniendo constante el tiempo de reacción, la relación volumétrica metanol: aceite y la agitación (Pardal, 2012, p.40). Se realizaron 27 experimentaciones.

Se comparó el rendimiento del biodiésel a las mejores condiciones de presión, temperatura y concentración de co-solvente del presente proyecto, con el rendimiento obtenido por Arias (2014), quien trabajó con aceite de piñón a alta presión y temperatura (p.55).

Se realizó el proceso de purificación del biodiésel para separación del alcohol, la acetona y los subproductos. Finalmente se compararon las propiedades del biodiésel obtenido en este proyecto con las propiedades del diésel N°2, y se realizó un análisis estadístico de los resultados con el programa estadístico STATGRAPHICS Centurion XV.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La muestra de aceite de piñón fue purificada previamente por el proveedor para eliminar residuos de la semilla. Los resultados de caracterización, métodos y límites permitidos por la norma VDIN 51 605 se muestran a continuación.

La caracterización del aceite cumplió con todas las propiedades mostradas en la tabla anterior, cuyos valores están dentro de los parámetros permitidos, mostrados en la tabla a continuación.

ANALITOS	UNIDAD	Mín.	Máx.
Humedad	%(g/100g)	--	--
Índice de acidez (%Ácidos grasos libres)	mg KOH/ gramos aceite	--	2,0
Índice de peróxido	meq.O ₂ /kg. aceite		--
Índice de yodo (WIJS)	cgl/g	95	125
Índice de refracción		--	
Saponificación	mg KOH	-	--
Densidad	g/mL	--	--

Tabla 4: Parámetros permitidos para el aceite de piñón

Obtención del biodiésel

A partir de las muestras de biodiésel obtenidas del proceso de transesterificación sin catalizador y sin co-solvente, se determinó el rendimiento, viscosidad y número de cetano. En la Fig. 1 se muestran los resultados del rendimiento obtenido para cada uno de los ensayos.

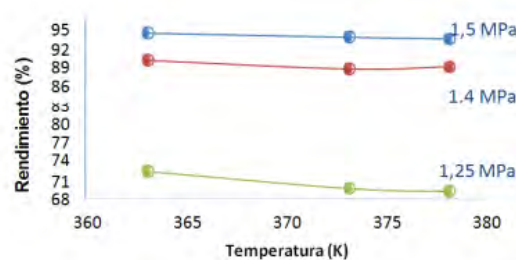


Figura 1. Rendimiento de biodiésel de transesterificación sin catalizador ni co-solvente en función de la temperatura y presión

En la figura anterior se observa que al aumentar la presión y disminuir la temperatura, el rendimiento aumenta del 70 % al 92 %, lo que se corrobora en el diagrama de Pareto a continuación.

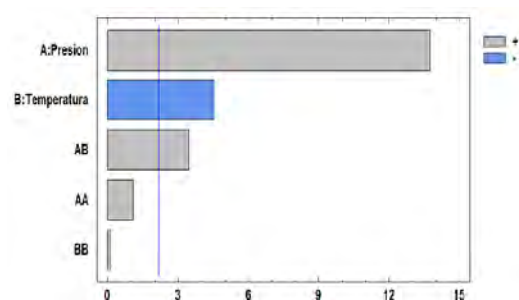


Figura 2. Diagrama de Pareto para el rendimiento

El diagrama estadístico representa mediante barras horizontales a la presión y temperatura. La línea vertical que atraviesa las barras, indica el grado de confiabilidad estadística que tienen las variables analizadas. Con lo mencionado anteriormente se deduce que tanto la presión como la temperatura tienen un efecto significativo en el rendimiento de la reacción. La presión influye positivamente en el rendimiento, por el contrario la barra de color azul correspondiente a la temperatura tiene efecto negativo en el rendimiento. Este comportamiento atípico se corrobora en estudios realizados por Guo y Leung (2006), quienes encontraron que al aumentar la temperatura más allá del nivel óptimo el rendimiento disminuye debido a la formación de jabones producidos.

La viscosidad es una de las propiedades que incide significativamente en la calidad del biodiésel. Los resultados obtenidos para las diferentes condiciones de operación se muestran a continuación.

PRESIÓN (MPa)	TEMPERATURA(K)		
	363,15	373,15	378,15
1,5	5,421	5,784	5,843
1,4	8,797	8,848	10,595
1,25	28,615	29,064	31,195

Tabla 5: Viscosidad cinemática a diferentes condiciones de presión y temperatura

A condiciones bajas de presión y alta temperatura la viscosidad que se obtuvo fue de 31,2 (mm²/s) cSt, siendo este valor cercano a la viscosidad del aceite, lo que permite deducir que la reacción del aceite con el metanol no se completó. Sin embargo a una presión de 1,5 MPa se obtuvieron valores de viscosidades bajas mejorando así la calidad del biodiésel.

En la tabla siguiente se observan los valores de número de cetano del biodiésel obtenido experimentalmente.

PRESIÓN (MPa)	TEMPERATURA(K)		
	363,15	373,15	378,15
1,5	48,104	43,945	42,985
1,4	40,905	39,470	37,810
1,25	36,010	29,340	31,950

Tabla 6: Número de cetano a diferentes condiciones de presión y temperatura.

El número de cetano aumenta en forma directamente proporcional con respecto a la presión hasta valores cercanos a 48, el valor permitido por la norma.

A partir de los datos experimentales analizados anteriormente, las condiciones de presión y temperatura a las que se obtuvieron menor viscosidad (5,42 cSt), mayor número de cetano (48,1) y mayor rendimiento (92,96 %) de biodiésel fue de 1,5 MPa y 363,15 K.

Con estas condiciones se procedió a realizar la transesterificación con el uso de co-solvente.

Adicionalmente se realizó el análisis estadístico de múltiples respuestas en STATGRAPHICS Centurion XV para las tres propiedades, de esta manera se pudo comprobar que la presión de 1,5 MPa y la temperatura de 376,15 K (96 °C) son valores muy cercanos a los obtenidos experimentalmente, esto se indica en la Fig. 3.

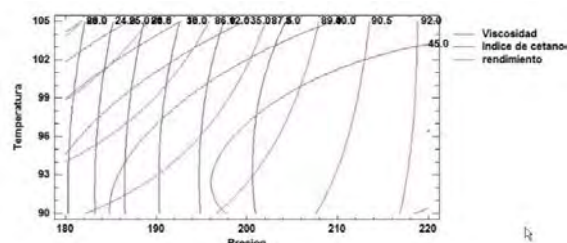


Figura 3. Diagrama de múltiples respuestas para viscosidad, índice de cetano y rendimiento sin co-solvente.

Obtención de biodiésel con acetona

En la Tabla 7 se muestra el rendimiento obtenido a diferentes concentraciones de acetona.

CONCENTRACIÓN MOLAR METANOL:ACETONA	RENDIMIENTO (%)
1:1	90,81
	90,55
	91,05
1:1,5	95,69
	96,10
	96,07
1:2	92,32
	92,00
	90,38

Tabla 7: Rendimiento de biodiésel a diferentes concentraciones de acetona

En la tabla anterior se observa que los valores más altos de rendimiento son 95,69 %; 96,10 % y 96,07 % que corresponden a la concentración molar metanol/acetona de 1:1,5. Mejorando en un 3% con respecto al rendimiento obtenido sin el uso de acetona (92,96 %). A continuación, se muestran los resultados de caracterización de biodiésel obtenido experimentalmente con el uso de acetona.

Contenido de azufre	0,016	0,016	0,015
Corrosión en lámina de cobre	1ª	1ª	1ª
Número de cetano	48,711	49,947	50,085
Residuo carbonoso 10%	1,037	0,434	0,296
Temperatura de destilación al 90%	386,940	408,870	415,520

Tabla 8: Caracterización de biodiésel con el uso de acetona

Las propiedades del biodiésel obtenido que cumplen con la norma son: densidad, punto de inflamación, agua y sedimentos, contenido de agua, cenizas sulfatadas, contenido de azufre, corrosión en lámina de cobre, número de cetano y residuo carbonoso al 10 %. La viscosidad disminuyó hasta 4,417 cSt y el número de cetano aumentó a 49 cumpliendo así con los valores permitidos por la norma de biodiésel y diésel N°2, estos valores corresponden a la concentración molar de 1:1,5.

Finalmente para evaluar el método desarrollado se comparó el rendimiento de este estudio (95,95 %) con el obtenido en el estudio realizado por Arias (2014), quien realizó transesterificación catalítica y no catalítica de aceite de piñón, en las condiciones detalladas en la tabla a continuación (p.55).

MÉTODOS	CONDICIONES	RENDIMIENTO
CATALÍTICA	Presión atmosférica Temperatura: 363K Alcohol: metanol Catalizador: Hidróxido de sodio	76,40 %
SUPERCRÍTICA	Presión: 1,8 MPa Temperatura: 523K Alcohol: etanol Sin catalizador	90,00%
SUBCRÍTICA	Presión: 1,5 MPa Temperatura: 363K Alcohol: metanol Sin catalizador	95,95%

Tabla 9: Comparación de métodos de transesterificación a diferentes condiciones

En la tabla anterior se observa que a condiciones subcríticas de presión y temperatura, el mayor rendimiento es de 95,95 %, que supera en 20 % al rendimiento de la transesterificación catalítica (76,40 %) y en 6 % al rendimiento a condiciones supercríticas (90,00 %). Por esta razón la transesterificación en condiciones subcríticas con acetona es una alternativa atractiva para el desarrollo de biocombustibles.

Adicionalmente se compararon las propiedades del biodiésel obtenido con las

propiedades del diésel N°2.

Concentración metanol: acetona			
PARÁMETROS	1:1	1:1,5	1:2
Densidad	0,905	0,89	0,876
Punto de inflamación	119,630	125,760	115,900
Agua y sedimentos	0,023	0,035	0,034
Contenido de agua	479	481	475
Viscosidad cinemática a 40°C	5,702	4,47	5,155
Cenizas sulfatadas	0,016	0,01	0,015

Tabla 9: Comparación de métodos de transesterificación a diferentes condiciones

5. CONCLUSIONES

1. El rendimiento de la reacción de transesterificación de aceite de piñón, mejoró con el uso de acetona como co-solvente. Sin el uso de co-solvente se obtuvo el 92,96 % y con el uso de acetona incrementó a 95,69 %. Estos resultados indican que la acetona promueve la miscibilidad entre el alcohol y el aceite y la formación de ésteres.
2. La presión fue la variable física que más influyó en la calidad del biodiésel. En el diagrama de Pareto, se observó que la presión tiene una influencia positiva en el rendimiento de biodiésel, al aumentar de 1,25 a 1,5 MPa, mientras que la temperatura influye negativamente en el mismo, al incrementar de 363,15 a 378,15.
3. A condiciones de presión baja y temperatura alta, la viscosidad fue de alrededor de 32 (mm²/s) cSt, este valor cercano a la viscosidad del aceite indica que la reacción del aceite con el metanol no se completó. Sin embargo con el uso de acetona la viscosidad disminuyó hasta 4,41 (mm²/s) cSt, favoreciendo la reacción y la formación de biodiésel.
4. El índice de cetano tuvo un comportamiento similar al de la viscosidad, debido a que mejoró con el uso de acetona, obteniéndose valores cercanos a 50 cumpliendo con lo establecido en la norma respectiva para diésel N°2. Con lo que se concluye que el biocombustible es apto para el uso en motores a diésel.
5. En el análisis de esterificación del biodiésel se tuvieron valores representativos del éster metílico del aceite de piñón (39,88 %) y del éster metílico del aceite linoleico (32,72 %), lo

que indica una correcta formación de ésteres.

6. Con la transesterificación a condiciones subcríticas se obtiene 95,95 % de rendimiento, siendo mayor a los rendimientos obtenidos en otro estudio (76,40 % y 90 %) para transesterificación catalítica y supercrítica de aceite de piñón respectivamente.

7. En este método se eliminó la etapa de lavado, debido a la ausencia de catalizador, disminuyendo el tiempo de purificación del biodiésel de dos (2) horas a una (1) hora.

8. El tiempo de reacción de la transesterificación subcrítica fue de 60 minutos, siendo mucho menor a tiempos encontrados en la literatura para métodos convencionales (2 - 48 horas), ahorrando así costos energéticos.

AGRADECIMIENTOS

A la Escuela Politécnica Nacional y al Departamento de Ingeniería Química que auspició este trabajo por medio del proyecto EPN-PII-DIQ-03-2016.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

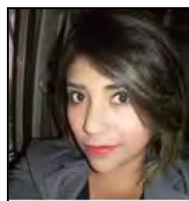
- [1] American Society for Testing Material ASTM. (2008). ASTM establece normas para biodiesel. Obtenido de http://www.astm.org/SNEWS/SPANISH/SPJF09/nelson_spjf09.html. (Junio, 2015)
- [2] Animescu, G., Deshpande, A., Rice, P. y Tavlarides, L. (2010). Supercritical biodiesel production and power cogeneration: technical and economic feasibilities. *Bioresource Technology*, 101 (6), 1 834-1 843. doi:10.1016/j.biortech.2009.10.034
- [3] Arias, J. (2014). Obtención y uso del aceite de piñón (*Jatropha curcas*) para elaboración de biodiesel. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico no publicado). Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- [4] Arpel. (2007), Manual de Biocombustibles. Recuperado de https://books.google.com.ec/books?id=a2HH8c2IDUYC&pg=PA1&dq=transesterificacion&hl=es&sa=X&ei=W2RJvCT_IMy0ggSe8oK4Aw&ved=0CBwQ6AEwAA#v=onepag

e&q=transesterificacion&f=false. (Abril, 2015).

- [5] Avilez, R., Chan, J., Galaz, R., Loyola, V. y Ucan, C. (2008). *Jatropha curcas* una alternativa para la obtención de biodiesel sin afectar al sector alimentario. Recuperado de http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2012_2/Loyola_Jatropa.pdf. (Enero, 2016)
- [6] Barriga, A. (2007). Producción y uso de aceites vegetales y biodiesel en Ecuador. Recuperado de <http://www.cds.espol.edu.ec/documentos/biodiesel.pdf> (Agosto, 2016)
- [7] Cao, W., Han, H. y Zhang, D. (2012), Preparation of biodiesel from soybean oil using supercritical methanol and co-solvent. *Fuel*, 84(4), 347-351. doi:10.1016/j.fuel.2004.10.001
- [8] Guo, Y. y Leung D. (2006). Transesterification of neat and used frying oil: Optimization for biodiesel production. *Fuel processing technology*. 87 (10), 883-890. doi: org/10.1016/j.fuproc.2006.06.003
- [9] Huertas, K. y Sánchez, I. (2012). Obtención y caracterización de biodiesel a partir de aceite de *Ricinus communis*. (Higuerilla) modificadas genéticamente y cultivadas en el eje cafetero. (Proyecto de titulación previo a la obtención del título de Químico Industrial no publicado). Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda, Colombia.
- [10] INIAP. (2013). Instituto nacional de investigaciones agropecuarias. Recuperado de <http://www.agricultura.gob.ec/el-pinon-crece-en-zonas-secas-y-su-aceite-se-utiliza-para-biocombustibles-y-para-elaborar-jabones-caseros/>. (Febrero, 2015).
- [11] Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN 248 2. (2009). Biodiesel Requisitos. Recuperado de <https://law.resource.org/pub/ec/ibr/ec.nte.248.2.2009.pdf>. (Febrero, 2015).
- [12] Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. (2013). Estudio de Alternativas para aprovechamiento

Energético de Biomasa Residual del Proyecto "Piñón para Galápagos". Recuperado de <http://www.iner.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/03/K-013-Pi%C3%B1on1.pdf>.(Noviembre,2016)

- [13] Leung, D., Leung, M. y Xuan, W. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification, *Applied energy*, 87(4), 1083-1095. doi:10.106/j.apenergy.2009.10.006
- [14] Liu, X., Huayang, H., Shenlin, Z., Xianglan, P. y Yujun, W. (2008). Transesterification of soybean oil to biodiesel using CaO as a solid base catalyst. *Fuel*, 87(2), 216-221. doi:10.1016/j.fuel.2007.04.013
- [15] Parda, A. (2012). Obtención de biodiesel por transesterificación de aceites vegetales: Nuevos métodos de síntesis. Recuperado de <http://dehesa.unex.es/handle/10662/326> (Diciembre, 2015)
- [16] Torres, A. (2012). Incidencias del uso de etanol como biocombustibles en Colombia sobre el mercado de los derivados de la caña de azúcar: Una aproximación con dinámica de sistemas. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/36673/1/43630781.2014.pdf> (Junio, 2016)



Elizabeth Camacho.- Nació en Quito, Ecuador en 1989. Recibió su título de Ingeniera Química de la Escuela Politécnica Nacional en 2017. Sus campos de investigación están relacionados con el Desarrollo de Procesos para la industria de limpieza de autos y de hogar.



Lorena Jaramillo. Recibió su título de Maestría en Ingeniera Química de la Universidad de Ciencias Aplicadas Hamburgo en 2007. Adicionalmente es Magister en Ingeniería Ambiental de la Escuela Politécnica Nacional en el 2016, en donde obtuvo el título de Ingeniería Química en 2000. Actualmente, es profesora titular de Diseño de Plantas en la misma universidad y su campo de investigación se encuentra relacionado con biocombustibles y extracción de compuestos bioactivos de plantas.

Simulación Hidrodinámica por CFD para mejorar el diseño en embarcaciones

P.S. Dávila¹

G. Chávez²

J. Constante³

J. Martinez-Gómez⁴

E-mail: paul.davila@iner.gob.ec

Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER)

E-mail: javier.martinez@iner.gob.ec

Abstract

The simulation of a monocoque was performed by finite element method using ANSYS software with module FLUENT. The hydrodynamic analysis of a monocoque was simulated in static and dynamic conditions. Static analysis considered the flow of water and air at the hit of the boat's bow at resting conditions (anchored boat). While dynamic analysis considered both, the boat and a travel speed (boat at sea). It was considered wave parameters at the coasts of Santa Cruz Island, since in this area; similar vessels provide services as boat taxi.

Mainly results were: static and dynamic pressure, water height achieved by varying the flow rate and vessel, turbulence intensity, and waste convergence in the simulation. Parameters are validated through the mathematical model used in FLUENT (K-w) and substantiating the application of theoretical formulas.

As a result the static and dynamic pressure in the vessel increases proportionally with the speed of fluid currents. In both cases the pressure exerted by water is greater in the keel of the boat which should be considered to build a prototype.

Index terms— ship, hydrodynamics simulation, ANSYS, FLUENT, CFD, taxiboat.

Resumen

En este trabajo se realizó la simulación de un monocasco por medio del método de elementos finitos en el software ANSYS módulo FLUENT. Se simuló el análisis hidrodinámico de un monocasco en condiciones estáticas. El análisis estático tuvo en cuenta la corriente de agua y aire al chocar contra la proa del barco en reposo (embarcación fondeada). Para ello, se han considerado los parámetros del oleaje producido en las costas de la Isla Santa Cruz, ya que en esta zona, embarcaciones similares prestan sus servicios como lancha taxi.

Los resultados principales fueron: presión estática y dinámica, altura del agua alcanzada al variar la velocidad del caudal y de la embarcación, intensidad de la turbulencia, y residuos de convergencia en la simulación. Los parámetros del modelo matemático usado en FLUENT (K-w) son validados a través de la simulación y de forma con la aplicación de fórmulas teóricas.

Como resultado se observó que la presión estática aumenta proporcionalmente con la velocidad de las corrientes marítimas. La presión ejercida por el agua es mayor en la quilla de la embarcación lo cual debe ser tomado en cuenta al construir un prototipo

Palabras clave— embarcaciones, simulación hidrodinámica, ANSYS, FLUENT, CFD, lancha taxi.

Recibido: 29-08-2017, Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Dávila P.; Chávez G.; Constante J.; Martinez-Gómez J. (2017). "Simulación Hidrodinámica por CFD para mejorar el diseño en embarcaciones".

1. INTRODUCCIÓN

En general, al realizar el análisis y diseño de una aplicación de ingeniería, la solución se bifurca a la construcción de un prototipo y la simulación. La construcción de un prototipo, tiene como principal inconveniente el costo y el escalado de los resultados a condiciones reales. Mientras que la simulación mediante un modelamiento en software es capaz de obtener los mismos resultados con menos recursos técnicos y económicos [1-3]. Ejemplo de prototipado y simulación los encontramos por ejemplo en Roettger, et al. [4] donde se estudió el efecto de la contaminación mediante adhesión de partículas sólidas. Por otro lado Wu y Cui [5] realizaron una investigación en piscinas de agua con un barco carguero a escala, para ver su comportamiento frente al oleaje.

En la actualidad existe poca información referente al análisis y diseño naval con la aplicación de dinámica de fluidos. Es por esto, que muchos submodelos permanecen heurísticos y no representan la base de un diseño eficiente de distintos modelos en barcos. Por ello es de especial interés trabajar con software que se puedan acercar lo máximo posible a las condiciones de operación como el modelo K- ω SST de FLUENT. El modelo de simulación Standard k- ω , el mismo que relaciona la energía cinética "k" del sistema y la frecuencia de un flujo turbulento " ω ". Este modelo predice la transición que se genera con el fluido en las paredes de la embarcación. Utiliza la hipótesis de difusión gradiente de velocidades al relacionar el número de Reynolds y de la viscosidad turbulenta. Su principal ventaja radica en que identifica el mallado de la capa fronteriza a la embarcación para realizar un análisis más detallado y maneja una capa límite compleja bajo gradientes de presión. Como principal desventaja requiere que la resolución de malla cerca de la pared sea ingresada manualmente hasta llegar a la convergencia del problema [6]. Estudios sobre la materia fueron realizados por Singh et al. [7] para el diseño de los vehículos utilitarios deportivos a través de una reducción de la fricción. Mientras que Kumar [8] estudió la influencia de un estabilizador en popa para analizar la estabilidad de un casco.

En esta investigación se analiza el comportamiento de un casco de un barco en condiciones reales. De esta manera se puede corregir la geometría del casco y los perfiles que lo conforman. La simulación toma en cuenta parámetros de velocidad de viento y marea, para el casco que se encuentre fondeado en costa (estático). Los resultados se validaron por los valores teóricos de presión estática y presión dinámica.

2. METODOLOGÍA

La simulación pretende emular las condiciones reales de

funcionamiento del casco para analizar las características hidrodinámicas y la turbulencia en condiciones de operación. La simulación ha sido realizada por (CFD) con el método de elementos finitos (FEM). SolidWorks se ha aplicado para el diseño del modelo. Mientras que la geometría del modelo, discretización del problema, solución y post-procesamiento se llevó a cabo en el módulo FLUENT de ANSYS.

Para realizar la simulación por FEM es necesario realizar una secuencia de pasos, en donde se definen y restringen las condiciones de la simulación. A continuación se describen cada una de estas actividades, tomando en cuenta la secuencia y los parámetros análisis tomados para cada caso.

2.1 Proyección de la Geometría o Equipo Experimental

La geometría de la embarcación debe comprobar que la misma se encuentre segura frente al oleaje en la orilla y en el trayecto sobre aguas profundas. La propulsión deberá garantizar la velocidad de operación de al menos el 7 nudos (13 km / h). La geometría del casco de la embarcación se proyectó de acuerdo con las dimensiones de una lancha tipo [9], cuyas principales dimensiones se observan en la tabla 1:

Tabla 1: Dimensiones embarcación simulada

Descripción	Unidades	Dimensión
Eslora total	m	7,50
Manga	m	1,80
Puntal	m	0,9
Tonelaje de registro bruto (TRB)	T.M.	2,59
Tonelaje de registro bruto (TRN)	T.M.	0,78

Se realizó el modelamiento de las curvas principales del casco teniendo en cuenta criterios navales como: fuerza de sustentación, flotabilidad y estabilidad. Para ello se tuvo en cuenta embarcaciones que trabajan en las costas de Ecuador [10] [11]. Se obtuvo como resultado las siguientes líneas de forma del casco, representadas en la Fig. 1 a)-c), y la geometría proyectada en d).

Este modelo fue realizado usando las herramientas de modelado de piezas en 3D por Solidworks y compatibilidad con el programa ANSYS.

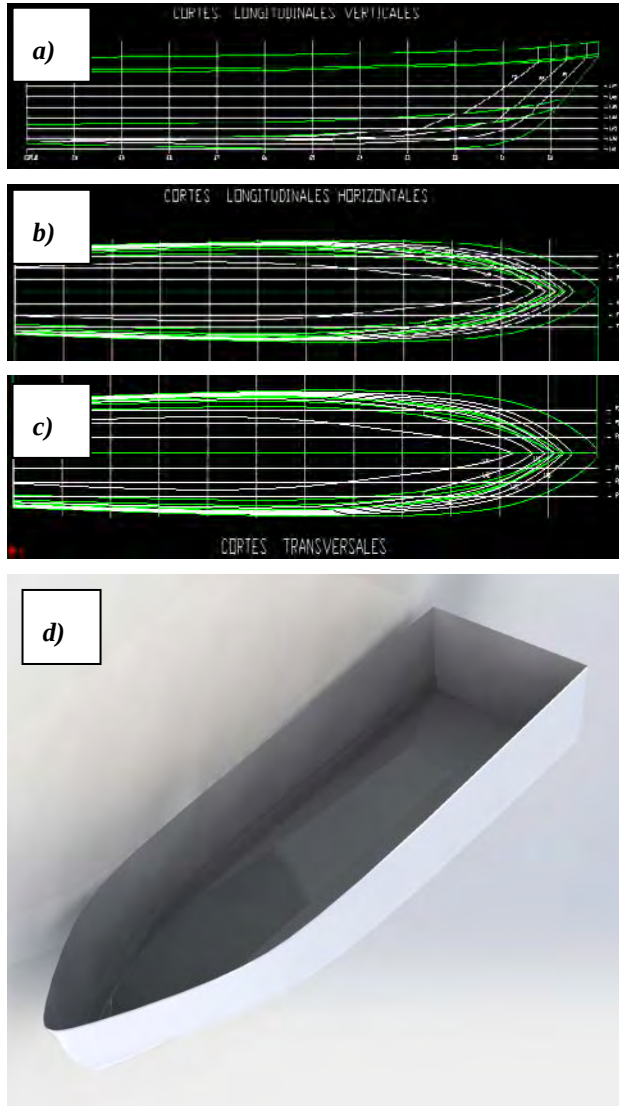


Figura 1: Geometría del casco en Solidworks. a) Cortes Longitudinales verticales b) Cortes longitudinales horizontales c) Cortes transversales d) Geometría del casco en Solidworks.

2.2 Modelo Matemático

La energía cinética de turbulencia, k , y la tasa de disipación específica, ω , se obtienen a partir de las ecuaciones de transporte (1) y (2) [12]:

$$\frac{d}{dt}(\rho k) + \frac{d}{dx_i}(\rho k u_i) = \frac{d}{dx_i} \left(\Gamma_k \frac{dk}{dx_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}(\rho \omega) + \frac{d}{dx_i}(\rho \omega u_i) = \frac{d}{dx_i} \left(\Gamma_\omega \frac{d\omega}{dx_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + S_\omega \quad (2)$$

Dónde ρ es la densidad del fluido; G_k y G_ω representa la generación la energía cinética de turbulencia generada por los gradientes de velocidad en las diferentes secciones de análisis de la embarcación; Γ_k y Γ_ω

representan la difusividad efectiva de k y ω , respectivamente; Y_k y Y_ω representan la disipación de k y ω debido a la turbulencia; S_k y S_ω son términos que son definidos por ANSYS para cada modelo de análisis, y se refieren al mallado definido y la magnitud de la vorticidad.

La difusividad efectiva para el modelo k y ω , cuyo valor define la intensidad de turbulencia generada, está dada por las ecuaciones (3) y (4):

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (3)$$

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (4)$$

Dónde σ_k y σ_ω son los números de Prandtl en turbulencia para k y ω , respectivamente. La viscosidad de turbulencia, μ_t , se halla como combinación de k y ω ; como se muestra a continuación (5):

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (5)$$

El coeficiente α^* suaviza la viscosidad en turbulencias, aceptando un número de corrección bajo de Reynolds. Está definida por la ecuación (6):

$$\alpha^* = \alpha^*_{\infty} \left(\frac{\alpha^*_0 + \frac{R_{e_t}}{R_k}}{1 + \frac{R_{e_t}}{R_k}} \right) \quad (6)$$

Dónde

$$R_{e_t} = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (7)$$

$$R_k = 6 \quad (8)$$

$$\alpha^*_0 = \frac{\beta_i}{3} \quad (9)$$

$$\beta_i = 0,072 \quad (10)$$

Cabe recalcar que para un flujo turbulento en el modelo

$$k - \omega, \quad \alpha^* = \alpha^*_{\infty} = 1$$

2.3 Condiciones de oleaje y condiciones de frontera

Para el caso estático la velocidad de la embarcación es cero y la corriente toma una velocidad constante de 4 a 8 nudos (2,06 a 4,12 m/s).

2.4 Condiciones del oleaje

Para este caso de estudio se introduce los parámetros de

oleaje y las alturas de las olas en la Isla Santa Cruz en Galápagos, tomando en cuenta que embarcaciones similares, trabajan en las islas Galápagos; se obtuvieron los siguientes datos promedio para 2 días de cada semana para 3 meses [12] (ver Tabla 2).

Tabla 2: Promedio de altura en oleaje en la isla: Santa Cruz [12]

Mes	Altura [m]
Septiembre	1,067
Octubre	1,011
Noviembre	1,002
Promedio Total	1,0272

2.5 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera para resolver el problema fueron las siguientes:

- **Sub-modelo de análisis:** flujo en canal abierto; es decir que la simulación emula un conducto en el cual el agua, fluye con una superficie libre, como es el caso de mar abierto.
- **Tipo de flujo:** turbulento (#Reynolds mayor a 10000).
- **Marco de referencia para el movimiento:** Eje Z; pues corresponde al eje axial del movimiento.
- **Modo de resistencia:** velocidad relativa; este parámetro toma en cuenta las direcciones contrarias de la corriente y la embarcación.
- **Condiciones del barco:**
 - **Pared:** móvil: este parámetro emula que la embarcación se puede trasladar.
 - **Análisis:** traslacional; este parámetro emula el movimiento traslacional del barco.
 - **Esfuerzo cortante:** sin deslizamiento es decir en este tipo de análisis no se obtienen resultados de deformación; se analiza este tipo de esfuerzo en cada nodo,
- **Método especificado de análisis:** Relación de intensidad y viscosidad; este parámetro se refiere a que la simulación analizará en relación de variación de la

intensidad de turbulencia la viscosidad del fluido en cada punto.

- **Radio de viscosidad de turbulencia:** 2 mm; valor mínimo para los remolinos formados en las zonas donde se genere turbulencia.
- **Nivel de superficie libre:** 0 m; corresponde al nivel de interacción entre los dos fluidos (aire – agua)
- **Referencia de dirección de las olas:** normal al límite; este parámetro quiere decir que la cresta de las olas se generarán de forma perpendicular al avance de la corriente.
- **Número de olas:** 2; es el número definido de olas para la simulación, sin embargo cabe recalcar que este oleaje se repite de forma cíclica y depende del número de iteraciones que se definan en la simulación.

2.6 Mallado

Para realizar el mallado de la geometría proyectada, previamente se debe importar el modelo del casco de la embarcación al software que realice el proceso de MEF, en este caso ANSYS.

La aplicación de la malla se realiza en toda la geometría compuesta por el volumen de agua, aire y la embarcación como se muestra en la Fig. 2.

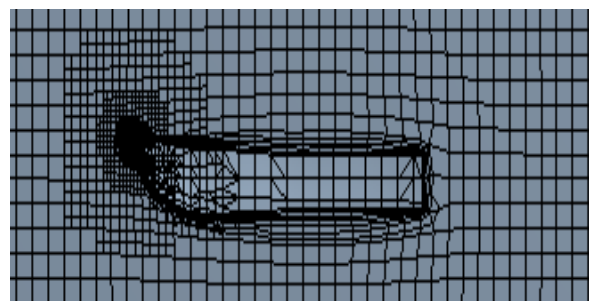


Figura 2: Mallado obtenido en el contorno de la geometría, mallado más fino en proa debido a mayor complejidad de la geometría en esta zona.

La herramienta de mallado utilizada fue Assembly Meshing Cut Cell Hex Dominat Algorithm [11] y High Smoothing. Se definió un mallado con las siguientes características se presentan en la tabla 3. Se observa que en proa se define un tamaño más fino, debido a que en la punta de la proa de la embarcación la geometría es más compleja que en el resto de la embarcación y por lo tanto el software divide este espacio en celdas más pequeñas.

Para resolver las ecuaciones utilizadas en el modelo matemático, fue construida una malla rectangular libre con la resolución extra-fino para asegurar la convergencia del modelo.

Tabla 3: Dimensiones embarcación simulada

Propiedad	Descripción
Tamaño máximo del elemento	0.4050 m
Tamaño mínimo del elemento	5.06 e -0.002 m
Radio de transición	0.272 m
Taza de crecimiento de la celda	1.2
Método de ensamble	Cutcell
Número de nodos	303607
Número de elementos	251297

La simulación se la realizó en el Módulo Fluent de ANSYS, en una computadora con un procesador con 750 GB de Memoria interna y 4 G B de RAM, procesador i7. El proceso tuvo convergencia en un promedio de 300 iteraciones con 180 pasos, es decir 54000 movimientos en total. El ciclo se completa con 10 horas de trabajo ininterrumpidas aproximadamente.

3. VALIDACIÓN DE RESULTADOS

Los parámetros que se han tomado para validar la simulación son la presión estática y dinámica ya que constituyen las variables fundamentales para considerar los demás parámetros validados.

Los valores obtenidos del análisis fluidodinámico por medio de la simulación fueron comprobados mediante el uso de ecuaciones teóricas: altura (para presión estática) y velocidad (para presión dinámica).

3.1 Presión Estática

La simulación estática, fue realizada mediante la condición de borde "Velocity Inlet". Los parámetros establecidos en esta condición de borde, permiten darle velocidad de traslación a los dos fluidos que intervienen en la simulación (agua y aire). Con el objetivo de validar los valores de presión estática obtenidos en la simulación, se procede a en contrar los datos de la presión estática, para esto se ha usado la siguiente ecuación [14]:

$$P_{estat} = \rho_{Liq} * g * h_{sum} \quad (11)$$

Dónde:

P_{estat} :- es la presión estática calculada

ρ_{liq} :- densidad del líquido,

h_{sum} :- altura de inmersión del casco

En este punto cabe destacar que la altura de inmersión

del barco va a variar a razón del paso de las olas (Fig. 3). En el caso de análisis estático esta altura de inmersión siempre debe permanecer por debajo del nivel de calado definido, que en el caso del presente proyecto es 0,5 m. Además debe mantenerse bajo el valor del puntal de la embarcación de 0,9 m.

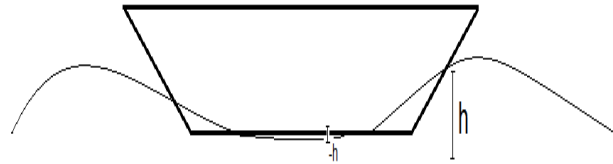


Figura 3: Descripción de la altura para Presión estática

3.2 Presión Dinámica

La inercia del movimiento del barco produce un incremento adicional de la presión estática al chocar sobre un área perpendicular al movimiento. Esta fuerza se produce por la acción de la presión conocida como dinámica [15]. La presión dinámica depende de la velocidad y la densidad del fluido, cuya fórmula de cálculo es la siguiente:

$$P = \frac{1}{2} \rho_{fluido} * v_{fluido}^2 \quad (12)$$

Dónde:

P = Presión Dinámica

ρ_{fluido} = densidad del agua

v_{fluido} = velocidad de la corriente de agua

Para poder validar los cálculos arrojados por la simulación en ANSYS, se procede de la misma manera que en el caso estático a realizar los cálculos de forma manual. Se tomará como valor inicial la presión "simulada" y como valor comprobatorio resultante la velocidad de simulación.

4. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados cuando la embarcación permanece estática, y corrientes marítimas se dirigen hacia ella con velocidad entre 4 a 8 nudos.

Los resultados de presión estática, presión dinámica, número de Reynolds, intensidad de turbulencia, altura del agua alcanzada, esfuerzos en los diferentes ejes, se presentan en la tabla 4. Se puede apreciar que los valores de la presión aumentan de forma proporcional con la velocidad alcanzando un valor máximo de 5,96 Mpa a 8 nudos de velocidad en la corriente.

Tabla 4: Resultados del análisis estático en relación con presión estática, presión dinámica, número de Reynolds, intensidad de turbulencia, altura del agua alcanzada durante la simulación, esfuerzos en los diferentes ejes y residuos de convergencia.

Vel. Corr. (m/s)	P. Est. (Pa)	P. Din. (Pa)	# R Reynolds	Turb. %	Altura m	Esf. Y (Pa)	Esf. Z (Pa)
2,06	2039,32	1524,12	6,83e5	32,30	0,1	0,19	0,04
3,09	1134,56	3031,11	9,20e5	25,70	0,12	0,14	0,05
3,60	1515,42	4419,08	7,53e5	21,70	0,14	0,24	0,09
4,12	1630,24	5968,40	857033,4	19	0,50	0,39	0,12

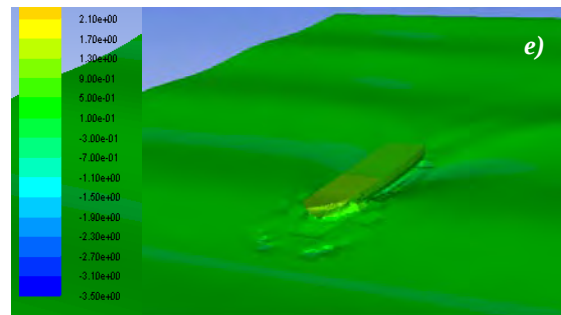
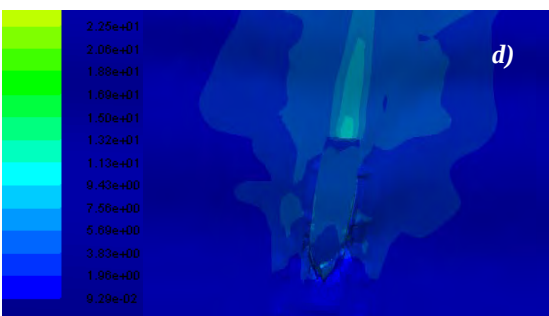
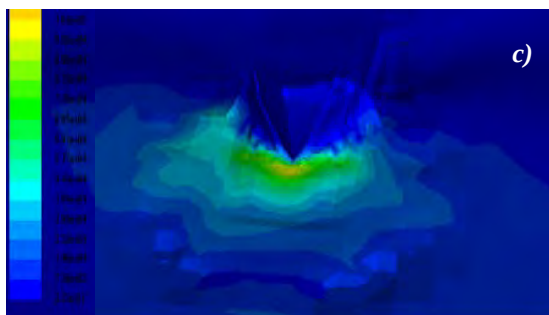
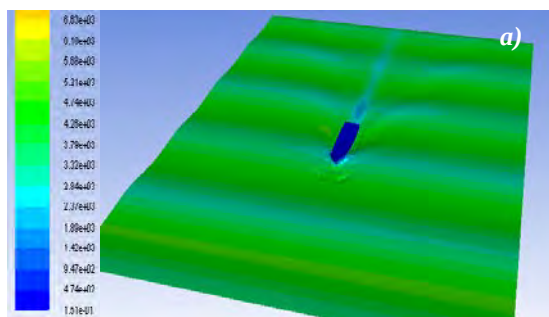


Figura 4: Resultados del Análisis Estático a) Presión Estática b) Presión Dinámica c) Número de Reynolds d) Turbulencia de flujo e) Altura del agua alcanzada en la simulación

Para la Fig. 4 se tomó como valor referencial una velocidad de 7 nudos (3,6 m/s) de la embarcación, pues se considera una velocidad de traslación real para el transporte de carga y/o pasajeros.[9]. A medida que incrementa la velocidad de la corriente marítima de 4 a 8 nudos (2.06 a 4.12 m/s) los valores de presión estática y dinámica alcanzan un valor máximo de 1,63 y 5,96 MPa, respectivamente. Estos valores se alcanzan en la quilla de la embarcación.

Los resultados de número de Reynolds en área de contacto fluido-casco y la turbulencia del flujo generada como resultado del movimiento de las corrientes marítimas. En la simulación se obtiene un número de Reynolds 857.000 en la proa del barco, que es la zona donde se genera la mayor turbulencia del fluido. Esto se debe a la geometría frontal del barco que permite la rotura de las olas cuando la corriente choca con él. Se observa que al incrementar la velocidad de la corriente la intensidad de turbulencia disminuye en un 42%.

La altura del agua con respecto del extremo inferior del puntal, aumenta al incrementar la velocidad del fluido hasta 0,5 m para 8 nudos. Este valor es alcanzado en la proa de la embarcación.

5. RESULTADOS DE VALIDACIÓN

5.1 Presión Estática

Los resultados obtenidos para la validación de datos en el análisis estático son la presión estática y la altura del agua obtenida en simulación, y por medio de cálculo matemático, estos datos se muestran en la tabla 8. Los valores de la presión estática “calculada” y “simulada” concuerdan. Se obtuvo un error máximo de 5,77%. Se tomó como referencia la altura del agua alcanzada y la velocidad de simulación de la embarcación; por lo tanto estos resultados son validados.

Tabla 5. Validación de datos presión estática en caso estático.

Velocidad de fluido en Simulación (m/s)	Presión Estática en Simulación (Pa)	Presión Estática Calculada (Pa)	Altura del agua en Simulación (m)	Altura del agua Calculada (m)
2,06	1039,32	979,23	0,10	0,11
3,09	1134,86	1175,08	0,12	0,12
3,6	1515,42	1468,85	0,14	0,15
4,12	1630,24	1566,77	0,16	0,17

5.2 Presión Dinámica

Los resultados de presión dinámica en caso estático, en cuanto a los resultados de presión dinámica calculada y en simulación y velocidad de fluido en simulación y calculada se muestran en la Tabla 9. Como se expone en el punto 2.6.2 para la validación del caso dinámico se parte de los valores de la presión y se comprueba que los valores de velocidad mediante simulación y cálculo matemático sean similares. Se obtuvo que una diferencia en valores máxima de 0,6 m/s, por lo tanto se consideran datos validados.

Tabla 6: Resultados de presión dinámica en caso dinámico

Presión dinámica Calculada (Pa)	Presión dinámica en Simulación (Pa)	Velocidad de fluido en Simulación (m/s)	Velocidad de fluido Calculada (m/s)
1528,49	1548,12	2,06	1,76
3119,37	3031,11	3,09	2,46
4491,90	4419,08	3,60	2,98
6113,97	5968,40	4,12	3,46

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este trabajo realiza la simulación de una embarcación monocasco bajo condiciones reales de operación. La verificación de los resultados se ha realizado por fórmulas teóricas. La implicación de este trabajo se basa precisamente en obtener valores reales del funcionamiento de una lancha de eslora 7,5 metros; cuyos resultados sirven para un diseño posterior.

Los esfuerzos se distribuyen de tal manera que la quilla se convierte en la columna soporte de toda la embarcación. Además estos valores permiten definir que la resistencia mínima del material del casco será de 0,005 N en un área mínima de aplicación de 1 cm².

La mayor intensidad de turbulencia se detectó en la proa, se explica en que la geometría del barco posee

forma de flecha en proa y prismática en popa. En [7] se observa que se obtienen valores de intensidad de turbulencia similares para el caso de análisis del perfil aerodinámico de un auto, esta promedia un 25%, lo que señala que en agua se incrementa este parámetro.

Esta investigación ayuda a la bibliografía del estudio de cascos de eficiencia energética en embarcaciones.

7. CONCLUSIONES

Para la simulación se utilizó el software FLUENT en ANSYS para visualizar el flujo de aire y agua alrededor de la geometría de la embarcación, fórmulas teóricas se utilizaron para la validación de los datos arrojados por el software.

La simulación dinámica converge en un valor numérico de 1E-4 con respecto a los residuos de convergencia presentados; tomando en cuenta que el caso ideal sería un 0% de error, este valor es aceptable pues corresponde a un error menor del 2% del análisis total del flujo.

Se obtuvo que la presión estática y dinámica en la embarcación aumenta proporcionalmente con la velocidad de las corrientes marítimas. Además en ambos casos la presión ejercida por el agua es mayor en la quilla de la embarcación.

El choque del agua con el casco produce que la altura de la misma aumente. Esto produce salpicaduras e ingreso de volúmenes pequeños de agua al interior la embarcación. Sin embargo la simulación muestra que estos volúmenes no representan riesgo a la tripulación ni a la embarcación.

Esta investigación puede ayudar a estudiar otro tipo de embarcaciones incluidos catamaranes o trimaranes. En estos casos se puede analizar por separado cada caso y llegar a un trabajo científico con la finalidad de clasificar parámetros energéticos y de eficiencia.

8. AGRADECIMIENTOS

Los autores de la presente investigación reconocen a la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (SENPLADES) por la financiación de la ejecución de la presente investigación. Este trabajo fue patrocinado por el proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT), celebrada en la República de Ecuador. La información necesaria para completar este trabajo fue dada por el Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) de Ecuador.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] B. Anderson, A., & Coughlan, "Liquid film flows over solid surfaces," Anderson, A., Coughlan, B., vol. One, pp. 368–379, 2006.
- [2] P. P. J. P. Bouchet, P. Delpech, "Wind tunnel simulation of road vehicle in driving rain of variable intensity," 5th MIRA Int. Conf. Veh. Aerodyn., vol. One, p. 8.
- [3] K. P. D. Thesis, Experimentelle und numerische Untersuchung der aerodynamischen. Ulrich: , Technical University Karlsruhe, 2004.
- [4] Stef, An, Roettger, †, Martin, Schulz, ‡, Wolf, and Bartelheimer, "Automotive Soiling Simulation Based On Massive Particle Tracing," EG/IEEE TCIVG Symp. Vis., vol. VisSym., pp. 309–317, 2001.
- [5] W.-C. C. Y-S Wu, "Advances in the three-dimensional hydroelasticity of ships," China Sh. Sci. Res. Cent., vol. One, p. 10, 2010.
- [6] C. G. S. Gómez., "EVALUACIÓN DE UN MODELO SIMPLIFICADO DE HÉLICE PARA SIMULACIONES NUMÉRICAS CON ANSYS FLUENT.," 2014.
- [7] S. Singh, M. Zunaid, N. A. Ansari, S. Bahirani, S. Dhall, and S. Kumar, "Numerical Study of the Generic Sports Utility Vehicle Design with a Drag Reduction Add-On Device," vol. 2014, 2014.
- [8] S. K. Yarrarapu, "Significance of Skeg in Course Stability using Computational Fluid Dynamics," vol. 4, no. 07, pp. 6–9, 2015.
- [9] S. de P. y T. M. y Fluvial, "Certificado de arqueo avaluo y clasificación, Lancha de servicio." Puerto Ayora, p. 1, 2014.
- [10] "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, Third Edition - Richard H. "
- [11] J. B. I. CASADEMONT, "Estudio hidrodinámico por cfd del casco de una lancha motora," vol. 1, pp. 1–106, 2014.
- [12] "ANSYS Fluent, Release 12.1."
- [13] INOCAR, "Tabla de mareas," 2015. [Online]. Available: <http://www.inocar.mil.ec/web/index.php/tabla-de-mareas>.
- [14] César de Paz, "Presión Hidrostatica," 2011.

[Online].

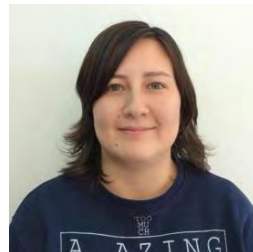
Available: <http://www.fullquimica.com/2011/04/presion-hidrostatica.html>.

- [15] ANSYS, "Presión Hidrodinámica," 2015. [Online]. Available: <http://aerojet.engr.ucdavis.edu/fluenthelp/html/ug/node229.htm>.

**Paúl Sebastián Dávila**

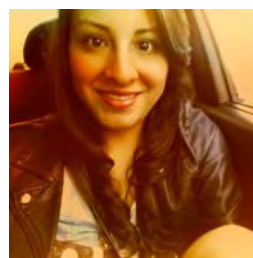
Aldás.- Nació en la ciudad de Ambato en 1988. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica del Ejército en 2012; de Máster en Diseño, Producción y Automatización de la Escuela

Politécnica Nacional en la ciudad de Quito en el año 2015. Actualmente se desempeña como analista técnico en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, además de prestar sus servicios como docente en la Escuela Politécnica Nacional. Sus tesis de grado están relacionadas con el Diseño de máquinas y aeromodelismo, experiencia profesional en servicios petroleros, modelación y simulación de máquinas y sistemas mecánicos, estructuras metálicas y sistemas de gestión de calidad.

Gabriela Chávez

Ha recibido su título de Ingeniería Mecatrónica en 2016 por la Universidad Tecnológica Equinoccial. En la actualidad es Analista Técnico del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables desde

mayo de 2016.

**Jessica Constante**

Ha recibido su título de Ingeniería Mecatrónica en 2014 por la Universidad Tecnológica Equinoccial. En la actualidad es Analista Técnico del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energía Renovable desde

mayo de 2013.



Javier Martínez Gómez.-

Nació en Madrid, España en 1983. Ha recibido su título de Ingeniero Industrial de la Universidad Carlos III de Madrid en 2008; de Máster en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid en 2010;

y su título de Doctor en Ciencia de la Ingeniería de Materiales de la Universidad Carlos III de Madrid en 2013, Sus campos de investigación están relacionados con Menaje para cocinas para inducción y materiales para paredes en reactores de Fusión. Actualmente trabaja como Investigador Postdoc Prometeo del proyecto “Estudio Sobre el Menaje para cocinas de Inducción Eléctrica y requerimientos de la red para incorporación Masiva de Cocción Eficiente” en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, INER.

Recommendation of Metaheuristic Algorithms for the Resolution of the Vehicle Routing Problem (VRP)

Recomendación de Algoritmos Metaheurísticos para la Resolución del Vehicle Routing Problem (VRP)

J.D. Sierra¹ R.P. Quintana² H.G. Acurio³

^{1,2,3} Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER)

E-mail: jenny.sierra@iner.gob.ec; paola.quintana@iner.gob.ec; henry.acurio@iner.gob.ec

Abstract

In the present work we recommend metaheuristic algorithms for the resolution of Vehicle Routing Problem (VRP), a classic problem of combinatorial optimization widely studied, which seeks to find optimal routes in urban and interurban logistics.

The recommendations were based on a review and analysis of scientific literature of approximate algorithms including local search algorithms, ant colony optimization, genetic algorithms, simulated annealing and taboo search. The algorithms studied are high level master procedures that are based on the modification of other heuristic models in order to find additional solutions to the local optimum.

As a result of the research, the procedures based on pure genetic algorithms were determined and neural networks were overbear, while those based on simulated or deterministic annealing and on ant systems are not very competitive. Furthermore, the Taboo search emerges as the most effective approach; subsequently the best of these methods can find excellent and sometimes optimal solutions to cases with few hundred clients, but with significant costs in computational time.

Resumen

El presente trabajo recomienda algoritmos metaheurísticos para la resolución del *Vehicle Routing Problem (VRP)*, problema clásico de optimización combinatoria ampliamente estudiado, que busca encontrar rutas óptimas en la logística urbana e interurbana.

Las recomendaciones se basaron en una revisión y análisis de literatura científica de algoritmos aproximados entre los que se encuentran algoritmos de búsqueda local, optimización de colonia de hormigas, algoritmos genéticos, recocido simulado y búsqueda tabú.

Los algoritmos estudiados son procedimientos maestros de alto nivel que se basan en la modificación de otras heurísticas con el fin de encontrar soluciones adicionales al óptimo local.

Como resultado de la investigación se ha determinado que los procedimientos basados en algoritmos genéticos puros y en redes neuronales son claramente superados, mientras los basados en recocido simulado o determinístico y en sistemas de hormigas no son muy competitivos. Además, la búsqueda Tabú emerge como el enfoque más efectivo, ya que el mejor de estos métodos puede encontrar excelentes y a veces óptimas soluciones a casos con pocos cientos de clientes, aunque con costos significantes en tiempo computacional.

Index terms— Algorithms, metaheuristic, TSP, VRP

Palabras clave— Algoritmos; Metaheurísticos; TSP; VRP.

Recibido: Colocar fecha de envío (Ej: 15-07-2016), Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial
Forma sugerida de citación: Colocar Primer Apellido y la inicial del nombre de todos los autores Ej: Peterchev, A.; Handel, G. (2017). Nombre del trabajo técnico entre comillas. El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

1. INTRODUCCIÓN

El problema de enrutamiento o ruteo de vehículos (VRP, *Vehicle Routing Problem*) es un problema clásico de optimización combinatoria. El objetivo del mismo implica determinar las rutas óptimas (costo mínimo) de una flota de vehículos que deben iniciar y terminar su recorrido en un nodo central conocido como depósito, con el fin de satisfacer la demanda de cada uno de los nodos conocidos como clientes y que se encuentran ubicados dispersamente sobre una red. Los algoritmos de resolución de VRP se derivan del Problema del Agente Viajero (TSP, *Traveling Salesman Problem*) cuyas primeras publicaciones fueron en 1959.

Para la solución del VRP se pueden optar por diferentes enfoques, dentro de los que se tienen algoritmos completos (exactos), que manejan una búsqueda sistemática con programación lineal entera y programación de restricciones de dominio finito; y los algoritmos aproximados, con enfoques de solución próxima, se tienen los heurísticos y aproximaciones en tiempo polinomial para problemas NP-Hard.

Se debe considerar las diferentes características o variantes que presenta cada problema, como demanda, capacidad de los vehículos, depósitos, restricciones operativas de rutas, horarios, etc. Para lo cual se han desarrollado diferentes métodos de resolución para este tipo de problemas, como los que se mencionan a continuación:

Los principales algoritmos exactos son:

- Ramificación y acotamiento (Branch and Bound)
- Partición de conjuntos – Generación de columnas

Los principales algoritmos de aproximación son:

- Heurísticos
 - o Ahorro de tiempo
 - o Inserción
- Metaheurísticos
 - o Algoritmo evolutivo
 - o Optimización de la colonia de hormigas
 - o Búsqueda local iterada
 - o Recocido simulado
 - o Búsqueda Tabú

El presente artículo recomienda algoritmos metaheurísticos para la resolución del VRP tomando como base la literatura científica existente.

2. ASPECTOS TEÓRICOS

2.1. Algoritmos Heurísticos.

Los algoritmos heurísticos son procedimientos que

realizan una exploración limitada del espacio de búsqueda y que a menudo pueden encontrar soluciones factibles y aceptables de buena calidad, muy cercanas al óptimo y en tiempos de ejecución moderados (razonablemente rápidos). Generalmente las soluciones alcanzadas con este tipo de métodos pueden ser mejoradas con métodos más sofisticados que usualmente llevan tiempos de ejecución mucho más elevados.

La mayoría de problemas relacionados al VRP se resuelven usando heurísticas, midiendo velocidad y capacidad de manejar varias instancias con una función objetivo que tiene dos prioridades: minimizar el número de vehículos usados y minimizar el costo de los arcos atravesados, en contraste con métodos exactos que no consideran la cantidad de vehículos dentro de su función objetivo.

2.2. Algoritmos Metaheurísticos.

Los algoritmos metaheurísticos son procedimientos maestros de alto nivel que se basa en la modificación de otras heurísticas con el fin de encontrar soluciones adicionales al óptimo local [1]. Por tanto este método heurístico es usado para resolver problemas generales de cierto grado de complejidad computacional, considerando parámetros preestablecidos, de una manera que se espera que sea eficiente. El nombre combina el prefijo griego "meta" ("más allá", o de "nivel superior") y "heurístico" ("encontrar").

Generalmente, estos métodos se aplican a problemas que no tienen un algoritmo o heurística específica que dé una solución satisfactoria, o cuando no es posible implementar dicho método óptimo. Con el uso de algoritmos metaheurísticos se obtienen mejores resultados pero se incurren en tiempos de ejecución mayores.

Actualmente, las metaheurísticas más avanzadas utilizan la experiencia de búsqueda (representada en alguna forma de memoria) para guiar la búsqueda.

Los algoritmos metaheurísticos contienen una subclasificación: Búsqueda local básica (mejora iterativa), recocido simulado, búsqueda Tabú y métodos de búsqueda explorativos (Greedy Randomized Adaptive Search procedure (GRASP), Variable Neighborhood Search (VNS), Guided Local Search (GLS), Iterated Local Search (ILS)).

2.3. Comparación entre algoritmos heurísticos y metaheurísticos.

Por lo general al no ser algoritmos específicos para cada problema, los metaheurísticos son complejos y más difíciles de comprender que los algoritmos heurísticos que son mucho más simples de entender y aplicar,

concluyendo que son algoritmos que tienen mejor rendimiento.

esa solución, es decir, explora una vecindad de posibles soluciones.

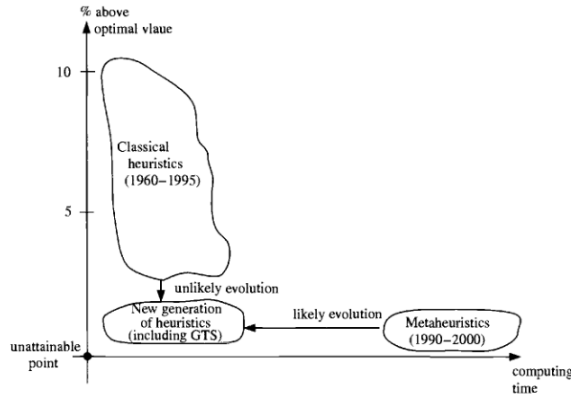


Figura 1. Evolución de heurísticas para el VPR [2].

Las resoluciones metaheurísticas son bastante lentas, pero proveen mejores soluciones que una heurística clásica. Los métodos clásicos producen valores de rendimiento del algoritmo entre 2% y 10% por sobre el óptimo, mientras tanto que para la implementación de metaheurísticas es a menudo menor del 0.5%.

3. DESARROLLO

En este apartado se muestra la revisión e investigación de literatura científica referente a algoritmos metaheurísticos para la resolución de problemas de enrutamiento vehicular (VRP), para modelos de optimización del consumo energético asociado con el transporte de carga pesada.



Figura 2. Algoritmos Metaheurísticos.

3.1. Algoritmos de Búsqueda Local (Local Search, LS)

Una búsqueda local consiste en la búsqueda iterativa de buenas soluciones, cambiando la solución actual conocida. Por lo general estos cambios de solución son relativamente cercanos entre sí. El conjunto de soluciones que se pueden obtener aplicando un solo movimiento a una solución dada se llama vecindad de

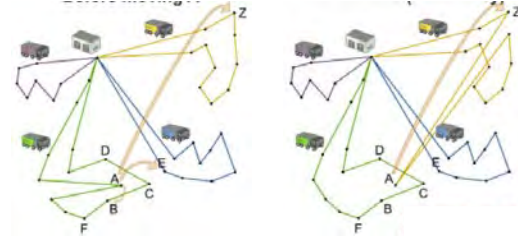


Figura 3. Ruta intra-operadores [3]

Dependiendo de la forma en que se representa la solución, se pueden definir diferentes tipos de movimientos o búsqueda. Por tanto en cada iteración se hace una corrección de la solución actual por una solución de su vecindario.

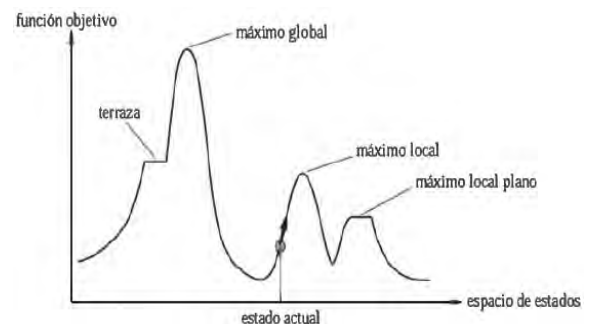


Figura 4. Búsqueda Local y mínimo global [4]

3.2. Optimización de colonia de hormigas (Ant Colony Optimization, ACO)

Es un algoritmo que se fundamenta en el método utilizado por una colonia de hormigas para conseguir alimentos, por tanto, cada hormiga construye un solución basándose en un criterio ávido que le indica qué tan bueno parece ser tomar cierta decisión (moverse de i a j) (visibilidad: $\eta_{ij} = 1/c_{ij}$, preferencia heurística del arco, depende del caso concreto del problema, las hormigas no la modifican durante la ejecución del algoritmo, ej: arco con menor peso) y la información histórica (feromona: compuesto químico de comunicación), que le indica a la hormiga qué tan bueno fue tomar dicha decisión (elegir el próximo nodo o ciudad a visitar).

La feromona es depositada en el piso, de tal forma que la probabilidad de que otras hormigas sigan el camino incrementa con el número de hormigas que anteriormente siguieron dicho camino, esto permite que se tengan caminos cortos con acumulación de feromona más que otros caminos. La feromona representa la memoria del sistema y está relacionada con la presencia

del elemento en las buenas soluciones previamente construidas por las hormigas.

En cada iteración t se asocia a una cantidad de feromona $\tau_{ij}(t)$ (información memorística, medida de la “deseabilidad” del arco) a cada arco (i, j) , cada hormiga construye una solución seleccionando nodos de acuerdo a una regla probabilística:

$$P_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{h \in \Omega} [\tau_{ih}(t)]^\alpha [\eta_{ih}]^\beta} & \text{si } j \in \Omega \\ 0 & \text{si } j \notin \Omega \end{cases} \quad (1)$$

Siendo Ω el conjunto de nodos aún no visitados, y α , β es la importancia relativa de la feromona y visibilidad. Cuando todas las hormigas han construido una solución se actualiza la feromona en cada arco (i, j) , con la regla:

$$\tau_{ij}(t+1) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad (2)$$

$$\text{Donde, } \Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^M \Delta \tau_{ij}^k \quad (3)$$

$\Delta \tau_{ij}^k$ Es la hormona depositada por la k -ésima hormiga en dicho arco.

Si la solución encontrada por la k -ésima hormiga tiene longitud L_k y utiliza el arco (i, j) , entonces:

$\Delta \tau_{ij}^k = Q/L_k$ (Q es un parámetro del algoritmo); en otro caso $\Delta \tau_{ij}^k = 0$

El parámetro $\rho \in [0,1]$, es el coeficiente de evaporación, establece el porcentaje de feromona que permanece de una iteración a otra y surge con el objetivo principal de evitar la convergencia prematura del algoritmo.

Paso 1. (Inicialización): Colocar una hormiga en cada nodo. Hacer $t := 0$ y $\tau_{ij}(t) := \tau_0(t) \forall (i,j) \in E$.

Paso 2. (Construcción). Para cada hormiga, construir una solución de acuerdo a la regla probabilística (1).

Paso 3. (Actualización). Actualizar la feromona en cada arco según (2).

Paso 4. (Terminación). Hacer $t := t+1$. Si $t < T_{max}$, colocar una hormiga en cada nodo e ir a 2. Si no, terminar.

En el documento Ant Colony Optimization (Dorigo & Stutzle, 2004) [5], se considera una aplicación para TSP y el VRP y sus extensiones.

3.3. Algoritmos genéticos (Genetic Algorithm, GA)

Estos algoritmos pertenecen a la gama de algoritmos evolutivos, una amplia clase de metaheurísticas, que imitan la forma en que las especies evolucionan y se adaptan a su entorno, de acuerdo al principio de selección natural de Darwin; implica una técnica de búsqueda local aleatorizada.

Cada solución encontrada se codifica en un cromosoma, donde cada elemento se llama gen. El conjunto de cromosomas forman una población, que para una iteración corresponde a una generación. Cada cromosoma codifica una solución para una instancia particular. Se aplica diversos operadores, para generar nuevo individuos, que son agregados a la población, en un proceso iterativo que trata de escapar de mínimos locales (Lüer, Benavente, Bustos, & Venegas, 2009) [6].

Un algoritmo genético simple se describe a continuación:

Empezando de alguna población inicial de cromosomas generados aleatoriamente,

$$X^1 = \{x_1^1, \dots, x_N^1\},$$

En cada iteración $t = 1, \dots, T$, aplicar k veces.

Pasos 1 a 3 ($k \leq N/2$), entonces aplique el paso 4.

Paso 1. (Reproducción). Seleccione dos pares de cromosomas de X^t .

Paso 2. (Recombinación). Genere dos hijos de los dos padres cromosomas usando un operador cruzado.

Paso 3. (Mutación). Aplique una mutación a cada hijo (con una pequeña probabilidad).

Paso 4. (Reemplazo de generación). Crear X^{t+1} de X^t eliminando las $2k$ peores soluciones en X^t y reemplace en estos $2k$ nuevos hijos o descendencia.

En este algoritmo el parámetro T es el número de generaciones y k el número de selecciones por generación. La mejor solución producto de las T generaciones es el resultado final de este algoritmo.

Es importante mencionar que la literatura desarrollada referente a los algoritmos genéticos para resolver el VRP es escasa.

3.4. Recocido Simulado (Simulated Annealing Search, SA)

En general y de acuerdo a la literatura científica, la aplicación de Recocido Simulado a un problema de VRP no produce resultados competitivos comparado

con los producidos por las mejores implementaciones de búsqueda de tabú (algoritmo matemático).

Desde que Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi, introdujeron el concepto de Recocido Simulado, esta metaheurística ha demostrado ser una herramienta muy exitosa para resolver una amplia gama de problemas de optimización combinatoria. El recocido simulado es una variante de la búsqueda local que permite movimientos ascendentes para evitar quedar atrapado en un óptimo local. El nombre está basado en un algoritmo diseñado para simular el enfriamiento de material (un proceso denominado "recocido") (S. Kirkpatrick, 1983) [7].

Kirkpatrick et al. consideraron aplicar el algoritmo de Metrópolis del campo de la termodinámica estadística. Básicamente se modeló el proceso simulando iterativamente cambios energéticos en un sistema de partículas de una sustancia conforme decrece la temperatura hasta llegar a un equilibrio térmico (análogamente, se trata de encontrar un estado en el cual la energía del sistema sea mínima), utilizando la distribución de Boltzmann.

En el algoritmo de Metrópolis se genera una perturbación aleatoria o cambios en el sistema y se calculan cambios de energía resultantes basado en una búsqueda local, donde si hay una caída energética el cambio se acepta (movimiento de mejora), por el contrario, si se produce un incremento energético (movimiento de no mejora), el cambio será aceptado con una probabilidad proporcional al factor de Boltzmann. Dichas probabilidades están basadas en la analogía con el proceso de enfriamiento y se obtiene como función de la temperatura del sistema, es decir la probabilidad de que el sistema se encuentre en el estado

j es:

$$P(j) = (1/Z_t) \exp \left[-c(j)/t \right]$$

Donde $Z_t = \sum \exp \left[-c(i)/t \right]$ (suma sobre todos los elementos i de S , Factor de normalización), t es la temperatura del sistema (parámetro de control), $c(i)$ es el costo de la solución i (Δf).

El algoritmo no siempre rechaza cambios que disminuyen la función objetivo o cambios que aumentan la función objetivo según su función de probabilidad.

El proceso de RS puede ser representado como sigue:

Paso 1. Calcule aleatoriamente la siguiente posición.

Paso 2. Determine la diferencia entre la posición siguiente y la posición actual, llame a este diferente delta.

Paso 3. Si $\Delta < 0$, asignar la siguiente posición a la posición actual.

Paso 4. Si $\Delta > 0$, calcula la probabilidad de aceptar la siguiente posición aleatoria.

Paso 5. Si la probabilidad es $< e^{(-\Delta/\text{temperatura})}$, entonces asigne la siguiente posición a la posición actual.

Paso 6. Disminuir la temperatura por un factor de alfa.

Paso 7. Pase al paso 1 hasta que la temperatura no sea mayor que ϵ .

Algunos de los problemas que han sido tratados con esta técnica son: diseño de componentes electrónicos, procesamiento de imágenes, simulación física y distribución de recursos.

3.5. Búsqueda Tabú (Tabú Search, TS)

El algoritmo de búsqueda Tabú tiene como objetivo modelar el proceso de la memoria humana a través del uso de una lista Tabú, usualmente de una capacidad fija, la que representa una memoria a corto plazo que almacena una secuencia de soluciones recientemente visitadas, y se ejecuta hacia un paso superior de mejora, evitando ciclos a corto plazo. Esta búsqueda se detiene después de un número de iteraciones; en cada iteración, es seleccionada la mejor solución que está en la vecindad de la solución actual, aunque en esta búsqueda se incrementa el costo del problema a optimizar.

Las sucesivas rutas de vehículos producidas por el algoritmo pueden no ser factibles; y son conocidas como soluciones prohibidas y se denominan soluciones Tabú, esta lista Tabú usa un criterio de "Aspiración" por las cuales las soluciones no Tabú se convierten en soluciones admisibles. Su grado de abandono de la viabilidad se mide mediante una penalización en la función objeto.

El algoritmo de búsqueda Tabú está descrito a continuación:

Paso 1. Construir rutas de ida y vuelta entre el depósito y los clientes. Sea x la solución y $F(x)$ la función de costos. Conjunto de lista Tabú $T := \emptyset$.

Paso 2. Defina $N(x)$, la vecindad de x , como el

conjunto de todas las soluciones que pueden ser alcanzadas insertando un vértice arbitrario en su p-vecindario usando el procedimiento GENI (Gendreau, Hertz, & Laporte, 1994) [8]. Si $N(x) \setminus T = \emptyset$, vaya al paso 3, de lo contrario, identifique la solución de menor costo y en $N(x) \setminus T$ establezca $x := y$. Actualizar la solución más conocida.

Paso 3. Si se ha alcanzado el número máximo de iteraciones desde el inicio del proceso o desde la última actualización, vaya al paso 4. De lo contrario, actualice T y vaya al paso 2.

Paso 4. Intente mejorar cada una de las rutas del vehículo por medio de procedimientos de post-optimización, procedimiento GENI.

Este algoritmo se aplicó con éxito a muchos problemas de VRP clásicos descritos en la literatura.

Los resultados computacionales indican que la heurística propuesta puede ser una de las mejores desarrolladas para un problema de VRP.

3.6. Comparación de algoritmos Metaheurísticos.

Una encuesta de metaheurísticas para resolver el VRP, muestra que el mejor de estos métodos puede encontrar excelentes y a veces óptimas soluciones a casos con pocos cientos de clientes, aunque con costos significantes en tiempo computacional.

La búsqueda Tabú emerge como el enfoque más efectivo. Procedimientos basados en algoritmos genéticos puros y en redes neuronales son claramente superados, mientras los basados en recocido simulado o determinístico y en sistemas de hormigas no son muy competitivos.

Teniendo en cuenta las mejoras de rendimiento obtenidas con implementaciones sucesivas de algún enfoque dado, sin embargo, parece que el sistema híbrido de hormigas y los algoritmos genéticos pueden a futuro ser capaces de igualar la efectividad de la heurística de búsqueda tabú existente, ya que estos enfoques no han sido plenamente investigados.

Otra observación nos permite entender que la información que se maneja para la comprobación de algoritmos es demasiado reducida para tener una diferencia marcada entre varias implementaciones de algunas metaheurísticas (búsqueda Tabú), por lo tanto es necesario datos con más instancias. Pero dado a los requerimientos computacionales, heurísticas con tal nivel de sofisticación pueden no ser capaces de resolver satisfactoriamente con muchas instancias en algún tiempo razonable, especialmente si son contempladas aplicaciones en tiempo real.

Sin embargo, al explotar cuidadosamente la estructura del problema, se logra evitar la mayoría de los cálculos innecesarios descritos en el anterior algoritmo de búsqueda de tabú.

Considerando el artículo investigativo “A Comparative Study of Meta-heuristic Algorithms for Solving Quadratic Assignment Problem”, [9] se muestra que el tiempo de ejecución para problemas de diferente medida aplicando algoritmos GA y TS, los resultados alcanzados por un algoritmo de búsqueda Tabú tiene tiempo de ejecución más rápido que los otros algoritmos metaheurísticos para resolver casos de problemas de asignación cuadrática. (Caric & Gold, 2008) [10].

4. CONCLUSIONES

Se han recomendado algoritmos metaheurísticos para la resolución de Problemas de enrutamiento vehicular (VRP), para modelos de optimización del consumo energético asociado con el transporte de carga.

Los Algoritmos de Hormigas son procedimientos basados en agentes que utilizan métodos constructivos aleatorizados y cooperan entre si compartiendo información.

Los Algoritmos Genéticos se basan en mantener un conjunto de soluciones lo suficientemente diversas como para cubrir gran parte del espacio de soluciones.

Los algoritmos de Búsqueda Tabú son métodos de búsqueda local que aceptan empeorar las soluciones para escapar de los óptimos locales.

El mejor método que podría aplicarse para nuestro caso específico desarrollado, es búsqueda Tabú, considerando instancias disponibles de información y tiempo computacional requerido. (Coloni, Dorigo, & Manniezzo, 2013) [11].

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

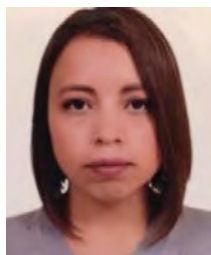
- [1] Duarte, A. (2007). Metaheurísticas. Librería Editorial Dykinson.
- [2] Toth, P., Vigo, D.: The Vehicle Routing Problems, Methods, and Applications. Second Edition, 2014.
- [3] De Smet, G. (2015). OptaPlanner. Retrieved from <https://www.optaplanner.org/blog/2015/01/27/ScalingVehicleRoutingAndTSPWithNearbySelection.html>
- [4] Russell, S. y Norvig, P. 2004. Inteligencia artificial. Un enfoque moderno. Pearson educacion. 2 ed. Madrid.
- [5] Dorigo, M., & Stutzle, T. (2004). Ant Colony Optimization. London.

- [6] Lüer, A., Benavente, M., Bustos, J., & Venegas, B. (2009). El problema de rutas de vehículos: Extensiones y métodos de resolución estado del arte. CEUR Workshop Proceedings, 558
- [7] S. Kirkpatrick, C. D. G. and M. P. V. (1983). Optimization by Simulated Annealing, 220(4598), 671–680.
- [8] Gendreau, M., Hertz, a., & Laporte, G. (1994). A Tabu Search Heuristic for the Vehicle Routing Problem. Management Science, 40(10), 1276–1290.
- [9] Said, G., Mahmoud, A., Horbaty, E.: A Comparative Study of Meta-heuristic Algorithms for Solving Quadratic Assignment Problem. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 5, No. 1, 2014.
- [10] Caric, T., & Gold, H. (2008). Vehicle Routing Problem.
- [11] Colorni, A., Dorigo, M., & Manniezzo, V. (2013). Distributed Optimization by Ant Colonies.

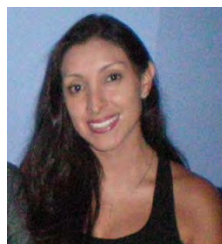
Experiencia en planificación y gestión en el sector de transporte terrestre. Actualmente Investigadora y Líder del equipo de la línea de investigación de eficiencia energética del sector transporte, proyecto I+D+i “Estudio de optimización Energética de cadenas logísticas de transporte de carga pesada” en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER).



Henry Acurio Flores.- Nació en Quito, Ecuador en 1986. Recibió su título de Ingeniero en Sistemas Informáticos y de Computación de la Escuela Politécnica Nacional en 2013. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Maestría en Ciencias y Sistemas de Información Geográfica en la Universidad de Salzburgo, y su campo de investigación se encuentra relacionado con gestión de información de eficiencia energética en el sector transporte, desarrollo de transporte sostenible, movilidad urbana, gestión de geodatabases y sistemas de información geográfica.



Jenny Sierra Campaña.- Nació en Quito, Ecuador en 1986. Realizó sus estudios de Ingeniería Matemática (Egresada) en la Escuela Politécnica Nacional (EPN). Sus actividades de investigación han estado vinculadas al procesamiento de datos y análisis de algoritmos matemáticos. Actualmente Analista Técnico de la línea de investigación de eficiencia energética del sector transporte, proyecto I+D+i “Estudio de optimización Energética de cadenas logísticas de transporte de carga pesada” en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER).



Paola Quinta Villacis.- Nació en Quito, Ecuador en 1979. Recibió su título en Ingeniería en Ciencias Geográficas y Desarrollo Sustentable con Mención en Ordenamiento Territorial; Maestría en Ingeniería del Transporte por la Pontificia Universidad Católica del Ecuador (PUCE). Sus actividades de investigación han estado vinculadas al sector transporte, energía y cambio climático.

Application of high solar reflectance roofs in low-income dwellings in Guayaquil: A case study for the program "Socio Vivienda II"

Aplicación de techos de alta reflectividad solar en viviendas de interés social en Guayaquil: Caso de estudio programa habitacional "Socio Vivienda II".

S. Lee¹, J. Macías², G. Soriano³, A. Lobato-Cordero²

¹National Research Foundation, Korea
E-mail: sungmoonlee2@gmail.com

²Instituto Nacional de Eficiencia energética y energías renovables, Quito, Ecuador.
E-mail: jose.macias@iner.gob.ec
andrea.lobato@iner.gob.ec

³Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador.
E-mail: gsorian@espol.edu.ec

Abstract

The present study focuses on the use of high solar reflectance coatings for low-income dwellings. This type of coating is usually applied as a strategy to improve the indoor temperature condition. Three houses were selected from a government housing program "Socio-Vivienda II," which is located in Guayaquil, and it accounts for 3027 housing units. The choice of the study dwellings required similar conditions of orientation and insulation level. With an area of 39,7 m² per dwelling, residences were build up using opaque metal tiles as roofs. The indoor temperature was recorded before and after of application of coatings. Additionally, the temperature was registered in a fourth house, which was used as a reference. The high reflectance coatings were selected from commercially available products. An Extech TH10 Datalogger was used to acquire the temperature, while the solar reflectance values were measured via ASTM E903 method.

The roofing tiles averaged a solar reflectance value of 22,5%, with new material. After application of high solar reflectance coating, the value rises to 80,3% in average. Later three commercial coatings were tried in the selected houses, by separately. The outcomes showed indoor temperature reductions from 2,3°C up to 3,7°C at noon time. In summary, the results showed noteworthy improvements to dwellings thermal performance.

Index terms— High Solar Reflectance Roofs, Sustainable buildings, energy efficiency, dwellings thermal performance, low-income dwellings.

Recibido: 09-02-2018, Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Forma sugerida de citación: Lee, S et al. (2017). Aplicación de techos de alta reflectividad solar en viviendas de interés social en Guayaquil: Caso de estudio programa habitacional "Socio Vivienda II". El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

Resumen

Este trabajo evalúa la aplicación de pintura de alta reflectividad como estrategia para mejorar la condición de temperatura interior en viviendas de tipo social. Se tomaron tres viviendas bajo similares condiciones de orientación y aislamiento, ubicadas en el programa habitacional "Socio Vivienda II" de Guayaquil. El sitio tiene 3027 viviendas, cada una tiene una superficie de 39,7 m² y utilizan una cubierta metálica. Los datos de temperatura interior fueron recolectados antes y después de la aplicación de la pintura de alta reflectividad solar sobre las cubiertas existentes. Además, se tomó la temperatura interior de una cuarta vivienda como dato de control. Las pinturas de alta reflectividad fueron escogidas de productos disponibles en el mercado local. Un historial de temperatura fue adquirido utilizando un recolector de datos Extech TH10, mientras que los valores de reflectancia solar fueron obtenidos mediante el procedimiento normado ASTM E903.

En su condición original los techos obtuvieron una reflectancia solar promedio de 22,5%. Después de aplicar la pintura de alta reflectividad sus valores aumentaron a 80,3% en promedio. Tres pinturas comerciales fueron aplicadas por separado en casas previamente seleccionadas, los resultados mostraron reducciones de temperatura desde 2,3°C hasta 3,7°C al interior de las viviendas al medio día. En conclusión se identificó una notable mejora en el rendimiento térmico de la vivienda.

Palabras clave— Techos de alta reflectancia solar, Edificaciones sostenibles, eficiencia energética.

1. INTRODUCCIÓN

Ecuador se encuentra en etapa de implementación de políticas públicas para incentivar prácticas de eficiencia energética, específicamente en aquellos sectores que representan los mayores consumidores de energía, uno de ellos es el sector de la construcción residencial. Para una superficie que recibe una carga térmica proveniente de la radiación solar incidente, la ecuación 1 presenta la relación entre los porcentajes de radiación absorbida α , reflejada ρ y transmitida τ . En el caso de los materiales opacos el valor de transmisividad es cero [1]. Este es un principio sustancial para el rendimiento y desarrollo de todos los sistemas a base de energía solar, como lo son construcciones de sistemas pasivos, superficies captadoras, sistemas de potencia de receptor central, control térmico de naves espaciales y otros.

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1)$$

Estudios previos inferen que el uso de cubiertas de alta reflectividad solar es un mecanismo apropiado para mejorar el desempeño térmico de viviendas bajo climas cálidos como Guayaquil [2], [3]. Por este motivo el presente trabajo busca valorar el uso de este tipo de recubrimientos en viviendas de tipo social en la ciudad.

En la búsqueda de soluciones pasivas para mejorar el rendimiento térmico de las edificaciones, investigadores de todo el mundo continúan probando recubrimientos de alta reflectividad en todo tipo de edificios. En Italia, Pisello y Cotana lograron medir reducciones hasta 4,7°C en la temperatura interior del ático de una edificación residencial [4]. De similar manera, Romeo y Zinzi obtuvieron resultados favorables para un caso de estudio sobre una edificación de ocupación combinada entre oficinas y laboratorios [5]. Sin embargo uno de los trabajos que muestra las mayores bondades de usar superficies de alta reflectividad en climas cálidos, es el presentado por Synnefa y sus colaboradores, este trabajo revela que el incremento de la reflectancia solar puede reducir las cargas de refrigeración en un rango del 18% al 93% y el pico de demanda de energía de refrigeración en edificios con aire acondicionado desde un 11% hasta el 27%. Un estudio local encontró reducciones anuales de hasta 20% en el número de horas de no confort al interior de una vivienda local [2].

El presente trabajo busca cuantificar la mejora térmica en el rendimiento de una edificación residencial de tipo social, aplicando superficies de alta reflectividad en techos bajo las condiciones de la ciudad de Guayaquil. Esta urbe tiene una condición climática cálida y húmeda a lo largo del año. Si adicionamos que la ciudad se encuentra ubicada a 2°16'51" de latitud, el uso de este tipo de cubierta aparenta ser una aplicación prometedora.

2. MÉTODOS

2.1. Descripción del Programa Habitacional “Socio Vivienda II”

La figura 1 muestra un esquema de las etapas desarrolladas para el presente trabajo. El programa Socio Vivienda II fue seleccionado para representar las condiciones actuales de la vivienda social en Ecuador. El programa cuenta con 3 027 residencias, cada vivienda tiene 39,7 m² de superficie. La figura 2 ilustra el diseño arquitectónico de la vivienda tipo y presenta un registro fotográfico de las condiciones actuales. En este caso las unidades habitacionales tienen una estructura de hormigón armado y su envolvente está compuesta por paredes exteriores de bloques hormigón con 8,0 cm de espesor, una cubierta metálica sin aislamiento ni tumbado, y contrapisos de hormigón simple.



Figura 1: Esquema de Metodología de Estudio.



Figura 2: a) Diseño de vivienda del programa social b) Foto exterior frontal c) Foto interior de cubierta d) Foto exterior de cubierta.

Lee, S et al. (2017). Aplicación de techos de alta reflectividad solar en viviendas de interés social en Guayaquil: Caso de estudio programa habitacional “Socio Vivienda II”.

Cuatro viviendas del programa fueron seleccionadas para cuantificar las posibles mejoras del confort térmico interior de la vivienda, mediante la implementación de cubiertas de alta reflectividad solar. Tres viviendas fueron elegidas para la aplicación del recubrimiento, mientras que una cuarta vivienda fue utilizada como dato de control. Las residencias fueron escogidas para conservar similares condiciones en su diseño y orientación.

2.2. Temperatura interior

Para determinar las variaciones de temperatura interior se colocó un registrador de datos con sensor de temperatura en cada vivienda elegida. El registrador Extech TH10 fue ubicado a una altura de 1,60 m y programado para tomar mediciones cada 10 minutos, su precisión es $\pm 1^\circ\text{C}$. Los datos de temperatura fueron guardados durante 10 días previos a la aplicación del recubrimiento y otros 10 días posteriores.

2.3. Selección de Pintura, Pruebas de laboratorio y Aplicación

Para el presente estudio se buscó recubrimientos de alta reflectividad en el mercado local, sin embargo no fue posible ubicar productos nacionales con tales características. En este se halló dos pinturas importadas de este tipo, y para una tercera alternativa se decidió utilizar una pintura blanca de uso común.

El valor de reflectividad solar fue medido mediante procedimiento estándar ASTM E903, método que requiere el uso de un espectrofotómetro de alto rendimiento con esfera integradora [6]. Este método es adecuado para determinar la reflectividad solar espectral de todo tipo de muestras con una superficie homogénea, plana y opaca. Existen técnicas alternativas para la determinación de la reflectividad solar en muestras opacas, sin embargo el procedimiento ASTM E903 presenta la mayor exactitud [2], [7]. El equipamiento y los ensayos fueron provistos por el Laboratorio de Ensayos Térmicos del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. Para las mediciones en el material sin pintar, se utilizaron cinco muestras de la cubierta con una superficie de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ [7].

Posteriormente se procedió a aplicar la pintura en tres especímenes para cada recubrimiento seleccionado, así se obtuvieron los valores de reflectividad solar bajo el mismo método experimental. La aplicación de los recubrimientos se realizó siguiendo las recomendaciones de cada fabricante. Finalmente las tres pinturas fueron aplicadas sobre la cubierta de cada vivienda seleccionada para el estudio.

La figura 3 muestra un registro fotográfico para las

diferentes etapas del experimento.

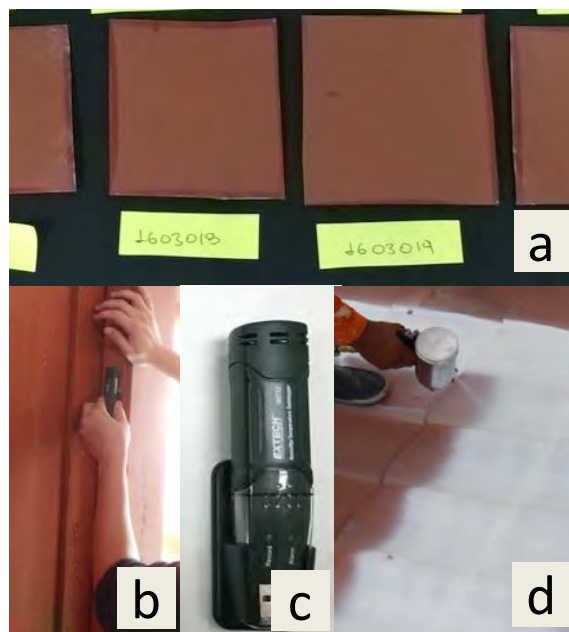


Figura 3: a) Diseño de vivienda del programa social b) Foto exterior frontal c) Foto interior de cubierta d) foto exterior de cubierta.

3. RESULTADOS

3.1. Reflectividad Solar.

La tabla 1 presenta los valores de reflectividad solar obtenidos para las muestras de cubierta sin pintar, y por el método estándar ASTM E903. Los techos sin pintar tienen una reflectancia solar promedio de 0,22. Después de aplicar la pintura de alta reflectividad sus valores aumentaron hasta 0,80 en promedio. Estos resultados muestran similitud a trabajos similares [2], [7]. Akbari y sus colaboradores presentaron datos de reflectividad solar en un rango desde 0,10 a 0,50 para muestras de techos de color uniforme [7]. Mientras que un estudio previo encontró valores de reflectividad solar que variaron desde 0,29 a 0,51 para muestras de techos locales [2]. Otras investigaciones muestran recubrimientos de alta reflectividad con valores que cubren desde 0,70 a 0,88 generalmente [3]–[5], [8].

Tabla 1: Reflectividad Solar medida por método ASTM E903

	Reflectividad Solar	Desviación Estándar
Cubierta Original	0,22	0,003
Recubrimiento Tipo 1	0,82	0,020
Recubrimiento Tipo 2	0,84	0,001
Recubrimiento Tipo 3	0,74	0,011

3.2. Temperatura interior.

En términos del rendimiento térmico de los habitáculos, la figura 4, muestra el historial de temperatura interior para cada vivienda donde se aplicó un recubrimiento. Los resultados mostraron reducciones máximas de temperatura interior desde 2,3°C hasta 3,7°C al medio día ($\pm 1^\circ\text{C}$). Esto evidencia que la medida fue efectiva y se obtuvo mejora en las condiciones de confort térmico, bajo las condiciones de Guayaquil. Este tipo de aplicaciones se encuentra vigente en la práctica de eficiencia energética para edificaciones y sus resultados muestran un comportamiento similar al caso de estudio presentado [9], [10].

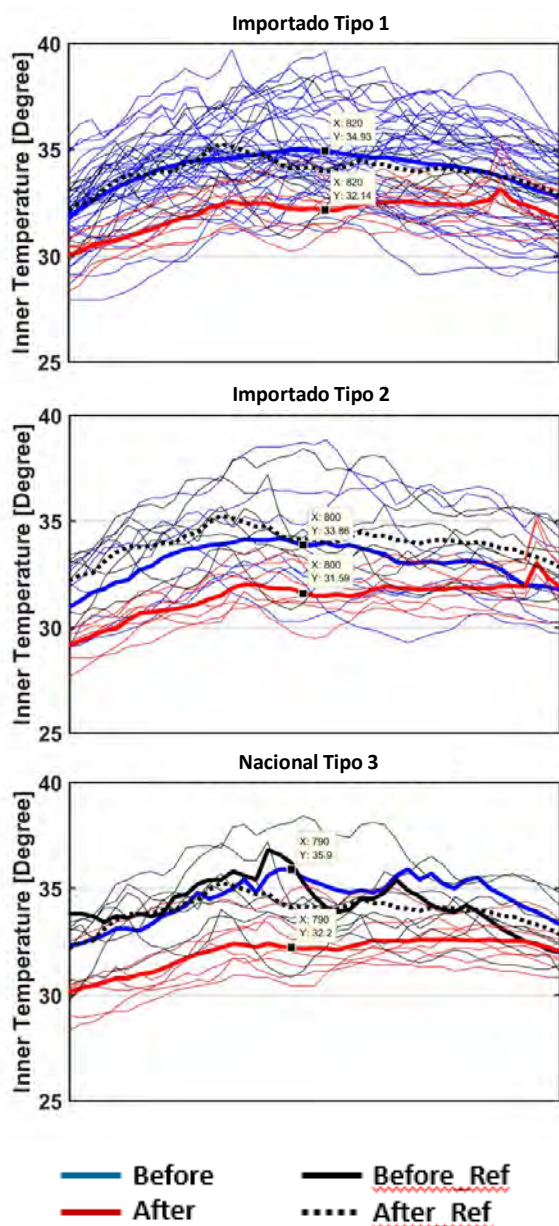


Figura 4: Registro de temperatura interior para tres viviendas donde se aplicó recubrimientos de alta reflectividad solar en sus cubiertas.

Otros estudios han demostrado que la aplicación de cubiertas de alta reflectividad solar es un mecanismo práctico para la implementación de edificaciones eficientes [2]–[5], [7]. Los resultados mostrados en la figura 4 revelan afinidad con las secuelas logradas por trabajos previos [2], donde se obtuvieron disminuciones de hasta el 20% en las horas de no confort anuales, para un caso de vivienda similar.

Un aspecto importante de mencionar es que todos los recubrimientos probados lograron resultados favorables a pesar de sus deferencias en costo y valor de reflectividad solar. Sin embargo, debido a limitaciones en el control sobre algunas variables, tales como el comportamiento de los ocupantes, sombras, vegetación y el tipo de equipamiento utilizado en la vivienda, no es adecuado comparar directamente los beneficios de cada pintura. Otro aspecto que no fue posible estimar es el efecto de acumulación de polvo en la superficie o la reducción de las prestaciones debido a su envejecimiento.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Finalmente la aplicación de pintura de alta reflectividad sobre la cubierta de viviendas sociales es un factor que influye en el confort al interior. Es importante mencionar que los resultados se aplican en cubiertas no aisladas térmicamente y que están construidas con un solo material que separa el interior con el exterior. La reducción estimada de la temperatura al interior estuvo alrededor de 2,9°C al medio día, resultado que converge a conclusiones de estudios previos.

Para trabajos futuros se requiere considerar otras variables importantes, tales como los hábitos de ocupación, áreas verdes en los alrededores, perfiles de viento, y la degeneración de la superficie.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue financiado por National Research Foundation, Korea. Agradecemos al MIDUVI por su apertura y colaboración en las tareas de organización.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. R. Hall and D. Allinson, "Heat and mass transport processes in building materials," in *Materials for Energy Efficiency and Thermal Comfort in Buildings*, Elsevier, 2010, pp. 3–53.
- [2] J. Macias, G. Soriano, H. Sanchez, and Y. Canchingre, "Assessment of solar reflectance of roofing assemblies of dwellings in Guayaquil, Ecuador," *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 195, pp. 307–315, 2015.
- [3] A. Synnefa, M. Santamouris, and H. Akbari, "Estimating the effect of using cool coatings on

Lee, S et al. (2017). Aplicación de techos de alta reflectividad solar en viviendas de interés social en Guayaquil: Caso de estudio programa habitacional “Socio Vivienda II”.

energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions,” vol. 39, no. 11, pp. 1167–1174, 2007.

- [4] A. L. Pisello and F. Cotana, “The thermal effect of an innovative cool roof on residential buildings in Italy: Results from two years of continuous monitoring,” *Energy Build.*, vol. 69, pp. 154–164, 2014.
- [5] C. Romeo and M. Zinzi, “Impact of a cool roof application on the energy and comfort performance in an existing non-residential building. A Sicilian case study,” *Energy Build.*, vol. 67, pp. 647–657, Dec. 2013.
- [6] ASTM International, “ASTM E903 Standard Test Method Solar Absorptance, Reflectance and Transmittance of Materials Using Integrating Spheres.” 1996.
- [7] H. Akbari, R. Levinson, and S. Stern, “Procedure for measuring the solar reflectance of flat or curved roofing assemblies,” *Sol. Energy*, vol. 82, no. 7, pp. 648–655, 2008.
- [8] E. Bozonnet, M. Doya, and F. Allard, “Cool roofs impact on building thermal response: A French case study,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 11, pp. 3006–3012, Nov. 2011.
- [9] M. Kolokotroni, B. L. Gowreesunker, and R. Giridharan, “Cool roof technology in London: An experimental and modelling study,” *Energy Build.*, vol. 67, pp. 658–667, 2013.
- [10] M. Kolokotroni, C. Wines, R. M. Babiker, and B. H. Da Silva, “Cool and green roofs for storage buildings in various climates,” *Procedia Eng.*, vol. 169, pp. 350–358, 2016.



Sungmoon Lee.- Nació en Corea de Sur en 1988. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad de SUNGKYUNKWAN en 2011; de Máster en Ingeniería Mecánica e Ingeniería Aeroespacial de la Universidad Nacional de Seúl en 2015. Sus campos de investigación están relacionados con el desarrollo de motores de combustión eficientes a través de la reducción de sus vibraciones. Como voluntario de NRF de Korea formó parte del equipo de investigadores del Laboratorio de Ensayos Térmicos durante 12 meses desde julio del 2015.



José Macías.- Nació en 1986 en Portoviejo, Ecuador. Estudió Ingeniería Mecánica y el 2017 obtuvo su maestría en Ciencias de la Ingeniería en la Escuela Superior Politécnica del Litoral de la ciudad de Guayaquil. Actualmente es investigador en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables en Ecuador. Realiza sus actividades en el laboratorio de Ensayos Térmicos y Eficiencia Energética ubicado Guayaquil. Sus trabajos se enfocan principalmente en la mejora del rendimiento energético de edificaciones.



Guillermo Soriano.- Cuenta con un doctorado (PhD) en ingeniería mecánica de Texas A&M University su investigación se enfocó en problemas de transferencia de calor. Es profesor agregado de la carrera de ingeniería mecánica de la ESPOL. Con interés en el uso de energía y optimización de sistemas térmicos. Entre sus últimos proyectos se encuentra la evaluación de desempeño energético de diferentes métodos de construcción usados en Ecuador y estudio de métodos de disipación de calor en el suelo para aplicaciones de climatización.



Andrea Lobato Cordero.- Arquitecta, Magíster en Ecodiseño y Eficiencia en Edificaciones por la Universidad de Zaragoza, España. Sus principales intereses de investigación son: el comportamiento térmico en edificaciones para mejorar las condiciones de habitabilidad y rendimiento energético; enfocada en vivienda social, adaptación de técnicas vernáculos y estrategias bioclimáticas.

Wind simulation as a granular system interacting with a Savonius turbine

Simulación del viento como un sistema granular en interacción con una turbina Savonius

J.D. Jijón¹, S. Pullaguari², V. Granja³, X. Sánchez⁴, A. Salazar⁵, J. Segovia⁶

¹*Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Quito, Ecuador*
E-mail: juan.jijon@iner.gob.ec

²*Instituto Nacional de Evaluación Educativa, Quito, Ecuador*
E-mail: spullaguari@hotmail.com

³*Corporación para el Desarrollo de la Educación, Quito, Ecuador*
E-mail: veritopgn@hotmail.com

⁴*Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador*
E-mail: ximena.sanchez@epn.edu.ec

⁵*METALTRONIC S.A., Quito, Ecuador*
E-mail: adse_89@hotmail.com

⁶*CONAUTO S.A., Quito, Ecuador*
E-mail: juanksego@gmail.com

Abstract

The wind interpretation as a granular system interacting with a Savonius wind turbine is discussed in this work. All the particles considered for the wind system are spherical, with a constant wind speed of 12 (m/s). Moreover, the wind conditions as particles are characterized by Young modulus, Poisson coefficient and friction coefficient between them. The particle collisions simulated in this work are elastic and inelastic, defined by the restitution coefficient. The contact models used are Hertz and Hooke, where both shown a similar behavior in different tests of simulation with the Savonius turbine. The contact models used are comparable to air-fluid system, where the turbulences produced by the effect of the Savonius turbine shows vortex, which is expected on a fluid interpretation.

Index terms— Granular systems, Wind simulation, Savonius, Contact models.

Resumen

La interpretación del viento como un sistema granular en interacción con una turbina Savonius es presentado en este trabajo. Las partículas que componen el sistema aire son esféricas, con una velocidad constante de 12 (m/s). Además, las condiciones del viento como partículas son caracterizadas por el módulo Young, coeficiente de Poisson y la fricción. Las colisiones de las partículas analizadas en este trabajo son elásticas e inelásticas, definidas por el coeficiente restitución. Los modelos de contacto usados son de Hertz y Hooke, los mismos que mostraron un comportamiento similar en las diferentes pruebas de simulación con la turbina Savonius. Los modelos de contacto utilizados son comparables al de un sistema aire-fluido, donde las turbulencias producidas por el efecto de la turbina Savonius muestran vórtices, el cual es esperado en una interpretación de fluido.

Palabras clave— Sistemas granulares, Simulación del aire, Savonius, Modelos de contacto.

Recibido: Colocar fecha de envío 09-06-2017, Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Forma sugerida de citación: Colocar Primer Apellido y la inicial del nombre de todos los autores Ej: Peterchev, A.; Handel, G. (2017). Nombre del trabajo técnico entre comillas Ej: “Guía para la Preparación y Envío de los Trabajos Técnicos de la Revista Técnica *“energía”*”. Revista Técnica *“energía”*. No. 13, Pp. El número de página lo colocará el Consejo Editorial.
ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

Los aerogeneradores de baja potencia son de dos tipos: eje vertical y horizontal, siendo los de eje horizontal los más utilizados en parques eólicos [1]. Este tipo de turbina depende de la dirección de la velocidad del viento y que las turbulencias sean bajas. Los aerogeneradores de eje vertical no dependen de la dirección del viento y funcionan bajo condiciones de altas turbulencias. Este tipo de aerogeneradores generalmente son: Savonius, Giromill y Darrieus [1, 2]. Los aerogeneradores convierten la energía cinética del viento en trabajo mecánico, donde el porcentaje máximo de conversión es del 59% como fue demostrado por Betz en 1926 [3].

El aerogenerador Savonius es una máquina eólica de eje vertical que puede arrancar con poco viento, es de sencilla fabricación, no necesita de un sistema de orientación del viento y el costo de construcción es bajo. Sus principales desventajas son: velocidad de giro pequeña y el rendimiento es relativamente bajo en relación a otro tipo de aerogeneradores de eje vertical como Darrieus y Giromill [4-6]. El aerogenerador es una turbo-máquina motora donde la energía cinética del aire en movimiento proporciona energía mecánica a un rotor que al girar convierte la energía mecánica rotacional en energía eléctrica [2, 4-6]. El viento es un fluido turbulento cuyo comportamiento depende de las condiciones meteorológicas y de posición en el planeta, el mismo que es caracterizado por su velocidad vectorial, intensidad de turbulencia, densidad, rugosidad del terreno, temperatura y presión atmosférica, como las más importantes [7]. Existe un alto grado de aplicación de métodos numéricos discretos, con el fin de simular el comportamiento del viento con diferentes aplicaciones como propagación de las bacterias, meteorología, mezclas de fluidos, transferencia de calor, entre otras [8]. En el trabajo de Huilin, simula el comportamiento de un fluido gas – sólido como una serie de partículas esféricas que se encuentran colisionando entre sí y usan la teoría cinética de flujo granular, una vez que las ecuaciones de continuidad y momentum de mecánica de fluidos son resueltas para cada fase. Este efecto demostró el comportamiento caótico que pueden tomar las partículas, el mismo que no es una limitante para caracterizar el fluido en la simulación y ser comparado observables experimentales, los cuales fueron demostrados exitosamente [9].

El trabajo de Cundall en 1971 demostró la metodología de métodos finitos discretos con el uso de esferas que interactúan entre sí por medio de sus contactos superficiales [10]. El cálculo es un proceso dinámico en estado de equilibrio siempre y cuando exista un balance de las fuerzas internas. La fuerza de contacto, los desplazamientos, tensiones y deformaciones relativas de las partículas del conjunto son determinadas a través del movimiento e interacción entre cada una de ellas. En este proceso dinámico, la velocidad de propagación de las perturbaciones

impuestas sobre el sistema de partículas, dependen de las propiedades físicas y mecánicas del sistema discreto [10-12].

En este trabajo, se realiza la simulación numérica del fluido del viento como un sistema granular que interactúa con un aerogenerador de eje vertical tipo Savonius bajo condiciones atmosféricas estándar y velocidades de viento bajas. Se logró determinar el recorrido de las partículas que interactúan con el aerogenerador y el comportamiento del mismo bajo distintas velocidades del viento.

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1. Datos y Materiales

2.1.1 Software utilizado

La simulación de las partículas de aire que interactúan con el aerogenerador de eje vertical, tipo Savonius se lo realizó en un sistema operativo UBUNTU 16.04 LTS con el software LIGGGTHS 3.3.1. [13]. Los resultados son presentados a través de la interfaz de código abierto ParaView, el mismo que permite visualizar los datos en 2D y 3D, además de realizar un video con los datos temporales. Los datos resultantes de la simulación con LIGGGTHS son procesados con las funciones programadas en Python de LPP, la cual es una variante de PIZZA [13].

2.1.2 Aerogenerador tipo Savonius

Se utilizó el diseño Savonius propuesto por Modi et al. [6], donde la configuración del modelo es simple y de alta eficiencia. El material de los alabes del aerogenerador es aluminio. En la Fig. 1, se presenta el modelo utilizado en la simulación del viento como un sistema granular en interacción con la turbina Savonius.

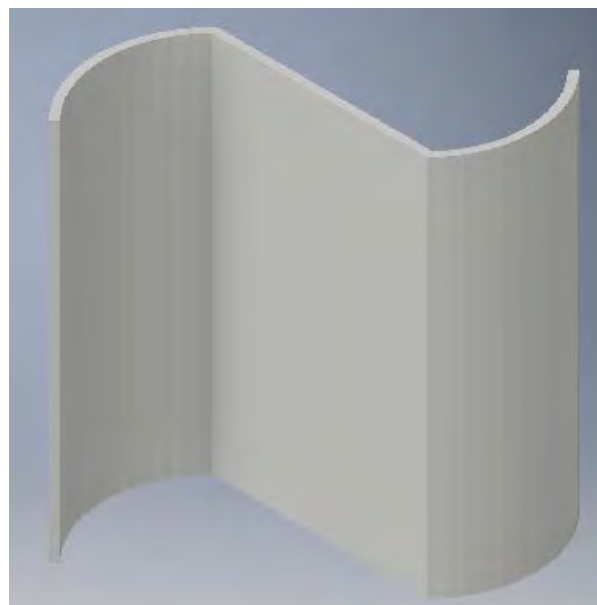


Figura 1: Modelo del aerogenerador tipo Savonius

La turbina Savonius de la Fig. 1, tiene un diámetro de rotor de 635 (mm), un alto de 480 (mm) y un espesor de las aspas de aluminio de 1,25 (mm). La potencia aproximada de este tipo de turbinas es 400 (W), aproximados a un área de 4 (m²) [6, 14]. Es este caso, el área proyectada máxima con la que el viento interactúa con la turbina es 0,3 (m²), con lo que se tiene una potencia para el aerogenerador de 30 (W).

2.2. Metodología

2.2.1 Características energéticas del viento

El comportamiento de la velocidad de viento se ajusta a una función de densidad de probabilidad con distribución de Weibull [12, 15]. La función de densidad de probabilidad es mostrada en (1), esta es ajustada a las frecuencias relativas de una serie temporal de velocidad.

$$f(v) = \frac{k}{\lambda} \left(\frac{v}{\lambda} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{v}{\lambda} \right)^k \right) \quad \forall v \geq 0 \quad (1)$$

Donde, k y λ son los parámetros de forma y escala, respectivamente. La velocidad en (2) corresponde a v y $f(v)$ es la función de densidad de probabilidad. Los valores de velocidad media en un emplazamiento eólico, oscilan entre los 9 y 13 (m/s) bajo una distribución de Weibull, donde se escogerá como referencia los 12 (m/s) para realizar la simulación del aire como un sistema granular.

La densidad de potencia del viento es bien conocida, la cual es presentada a continuación:

$$P(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

Donde, $P(v)$ es la densidad de potencia, ρ es la densidad del aire y A el área de barrido de la turbina. La densidad de potencia para el aerogenerador de estudio mostrado en la Fig. 1, tiene una densidad de potencia de 321,29 (W), para una velocidad de viento de 12 (m/s).

La velocidad angular de la turbina Savonius se determina a partir de la ecuación propuesta por Menet [16], la cual se presenta en (3).

$$\omega = \frac{0.039086v^2 - 4.9656}{2(0.0048869v - 0.0288)} + \dots \quad (3)$$

$$\frac{\sqrt{(4.9656 - 0.039086v^2)^2 + 364.8(0.0048869v - 0.0288)}}{2(0.0048869v - 0.0288)}$$

Donde, v es la velocidad del aire y ω la velocidad angular del rotor [16] en (rad/s). Con una velocidad del viento a 12 (m/s), la velocidad angular según la

ecuación (3) es 67.49 (rad/s) o 644.48 (rpm).

2.2.2 Modelos de contacto entre partículas

El viento es simulado como un conjunto de partículas esféricas, con un mismo tamaño y propiedades idénticas. En este trabajo se pretende demostrar que el comportamiento del aire, como un sistema compuesto por partículas, basado en los métodos de elementos finitos discretos aplicado a sistemas granulares [11].

Los contactos de todas las partículas siguen los elementos finitos discretos propuestos por Cundall en 1971 [10], donde las partículas son esferas que interactúan entre sí y siguen los principios de la mecánica clásica, simulando las colisiones contacto por contacto y partícula por partícula [10]. En la Fig. 2, se presenta el modelo de contacto propuesto por Cundall para dos discos de igual tamaño.

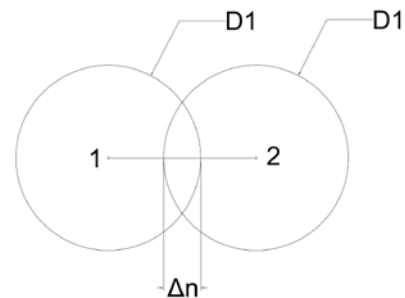


Figura 2: Modelo de Cundall – contacto entre partículas

Las fuerzas de Cundall, basados en la Fig. 2, es presentado en (3).

$$\mathbf{F}_{12} = K(\Delta n)\mathbf{e}_{12} \quad (4)$$

Donde, K es el coeficiente de rigidez de las partículas. El paso de tiempo (time step), es definido por cada iteración en la simulación, el mismo que permite estimar las fuerzas en cada instante y es una entrada en el software de LIGGGTHS. El tamaño del intervalo en la simulación estuvo probado para valores de $1 e^{-6}$ y $1 e^{-5}$. La generalización de la fuerza expresada en (4), considerando las componentes normal y tangencial es mostrada en (5).

$$\mathbf{F} = \underbrace{(k_n \delta n_{ij} - \gamma_n v n_{ij})}_{\text{Fuerza Normal, } F_n} + \underbrace{(k_t \delta t_{ij} - \gamma_t v t_{ij})}_{\text{Fuerza Tangencial, } F_t} \quad (5)$$

Donde, δn_{ij} y δt_{ij} corresponden a las distancias de las 2 partículas en interacción en las componentes normal y tangencial, $v n_{ij}$ y $v t_{ij}$ es la velocidad relativa en sus componentes tangencial y normal de las partículas [17-19]. Para determinar los coeficientes de (5), se utilizan los modelos de contacto de Hertz y Hooke para ser comparados mediante la simulación del aire como un sistema granular en interacción con el

aerogenerador Savonius. Las constantes de elasticidad k de (5), utilizando el modelo de contacto de Hertz se mencionan en (6) [17, 18].

$$\begin{aligned} k_n &= \frac{4}{3} Y^* \sqrt{R^* \delta n_{ij}} \\ k_t &= 8G^* \sqrt{R^* \delta t_{ij}} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde, Y^* es el módulo de Young reducido, G^* es el módulo de cizalladura reducido y R^* es el radio reducido del sistema de colisión de dos partículas. En la simulación se consideran a todas las partículas esféricas del aire iguales, donde las relaciones reducidas de (5) son presentadas a continuación.

$$\begin{aligned} \frac{1}{Y^*} &= \frac{2(1-\nu^2)}{Y} \\ \frac{1}{G^*} &= \frac{4(2-\nu)(1+\nu)}{Y} \\ \frac{1}{R^*} &= \frac{2}{R} \end{aligned} \quad (7)$$

En (6), ν es el coeficiente de Poisson, Y y R es el módulo de Young y el radio de la esfera de las partículas, respectivamente. Las constantes de viscoelasticidad γ para los contactos normal y tangencial se presentan en (7).

$$\begin{aligned} \gamma_n &= -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^*} \geq 0 \\ \gamma_t &= -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^*} \geq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Donde, m^* corresponde a la masa reducida del contacto de las dos partículas esféricas. Las constantes mostradas en (7) son estimadas a continuación.

$$\begin{aligned} S_n &= 2Y^* \sqrt{R^* \delta n_{ij}} \\ S_t &= 8G^* \sqrt{R^* \delta t_{ij}} \\ \beta &= \frac{\ln(e)}{\sqrt{\ln^2(e) + \pi^2}} \\ \frac{1}{m^*} &= \frac{2}{m} \end{aligned} \quad (9)$$

Por otro lado, la simulación del aire como un sistema granular se realizó con los modelos de contacto de Hooke, los cuales son comparados con los de Hertz para identificar las diferencias que se presentan en las dos suposiciones, basados en la ecuación general de las fuerzas por el contacto de las dos partículas esféricas mostrado en (5). El modelo de contacto de Hooke en (10), para la determinación de las constantes de elasticidad k y viscoelasticidad γ de (5).

$$\begin{aligned} k_n &= \frac{16}{15} \sqrt{R^* Y^*} \left(\frac{15m^* V^2}{16\sqrt{R^* Y^*}} \right)^{1/5} \\ \gamma_n &= \sqrt{\frac{4m^* k_n}{1 + \left(\frac{\pi}{\ln(e)} \right)^2}} \\ k_t &= k_n, \quad \gamma_t = \gamma_n \end{aligned} \quad (10)$$

En (9), las constantes son determinadas por (6) y (8) al igual que el modelo de contacto de Hertz.

2.2.3 Condiciones del fluido aire

El fluido de trabajo fue simulado en condiciones normales, con temperatura de 25 (°C), densidad del aire de 1,22 (kg/m³), presión atmosférica de 1010 (hPa) [20]. La velocidad referencial del viento estudiada es 12 m/s, dado que en un emplazamiento eólico con velocidades medias de este tipo son muy favorables para que la turbina llegue a su potencia nominal. La suposición más importante en este trabajo, es que todas las partículas que conforman el fluido de aire tienen una misma velocidad inicial, previa a la interacción con el aerogenerador Savonius. Las condiciones del particulado del aire se presentan en la siguiente tabla [20].

Tabla 1: Condiciones de particulado del aire.

Variable	Aire	Unidades
Módulo de Young $\approx$ Módulo de Bulk	1,01	MPa
Coeficiente de Poisson	0,2854	N/D
Coeficiente de restitución	0,2-0,5	N/D
Coeficiente de Fricción	0,000333	N/D

Dado que el software de LIGGGTHS solo se considera el módulo de Young, considerando materiales rígidos, se realiza la analogía con el módulo de Bulk para interpretar al fluido aire como un conjunto de esferas rígidas.

3. RESULTADOS

Se configuró el software tal como se presentó en la sección de metodología, en donde, los códigos de programación se dividieron en 6 diferentes simulaciones con distintas condiciones del problema.

Las cuatro primeras simulaciones se realizaron bajo el modelo de Hertz bajo diferentes condiciones. En la primera simulación el número de partículas por inserción es de 20000 y un radio de 0,15 de cada partícula. Esto se puede apreciar en la Figura 3.

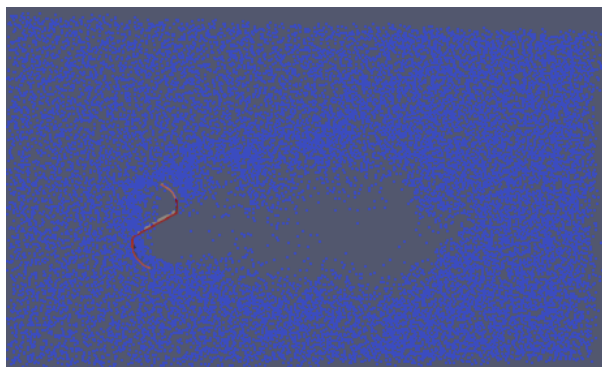


Figura 3: Primera simulación – Modelo Hertz

Como es posible apreciar en la Figura 3, la distribución de todas las partículas que conforman el sistema granular del aire en contacto con el aerogenerador tipo Savonius es muy interesante, desde el punto de vista de la turbulencia que se genera por dicha interacción. Esto es lo esperado, dado que se pueden apreciar ciertas vorticidades que solo se presentan en los fluidos y que con esta representación, se consiguen resultados similares.

La siguiente simulación corresponde a las mismas condiciones de la primera simulación, con un radio de partícula de 0,015. Esto se presenta en la figura 4.



Figura 4: Segunda simulación – Modelo Hertz

En la Figura 4, se observa la distribución de las partículas como en el caso anterior, donde la turbulencia es disminuye dado a que la probabilidad de colisión entre las partículas es menor.

La simulación número 3, utiliza el mismo modelo de Hertz, aumentando la velocidad de interacción de las partículas en un 50%, donde se tuvo que modificar las fronteras o regiones de las mismas. El radio de cada partícula es 0,15, dado que mostró un interesante comportamiento de interacción entre las mismas. Esto es presentado en la Figura 5.



Figura 5: Tercera simulación – Modelo Hertz

Es posible apreciar en la Figura 5, que la distribución de las partículas muestra la turbulencia que se crea por la interacción con la turbina Savonius, donde a diferencia de las anteriores simulaciones, el comportamiento es simétrico y se mantiene a lo largo del tiempo. Para mejorar este comportamiento, se realizó una cuarta simulación con 30000 partículas, donde se pudo apreciar una resolución muy alta de la turbulencia originada por el aerogenerador, el mismo que es presentado en la Figura 6.



Figura 6: Simulación 4 – Modelo Hertz

En esta Figura, se puede apreciar de mejor manera los lugares con mayor presión o a acumulación de partículas que originan el giro de la turbina.

Para poder validar este comportamiento, se utilizó el modelo de Hooke, con el fin de comparar las distribuciones de las partículas entre los dos modelos propuestos en este trabajo. Para ello se tuvo que incorporar una velocidad característica tipo escalar, la misma que se la tomó con el valor de 20. Esto es posible apreciarlo en la Figura 7.



Figura 7: Simulación 5 – Modelo de Hooke

Como se observa en Figura 7, la distribución de las partículas una vez que interactúan con la turbina se asemeja mucho al modelo de Hertz, el cual nos ayuda a validar el comportamiento granular del aire. Finalmente, se usó el mismo modelo de Hooke con una inserción de 40000 partículas, la misma que se presenta en la Figura 8.



Figura 8: Simulación 6 – Modelo de Hooke

La Figura 8, demuestra el comportamiento turbulento del sistema granular del aire, donde ambos modelos tienen similitudes. Esto logra demostrar que un fluido como el aire puede ser interpretado como un sistema granular compuesto por miles de partículas sólidas que interactúan entre sí.

4. CONCLUSIONES

La consideración del viento como un sistema granular, considerando que las colisiones de las partículas siguen los modelos de contacto de Hertz y Hooke, presentan interesantes comportamientos al interactuar con la turbina Savonius, donde un comportamiento esperado como si fuera un fluido es el que se evidenció en el trabajo.

Las simulaciones realizadas con el modelo de contacto de Hertz, mostraron un interesante comportamiento al incrementar el número de partículas y el radio de las mismas, donde la colisión entre ellas es más probable, mostrando un comportamiento turbulento asemejado a un fluido. Asimismo, se realizó la simulación con el modelo de contacto de Hooke, el cual es muy semejante a lo que se mostró con el modelo de Hertz, demostrando que ambos siguen un comportamiento turbulento al interactuar con la turbina Savonius.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. R. Jha. Wind Turbine Technology, Boca Rarón, FL: Taylor & Francis, 2011.
- [2] J.-V. Akwaa, H.-A. Vielmo and A.-P. Petry, "A review on the performance of Savonius wind turbines", Elsevier-Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 3054–3064, 2012
- [3] A. Betz. Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen, Göttingen: Vandenhoeck and Ruprecht, 1926.
- [4] N. Fujisawa, "Velocity measurements and numerical calculations of flow fields in and around Savonius rotors", ELSEVIER -Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 59, pp. 39-50, 1996
- [5] N. Fujisawa and F. Gotoh, "Experimental Study on the Aerodynamic Performance of a Savonius Rotor", Solar Energy Engineering, vol. 116, pp. 148-152, 1994
- [6] V. J. Modi and M. S. U. K. Fernando, "On the performance of the Savonius wind turbine", Solar Energy Engineering, vol. 111, pp. 1-11, 1989
- [7] W. HJ. and M. J. Wind: Origin and Local Effects. In: Introduction to Wind Energy Systems, Berlin, Heidelberg: Green Energy and Technology - Springer, 2013.
- [8] K. A. Gifford, J. L. Horton, T. A. Wareing, G. Failla and F. Mourtada, "Comparison of a finite-element multigroup discrete-ordinates code with Monte Carlo for radiotherapy calculations", Physics in Medicine & Biology, vol. 51, pp. 2253-2265, 2006
- [9] L. Huilin, D. Gidaspow, J. Bouillard and LiuWentie, "Hydrodynamic simulation of gas-solid flow in a riser using kinetic theory of granular flow", Elsevier - Chemical Engineering Journal, vol. 95, pp. 1–13, 2003
- [10] P. A. Cundall and O. D. L. Strack, "A discrete numerical model for granular assemblies", Géotechnique, vol. 29, pp. 47-65, 1979
- [11] H. Kruggel-Emden, E. S imsek, S. Rickelt, S. Wirtz and V. Scherer, "Review and extension of normal force models for the Discrete Element Method", Elsevier-Powder Technonology, vol. 171, pp. 157–173, 2007
- [12] K.-F. Malone and B.-H. Xu, "Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems", Elsevier - Particuology, vol. 6, pp. 521–528, 2008
- [13] C. Kloss, C. Goniva, A. Hager, S. Amberger and S. Pirker, "Models, algorithms and validation for opensource DEM and CFD-DEM", Progress in Computational Fluid Dynamics, vol. 12, pp. 140-152, 2012
- [14] S. Stankovic, N. Campbell and A. Harries. Urban wind energy, UK, London: Earthscan, 2009.
- [15] T.-J. Chang, Y.-T. Wu, C.-R. Chu, H.-Y. Hsu and C.-M. Liao, "Assessment of wind characteristics and wind turbine characteristics in Taiwan", Elsevier-Renewable Energy, vol. 28, pp. 851-871, 2003
- [16] J.-L. Menet, "Adouble-step Savonius rotor for local production of electricity: a design study", Elsevier-Renewable Energy, vol. 29, pp. 1843–1862, 2004
- [17] K. L. Johnson. Contact mechanics, Cambridge, Great Britain: Cambridge University Press, 1985.
- [18] A. C. Fischer-Cripps. Introduction to Contact Mechanics, New York, USA: Springer, 2007.

[19] J. T. M. Hosson, C. A. Brebbia and S.-I. Nishida. Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Effects and Contact Mechanics VIII, Southampton, UK: WIT Press, 2007.

[20] H. Tomlinson and G. G. Stokes, "The Coefficient of Viscosity of Air", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 177, pp. 767-799, 1886



Juan Diego Jijón.- Nació en Quito, Ecuador en 1984. Recibió su título de Físico en Quito en la Escuela Politécnica Nacional en 2012. Actualmente, se encuentra realizando sus estudios de posgrado en la Escuela Politécnica Nacional en Diseño y Simulación. Sus campos de investigación están relacionados con Energías Renovables, Eficiencia Energética, Aplicaciones de Física de Láseres y Simulación con Elementos Finitos.



Santiago Andrés Pullaguari Armas.- Nació en Quito en 1988. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional en 2015. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Masterado en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, en la Facultad de Ingeniería Mecánica, y su campo de investigación se encuentra relacionado con el Diseño y Simulación Mecánica.



Verónica Patricia Granja Novoa.- Nació en Quito en 1991. Recibió su título de Ingeniera Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional en 2015. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Maestría en la Escuela Politécnica Nacional, en Diseño y Simulación, y su campo de investigación se encuentra relacionado con la Biomécanica.



Ximena Jhoana Sánchez Miranda. - Nació en Riobamba en 1990. Recibió su título de Ingeniera en Petróleos de la Escuela Politécnica Nacional en 2015. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Máster en la Escuela Politécnica Nacional, en Diseño y Simulación, y su campo de investigación se encuentra relacionado con los Elementos Finitos, Simulación, Biomecánica y Pedagogía.



Adriana Victoria Salazar Escobar.- Nació en Ambato en 1989. Recibió su título de Ingeniera Mecánica de la Politécnica Nacional en 2015. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Maestría en la Universidad de Quito, en la Escuela Politécnica Nacional, y su campo de desarrollo profesional se encuentra relacionado con el área de ingeniería, proyectos y desarrollo productivo en la industria.



Juan Carlos Segovia Sánchez.- Nació en Ibarra, Ecuador en 1992. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Escuela Politécnica Nacional en 2016. Actualmente, se encuentra cursando sus estudios de Maestría en Diseño y Simulación, en la Escuela Politécnica

Nacional, y su campo de investigación se encuentra relacionado con a los Procesos de Manufactura, Nuevos Materiales y Elementos Finitos.

Evaluación del Uso de Tierra de Diatomeas Provenientes del Proceso de Blanqueo de Aceite de Palma para la Elaboración de Materiales de Cambio de Fase

K. Acurio ⁽¹⁾, A. Chico-Proañó ⁽²⁾, Javier Martínez-Gómez ⁽³⁾, M. Orozco ⁽⁴⁾

⁽¹⁾⁽²⁾ *Departamento de Ingeniería Química, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 170517, Ecuador
(593) 984 338 280 E-mail: karen.acurio@epn.edu.ec*

⁽³⁾ *Universidad Internacional SEK Ecuador; Quito EC170134, Quito, Ecuador*

⁽³⁾⁽⁴⁾ *Instituto de Eficiencia Energética y Energías Renovables*

Abstract

In this study, different calcination conditions of temperature (400, 550 and 700 °C) and time (1 and 2 h) of the diatomaceous earth generated as an industrial waste during the palm oil bleaching process were evaluated for its later use as support material for PCMs (phase change materials). The PCMs consisted of a support material (new, used and calcined diatomite) and an organic phase (palm oil and commercial stearic acid esters in different proportions). The latent heat of fusion of the PCMs was analyzed by DSC (Differential Scanning Calorimetry), and the PCMs having the highest value and a range of temperature of phase change close to the thermal comfort were selected. Additionally, DSC, thermogravimetry and infrared spectrometry with Fourier transform at 0, 120, 240 and 360 thermal cycles were performed to determine the thermal and chemical stability of the PCMs. The best calcination conditions were 700 °C and 1 h. It was determined that PCMs containing 100% of commercial stearic acid esters and impregnated into new, used and calcined diatomaceous earth present higher values of latent heat of fusion (66.27, 19.34 and 34.67 J/g); respectively. Consequently, it was established that the use of calcined earth allows the increase of latent heat of fusion in 56.5%, and the PCMs supported in new and calcined diatomite have can be used for energy storage in buildings because of their thermal and chemical stability.

Resumen

En la presente investigación se evaluaron diferentes condiciones de temperatura (400, 550 y 700 °C) y tiempo (1 y 2 h) de calcinación de la tierra de diatomeas residuo del proceso de blanqueo de aceite de palma, para su uso como material de soporte para PCMs (materiales de cambio de fase). Los PCMs consistieron en un material de soporte tierra de diatomeas (nueva, usada y calcinada) y una fase orgánica (ésteres de aceite de palma y de ácido esteárico comercial en diferentes proporciones). El calor latente de fusión de los PCMs se analizó mediante DSC (Calorimetría Diferencial de Barrido) y, se seleccionaron los PCMs que presenten un mayor valor de dicho parámetro y un rango de temperatura de cambio de fase cercano al de confort térmico. Adicionalmente, se realizaron análisis DSC, termogravimetría y espectrometría de infrarrojo con transformada de Fourier a los 0, 120, 240 y 360 ciclos térmicos para determinar la estabilidad térmica y química de los PCMs. Las mejores condiciones de calcinación fueron 700 °C y 1 h. Adicionalmente, se determinó que los PCMs que contienen 100% de ésteres de ácido esteárico comercial presentan valores mayores de calor latente de fusión (66,27; 19,34 y 34,67 J/g) cuando son soportados en tierra nueva, usada y tratada térmicamente; respectivamente. Finalmente, se estableció que el uso de tierra calcinada permite el incremento del calor latente de fusión en un 56,5% y los PCMs soportados en tierra nueva y calcinada son ser empleados para almacenamiento energético en edificaciones debido a su estabilidad térmica y químicamente.

Index terms— Diatomite, phase change materials, fatty acid esters, calcination.

Palabras clave— Tierra de diatomeas, materiales de cambio de fase, ésteres de ácidos grasos, calcinación.

Recibido: Colocar fecha de envío (Ej: 15-07-2016), Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial
Forma sugerida de citación: Colocar Primer Apellido y la inicial del nombre de todos los autores Ej: Peterchev, A.; Handel, G. (2017). Nombre del trabajo técnico entre comillas. El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la demanda energética requerida para mantener condiciones de confort térmico en edificaciones ha crecido continuamente, debido al incremento de usuarios y al ingreso de más sistemas de acondicionamiento de aire en el mercado [1].

La energía, requerida para el funcionamiento de los sistemas de acondicionamiento de aire, se obtiene principalmente de combustibles fósiles [2]. Sin embargo, el uso de combustibles fósiles como fuente de energía representa una constante preocupación medioambiental, ya que su uso está asociado con la emisión de gases de efecto invernadero, los mismos que contribuyen al cambio climático y la contaminación ambiental [3].

La utilización de fuentes de energía renovable, tales como los sistemas de almacenamiento de energía térmica, disminuye la dependencia en el uso de combustibles fósiles; ya que, permiten reducir el consumo de energía asociada al uso de sistemas de acondicionamiento de aire en edificaciones [4]. Dentro de estos sistemas, se encuentran los materiales de cambio de fase o de almacenamiento de calor latente (PCMs).

El uso de PCMs en edificaciones requiere de materiales que presenten rangos de temperatura de cambio de fase correspondientes con el rango de confort térmico (18 – 30 °C) [5], y que además, presenten valores de calor latente de fusión elevados. En tales condiciones, un PCM puede mejorar el nivel de confort térmico en las instalaciones, al disminuir el nivel de fluctuaciones de temperatura en edificaciones [3,6]. La estabilidad química y térmica de un PCM se evidencia cuando la estructura química y las propiedades térmicas (calor latente de fusión y rango de temperaturas de cambio de fase) del material no presentan cambios luego de la aplicación de ciclos térmicos.

En los últimos años, varios materiales orgánicos e inorgánicos han sido estudiados como potenciales PCMs con aplicaciones en edificaciones [7]. La mayoría de PCMs disponibles en el mercado para dicha aplicación son sales inorgánicas y parafinas (hidrocarburos) no biodegradables, siendo la barrera para su implementación su costo y disponibilidad a gran escala [8,9]. Según Rozanna et al. (2004), los ésteres de ácidos grasos constituyen una alternativa a los PCMs comerciales [10]. Estos materiales presentan buena estabilidad química, no son tóxicos, ni corrosivos, provienen de fuentes renovables y además, en su estado líquido poseen una tensión superficial suficiente para ser retenidos en materiales de soporte.

Por lo general, los PCMs son encapsulados en materiales porosos, fibras, microcápsulas y macrocápsulas, con la finalidad de mantener su fase líquida retenida durante el proceso de fusión [11]. El uso de matrices poliméricas para el encapsulamiento de

PCMs crea una alta resistencia térmica debido a que durante el proceso de fusión-solidificación quedan espacios que son ocupados por aire [9,12]. Por otro lado, varias investigaciones han sido reportadas en trabajos previos, en torno a la preparación de PCMs incorporados en materiales porosos [1,6,13,14,15,16]. Estos materiales impiden la pérdida de la fase líquida cuando se alcanza el punto de fusión. De acuerdo con Fleischer (2015), los PCMs de forma estabilizada presentan mayor calor específico y calor latente para la región de temperatura de transición de fase y una mayor conductividad térmica, comparada con los PCMs encapsulados [9]. Además, los PCMs estabilizados en soportes porosos no requieren de contenedores y el volumen del material no cambia a pesar de que el cambio de fase no es visible, a diferencia de los PCMs encapsulados [14].

Adicionalmente, Jeong et al. (2013) determinaron que la incorporación de los PCMs en materiales porosos, empleando vacío, permite mejorar las propiedades térmicas de los PCMs y alcanzar una mejor impregnación de la fase orgánica en la superficie porosa del material. Estas ventajas hacen a este tipo de PCMs, materiales de almacenamiento de energía viables para su uso en edificaciones [6,13]. Sin embargo, para disminuir los costos de dichos materiales se requiere que provengan de fuentes abundantes y que no requieran de mayor procesamiento para su uso como PCMs [17].

La diatomitea posee una variedad de propiedades únicas; entre ellas, una estructura de elevada porosidad (80 – 90 %), termoestabilidad, baja densidad, elevada pureza, excelente capacidad de absorción, es químicamente inerte y un costo relativamente bajo [1]. Dichas propiedades posibilitan el uso de tierra de diatomeas como material de soporte de PCMs [14].

Actualmente, la tierra de diatomeas es usada principalmente en la decoloración o blanqueo de aceites comestibles. Dichas tierras representan un desecho industrial puesto que son usadas solamente una vez y posteriormente, se disponen en escombreras o rellenos sanitarios. Por este motivo, su disposición final implica un costo para quienes la emplean [19]. Además, debido a que este residuo tiene entre un 20 y 40 % de aceite vegetal, así como, de compuestos tóxicos (aldehídos y cetonas) provocan contaminación al suelo [20].

Existen algunas alternativas para la disposición de las tierras de blanqueo residuales; entre las que se pueden mencionar la regeneración térmica o con solventes, incineración, su utilización en la industria de la producción de ladrillo y bloques, su uso en biodigestores, utilización en plantas de tratamiento de aguas, su uso como aditivo para balanceado, entre otros [21]. En Ecuador, se produjeron 556 000 t de aceite de palma en 2016 [22] y para su refinación se emplearon hasta 5 000 t de tierras de blanqueo. La tierra de diatomeas residuo del proceso de blanqueo no recibe

tratamiento en el país y son un residuo sin valor agregado que debe finalmente disponerse en rellenos sanitarios. Debido a que este residuo actualmente no tiene valor económico alguno, las tierras de diatomeas usadas pueden ser empleadas como material de soporte de bajo costo para PCMs [9,14].

La regeneración de tierras de diatomeas puede realizarse con procesos térmicos, extracción con solventes o una combinación de ambos [19]. En los procesos combinados se trabaja con temperaturas en el rango de 400 a 600 °C, y una posterior extracción de los compuestos orgánicos, presentes en las tierras de blanqueo, mediante solventes como hexano, acetona, percloroetileno, etc. [18]. Sin embargo, para la regeneración de la tierra de diatomeas, por calcinación directa, se deben emplear temperaturas superiores a los 600 °C que aseguren la eliminación de los componentes orgánicos presentes en la tierra de diatomeas [20].

Cabe recalcar que no se tiene información sobre el uso de tierra de diatomeas provenientes del proceso de blanqueo de aceite, como material de soporte para la elaboración de materiales de cambio de fase. Así como tampoco, del uso de ésteres provenientes de aceite de palma crudo para dicha finalidad. En este sentido, el presente estudio busca proporcionar información inicial sobre la elaboración de materiales de cambio de fase (PCMs) a partir de residuos de la industria de extracción de aceite de palma, que actualmente no tienen valor económico.

2. MÉTODOS

En el presente trabajo se elaboraron PCMs compuestos por un material de soporte y una fase orgánica. Como material de soporte de los PCMs, se emplearon tierra de diatomeas nueva, tierra de diatomeas residuo del proceso de blanqueo de aceite de palma (tierras usadas) y tierra usada tratada térmicamente. En cuanto a la fase orgánica del PCM, se utilizaron mezclas de ésteres de aceite de palma y de ácido esteárico comercial en distintas proporciones.

2.1. Caracterización de la materia prima

El aceite de palma que se utilizó en la presente investigación fue proporcionado por la empresa Hermanos Muñoz, localizada en el cantón La Concordia, Ecuador, en una cantidad de 10 L correspondientes a un mismo lote de producción. Por otra parte, una industria procesadora de aceite de palma local, proporcionó 30 kg de tierra de diatomeas residuo del proceso de blanqueo de dicho aceite.

2.1.1 Obtención de ésteres de aceite de palma y ácido esteárico

Para la obtención de ésteres de aceite crudo de palma y de ácido esteárico comercial, se llevó a cabo un proceso de esterificación directa. Para esto, se empleó metanol y ácido sulfúrico como catalizador en un 2% en peso con respecto a la masa de reactantes. Para incrementar la conversión, se empleó una relación molar 1:10 entre el ácido graso y el metanol. El proceso se realizó a una temperatura de 55,0 °C y un tiempo de reacción de 5 h [23].

2.1.2 Caracterización de los ésteres de aceite de palma y del ácido esteárico

Se caracterizaron los ésteres de aceite de palma y de ácido esteárico, mediante calorimetría diferencial de barrido (DSC) en un equipo de marca Q 2000 1714, TA. Se determinaron los rangos de temperatura de cambio de fase y el calor latente de fusión para cada uno de los ésteres obtenidos. Las mediciones se llevaron a cabo desde 0 a 60 °C, con una velocidad de calentamiento de 4 °C/min, bajo atmósfera inerte de nitrógeno con un flujo de 20 mL/min, según el procedimiento llevado a cabo por Xu et al. [11]. El rango de temperatura de cambio de fase correspondió desde la temperatura inicial (T onset) hasta la temperatura final (T end) determinadas por el equipo.

2.1.3 Caracterización de las tierras de diatomeas residuales

La tierra de diatomeas usada en el proceso de blanqueo de aceite de palma se caracterizó mediante un análisis proximal que consideró la determinación de humedad, contenido de cenizas, volátiles y carbono fijo [24]. Complementariamente, se determinó el contenido de aceite en la tierra de diatomeas usada. La humedad se determinó con base en la norma BS EN 18134-1: Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de humedad. Método de secado en estufa. Humedad total. Método de referencia [25]. La determinación del contenido de materia volátil y de cenizas se realizó de acuerdo con las normas BS EN 15148: Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de materia volátil y BS EN 18122: Biocombustibles sólidos. Determinación del contenido de cenizas, respectivamente [26,27].

Adicionalmente, el contenido de aceite en la tierra de diatomeas usada se determinó a través de una extracción con solvente de acuerdo con el procedimiento descrito por Haro et al. (2014) [18]. La cantidad de aceite retenido se determinó por gravimetría con el peso de la muestra antes y después de la extracción.

2.2. Preparación de materiales de cambio de fase

2.2.1 Calcinación de las tierras de diatomeas usadas

Los factores experimentales considerados para la regeneración de la tierra de diatomeas residual fueron la temperatura de calcinación en tres niveles (400, 550 y 700 °C) y el tiempo de calcinación en dos niveles (1 y 2 h). Los ensayos de calcinación se realizaron en una mufla eléctrica por triplicado ($n=3$).

La variable de respuesta se calculó mediante la Ecuación (1) y correspondió al porcentaje de impregnación de ésteres de aceite de palma en la tierra de diatomeas calcinada a diferentes condiciones de temperatura y tiempo [14]:

$$\% \text{Impregnación} = m_1 / (m_2 + m_3) \times 100 \quad (1)$$

Donde:

m_1 : Masa total impregnada de la fase orgánica y del material de soporte final (g)

m_2 : Masa de la mezcla de ésteres empleada (g)

m_3 : Masa del material de soporte empleada (g)

Los resultados del porcentaje de impregnación se analizaron estadísticamente, para encontrar las condiciones de tiempo y temperatura de calcinación que permitan aprovechar el uso de la tierra de diatomeas, residuales del proceso de blanqueo de aceite de palma, como material de soporte de los PCMs. De esta manera la tierra de diatomeas tratada térmicamente a las mejores condiciones se empleó en la elaboración de PCMs.

2.2.2 Preparación de los materiales de cambio de fase (PCMs)

Con base en el procedimiento que desarrollaron Jeong et al. (2013), se secaron cada uno de los materiales de soporte a 105 °C por 24 h antes de su uso. Adicionalmente, se siguió el procedimiento descrito por Xu et al. (2014), para la preparación de las mezclas de ésteres de aceite de palma (AP) y de ácido esteárico comercial (AEC) en 5 diferentes proporciones [11]. Para esto los componentes se pesaron en una balanza con una precisión de $\pm 0,1$ g, y se mezclaron con agitación magnética por 30 min a 50,0 °C.

Para la obtención de los PCMs se aplicó el método de impregnación al vacío, para lo cual se colocaron la tierra de diatomeas (nuevas, usadas y usadas tratadas térmicamente) en el interior de un matraz en exceso con respecto a la fase orgánica, el mismo que se conectó a una trampa de agua y a una bomba de vacío; se mantuvo una presión de vacío de 27 kPa por 30 min. La fase orgánica ingresó hacia el interior del matraz alcanzando la presión atmosférica y posteriormente, se mantuvo por 90 min la presión de vacío antes mencionada [1].

Para determinar la capacidad de almacenamiento de energía de cada PCM preparado se cuantificó el calor latente de fusión en cada caso. Para esto se realizaron

análisis de DSC por triplicado ($n=3$), a las mismas condiciones que se mencionaron en la sección 2.1.2.

Se seleccionó, de cada tipo de material de soporte, el PCM que presentó mayor calor latente de fusión y un rango de temperatura de cambio de fase cercano al rango de temperaturas de confort térmico (18 – 30) °C [5]. Para realizar los análisis estadísticos se usó del software estadístico Statgraphics Centurion XVI.

2.3. Evaluación del efecto de los ciclos térmicos

Para determinar la fiabilidad de los PCMs seleccionados en la sección 2.2.2 evaluó su estabilidad térmica y química antes y después de su exposición a los ciclos térmicos de calentamiento y enfriamiento (120, 240 y 360 ciclos). Para el calentamiento de los PCMs, se empleó una estufa que se mantuvo a 50 °C. Por otra parte, para el proceso de enfriamiento, se usó un refrigerador que se mantuvo a 8 °C, aproximadamente. Se seleccionaron estas temperaturas para asegurar que se alcancen tanto las temperaturas de fusión como de solidificación [30].

Para analizar la estabilidad térmica de los PCMs se realizaron análisis de DSC a las mismas condiciones detalladas en la sección 2.1.2 y análisis de termogravimetría en un equipo marca Shimadzu, TGA-5 en un rango de temperaturas de 25 a 600 °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C/min y un flujo de nitrógeno de 50 mL/min [1]. Por otro lado, para determinar la estabilidad química se empleó un espectrofotómetro de infrarrojo con transformadas de Fourier marca Perkin Elmer, Frontier en un rango de longitud de onda de 4 000 – 400 cm^{-1} y se compararon los espectros de los PCMs sin exposición y con exposición a los diferentes ciclos para identificar cambios químicos en el material producidos por el efecto de la degradación térmica [1].

Mediante la comparación de los análisis antes descritos se determinaron los PCMs más adecuados para la regulación de la temperatura en edificaciones en función de su estabilidad térmica y química [12].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la materia prima.

En la Fig. 1 se presentan las curvas DSC de fusión de los ésteres de aceite de palma y de los ésteres de ácido esteárico comercial. Se encontró que el rango de temperatura de cambio de fase corresponde a 0,6 – 43,0 °C y 16,4 – 35,7 °C; y valores de calor latente de fusión de 13,86 y 86,42 J/g, respectivamente.

El valor del calor latente de fusión de los ésteres de aceite de palma fue menor al de los ésteres de ácido esteárico comercial. Este comportamiento podría deberse a que el rango de temperaturas de estudio no incluyó valores como el de la temperatura de fusión del metil trans-9 elaidato (isómero del metil oleato) presente en los ésteres de aceite de palma (-36 °C)

[23]. Dicha temperatura no fue considerada debido a que el rango de temperatura de interés correspondió a valores cercanos al rango de temperaturas de confort térmico.

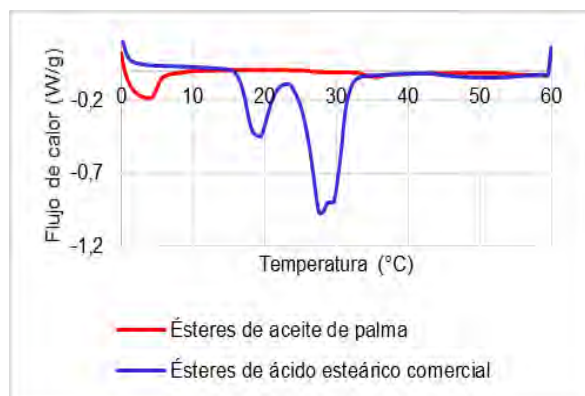


Figura 1. Curvas DSC de fusión del metil éster de aceite de palma y del metil éster de ácido esteárico comercial

Según Xu et al. (2014), al emplear mezclas de metil palmitato y metil estearato es posible alcanzar valores de calor latente de fusión superiores al de los compuestos puros (98%), y además, un rango de temperatura de cambio de fase cercano al de confort térmico [11]. Por lo tanto, se emplearon mezclas de dichos ésteres para la elaboración de PCMs que permitan alcanzar un rango de temperatura de cambio de fase que coincida con el de confort térmico (18 – 30 °C), un valor de calor latente de fusión en el rango de 17 a 120 J/g y que permita aprovechar el uso de materias primas de bajo costo obtenidas a partir de fuentes renovables, como el aceite de palma [5,12,17,23].

Adicionalmente, la tierra de diatomeas usada en el proceso de blanqueo de aceite de palma, presentó una humedad del 3,26 %; 55,68 % de cenizas; 0,49 % de carbono fijo y 40,67 % de volátiles (26,16 % de aceite retenido en sus poros y 14,51 % de impurezas adquiridas en el proceso). De acuerdo con lo establecido por O'Brien (2009), dichas impurezas podrían corresponder a fosfolípidos, carotenoides y trazas de metales.

Para aprovechar el uso de la tierra de diatomeas residual como material de soporte de PCMs fue necesario eliminar el contenido de humedad y materia volátil, de tal manera que se evite la disminución de la superficie disponible para ser ocupada por la fase orgánica en la elaboración de los PCMs debido a la presencia de agua y compuestos orgánicos [1,20].

3.2 Preparación de materiales de cambio de fase

En la Fig. 2 se evidencia que las mejores condiciones para el tratamiento térmico de regeneración

de la tierra de diatomeas residual, dentro de los rangos estudiados, corresponden a 700 ° C y 1 h. Estos resultados podrían explicarse, ya que al realizar tratamientos de regeneración térmica, sin un proceso previo de extracción de compuestos orgánicos con solventes, se requiere una temperatura mayor a 600 ° C para eliminar los componentes orgánicos retenidos.

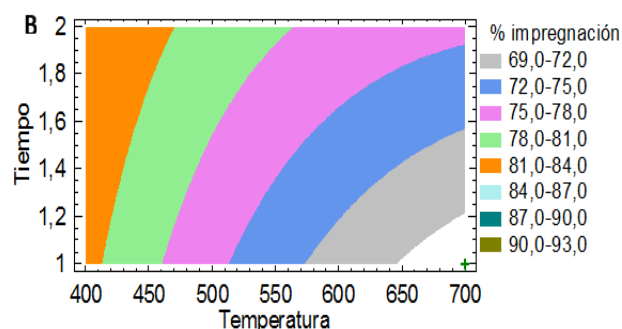


Figura 2. Gráfica de contornos para porcentaje de impregnación.

La exposición de la tierra de diatomeas residual, a temperaturas superiores a 500 ° C por tiempos prolongados podría causar la sinterización de los poros y por lo tanto la disminución de su capacidad de absorción [19,20].

Las condiciones seleccionadas permitieron alcanzar menor porcentaje de impregnación y por ende, aprovechar de mejor manera el uso de las tierras regeneradas como materiales de soporte. Esto debido a que se eliminaron los compuestos orgánicos retenidos en los poros de la tierra de diatomeas y permitieron retener una mayor cantidad de ésteres en una menor cantidad de material de soporte [18].

En la Fig. 3 se muestran los resultados de los análisis de DSC para evaluar el calor latente de fusión de los PCMs. El análisis estadístico muestra que todos los PCMs evaluados poseen valores de calor latente de fusión estadísticamente diferentes entre ellos ($p < 0,05$), debido a que las barras que representan la diferencia mínima significativa no se traslapan. Se evidencia que al emplear tierra de diatomeas nueva, como material de soporte, la energía que se podría almacenar depende casi de manera lineal y directa de la cantidad de ésteres de ácido esteárico presente en el PCM.

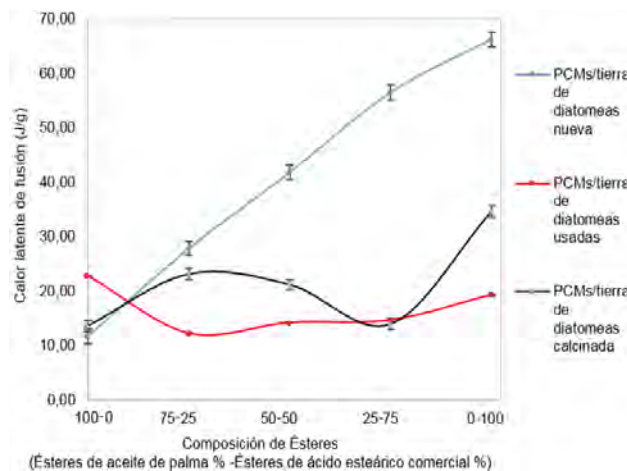


Figura 3. Gráfica de medias y diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher para los PCMs impregnados en tierra de diatomeas nueva, usada y tratada térmicamente, que evidencien la distribución del calor latente de fusión al emplear diferentes proporciones de ésteres de aceite de palma y de ésteres de ácido esteárico comercial.

En este tipo de soporte, al aumentar la cantidad de ésteres de ácido esteárico en la mezcla se observa un incremento lineal del calor latente de fusión. Esto se explicaría al considerar que los ésteres de ácido esteárico comercial presentaron un valor de calor latente de fusión superior al de los ésteres de aceite de palma.

Cuando el material de soporte corresponde a tierra de diatomeas usadas y tierras tratadas térmicamente no se mantiene una tendencia lineal. La tendencia no lineal, que presentan los valores de calor latente de fusión para los PCMs soportados en tierra de diatomeas usadas, se explicaría al considerar que dichas tierras contienen un 26,16% de aceite de palma retenido en sus poros. El aceite de palma retenido en la tierra de diatomeas pasó a formar parte de la fase orgánica de los PCMs y debido a la presencia de dichos ácidos grasos (oleico, palmítico, esteárico, entre otros) podrían causar la variación del calor latente de fusión como se evidenció en la Fig. 3 [28]. Además, la tendencia que se observa en la tierra de diatomeas calcinada, podría atribuirse a que en sus poros no se retuvo la misma cantidad de ésteres que en la tierra de diatomeas nueva debido a la disminución de la superficie porosa como resultado del tratamiento térmico aplicado [1,18,29].

En la Tabla 2 se observa que el rango de temperatura de cambio de fase es mayor en los ésteres de aceite de palma que en los ésteres de ácido esteárico comercial, estos resultados podrían deberse a que el aceite de palma esterificado se encuentra compuesto por diferentes ésteres de ácidos grasos cuyos puntos de fusión varían desde -36°C hasta 39°C [23]. Debido al rango de temperatura de cambio de fase que presentan dichos ésteres podrían ser aplicados en sistemas de refrigeración o en climas fríos [17].

Tabla 2. Rango de temperatura de cambio de fase y calor latente de fusión de los PCMs elaborados

Material de soporte	Composición ésteres de A.P-ésteres de A.E.C (%-%)	T_{onset} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{end} ($^{\circ}\text{C}$)	Calor latente de fusión (J/g)
Tierra de diatomeas nueva	100-0	$0,9 \pm 0,3$	$35,0 \pm 1,3$	$11,78 \pm 0,40$
	75-25	$10,8 \pm 0,2$	$17,9 \pm 1,5$	$27,87 \pm 0,65$
	50-50	$2,2 \pm 0,2$	$24,1 \pm 1,5$	$41,86 \pm 2,89$
	25-75	$19,2 \pm 1,0$	$30,9 \pm 0,7$	$56,52 \pm 2,57$
	0-100	$17,5 \pm 0,1$	$34,7 \pm 1,1$	$66,27 \pm 3,20$
Tierra de diatomeas usada	100-0	$3,4 \pm 0,4$	$26,3 \pm 0,5$	$22,82 \pm 0,04$
	75-25	$1,0 \pm 0,7$	$42,5 \pm 2,1$	$12,28 \pm 0,19$
	50-50	$9,4 \pm 0,7$	$41,3 \pm 1,4$	$14,26 \pm 0,33$
	25-75	$2,3 \pm 0,6$	$25,0 \pm 0,5$	$14,72 \pm 0,40$
	0-100	$10,4 \pm 0,1$	$25,7 \pm 0,9$	$19,34 \pm 0,20$
Tierra de diatomeas calcinada	100-0	$0,3 \pm 0,1$	$36,2 \pm 2,1$	$13,71 \pm 0,21$
	75-25	$12,3 \pm 0,7$	$26,3 \pm 0,9$	$23,21 \pm 2,88$
	50-50	$2,2 \pm 0,3$	$21,3 \pm 0,3$	$21,26 \pm 0,35$
	25-75	$2,2 \pm 0,4$	$16,9 \pm 2,43$	$14,01 \pm 0,46$
	0-100	$16,4 \pm 0,4$	$33,5 \pm 0,56$	$34,67 \pm 2,56$

Por otro lado, el valor del calor latente de fusión es mayor, cuando se emplea 100% de metil ésteres de ácido esteárico comercial, para los PCMs soportados en tierra de diatomeas nueva y calcinada, y cuando se emplea 100 % de metil ésteres de aceite de palma para los PCMs soportados en tierras usadas. Sin embargo, como se observa en la Tabla 2 el rango de temperatura de cambio de fase para este último caso no coincide con el de confort térmico. Por lo que su uso no sería el más adecuado en edificaciones, debido a que al emplear PCMs con un rango de temperaturas de cambio de fase mayor y que no se ajuste al de confort térmico podría disminuir la capacidad de almacenar energía del material, ya que a temperaturas inferiores a las de operación ya habría iniciado el proceso de fusión y por ende la cantidad de energía requerida para alcanzar el estado líquido total sería menor [9,11]. Por lo tanto, se seleccionaron los PCMs, cuya fase orgánica corresponde al 100 % de ésteres de ácido esteárico comercial, soportados en cada uno de los materiales evaluados (tierra de diatomeas nueva, usada y calcinada).

3.3 Evaluación del efecto de ciclos térmicos

Para determinar la aplicabilidad de los PCMs como sistemas de almacenamiento de energía térmica se aplicaron ciclos de calentamiento y enfriamiento, y se analizó la estabilidad térmica, mediante análisis DSC y TGA, y la estabilidad química, mediante análisis FT-IR, de los PCMs (100 % de ácido esteárico comercial) seleccionados en la sección 3.2 [30].

Las curvas de fusión de los análisis DSC de los PCMs impregnados sobre tierra de diatomeas nueva, usada y calcinada, se presentan en la Fig. 4.A, 4.B y 4.C, respectivamente. En todos los casos, al cabo de 360 ciclos térmicos, se evidencia un incremento en el área de la curva que representa la magnitud del calor latente de fusión [7]. Este comportamiento se explicaría al considerar que durante la aplicación de los ciclos

térmicos se propiciaron las condiciones de temperatura que facilitan el proceso de cristalización de los ésteres. Este proceso podría producir el incremento en el valor del calor latente de fusión de los PCMs evaluados (Mandelkern, 2004). Dicho incremento podría permitir que el material absorba una mayor cantidad de energía en una menor masa del mismo, facilitando el establecimiento de condiciones de confort térmico en edificaciones [12]. Para los PCMs impregnados en tierra de diatomeas calcinada, el incremento en el calor latente después de la aplicación de los 360 ciclos térmicos es del 54,80 % respecto al valor inicial, frente al 10,19 y 35,73 % que se evidencia en los PCMs impregnados en tierra de diatomeas nueva y usada, respectivamente. Por otra parte, la variación en los rangos de temperatura de fusión son mínimos para los tres casos ya que las curvas no presentan desplazamiento horizontal. Sin embargo, para establecer la causa del incremento en el calor latente de fusión se analizaron los cambios en las estructuras químicas de los PCMs [11].

de la fase orgánica del material poroso; ya que a 100 °C que es una temperatura superior a la temperatura de cambio de fase de los PCMs no existe pérdida de la fase orgánica [1]. Esto indica que los PCMs analizados son estables térmicamente y pueden ser usados como sistemas de almacenamiento de energía [16].

Los análisis FT-IR se presentan en las Fig. 5.A y 5.B. Se observa que los picos tanto de la tierra de diatomeas nuevas y calcinadas, como del éster se mantienen luego del proceso de impregnación. Sin embargo, para los PCMs soportados en tierra de diatomeas usada, existen desplazamientos de los picos luego del proceso de impregnación. Particularmente, de 539 a 525 cm^{-1} y de 1 045 a 1 095 cm^{-1} ; la causa de estos desplazamientos se le podría atribuir a la presencia de aceite crudo de palma, retenido en los poros de la tierra de diatomeas, que produce interacciones tanto con el material de soporte como con la fase orgánica del PCM (Silva et al., 2013). Por lo tanto, se determinó que

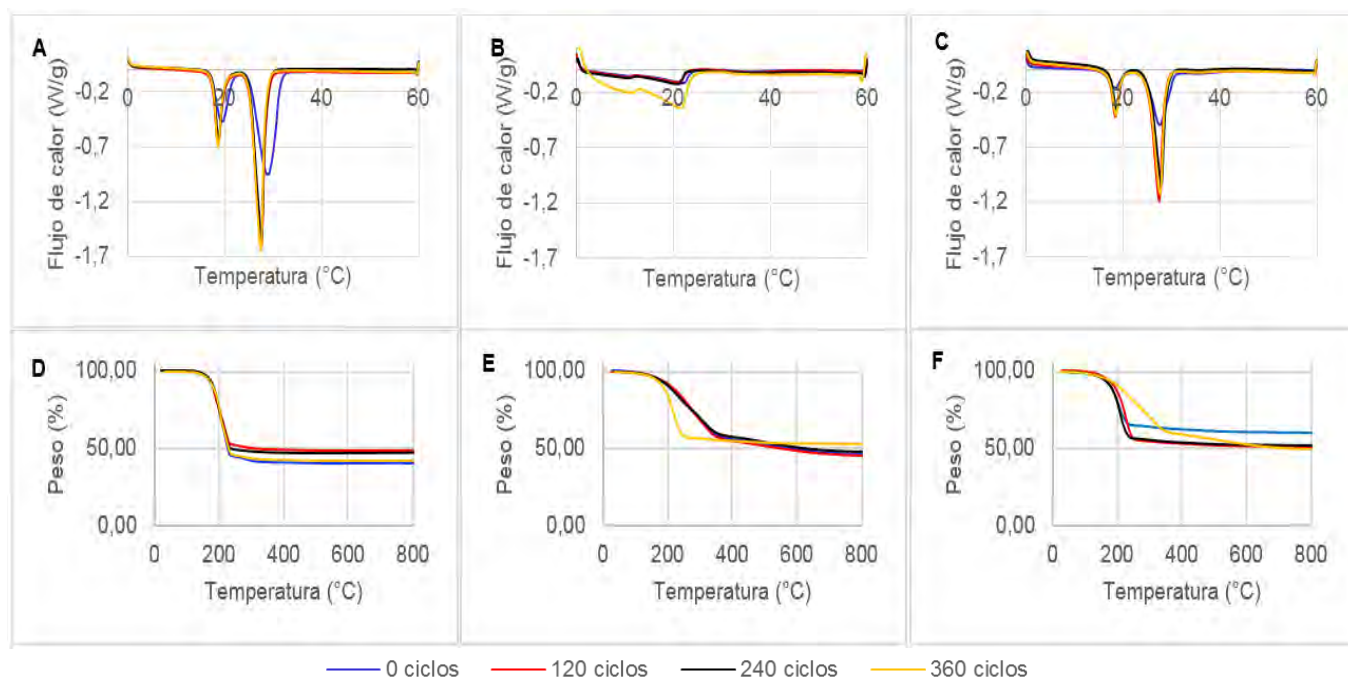


Figura 4. Resumen de resultados de los análisis térmicos. Curvas DSC de fusión de los PCMs soportados en (A) tierra de diatomeas nueva, (B) tierra de diatomeas usadas, (C) tierra de diatomeas calcinada. Termograma de los PCMs soportados en (D) tierra de diatomeas nueva, (E) tierra de diatomeas usadas, (F) tierra de diatomeas calcinada., usando 100 % de ésteres de ácido esteárico comercial.

Por otra parte, mediante los análisis termogravimétricos, se determinó que los PCMs no presentan degradación a bajas temperaturas, como se puede ver en la Fig. 4.C, 4.D y 4.E; ya que la pérdida de masa, cuando los PCMs fueron expuestos a un calentamiento desde la temperatura ambiente hasta una temperatura aproximada de 100 °C, fue menor al 2 %. De acuerdo con lo establecido por Rathod y Banerjee (2013), esta pérdida de peso podría deberse a la pérdida de la humedad presente en los PCMs. Para los tres casos evaluados se evidenció que no existe desprendimiento

no existe interacción química entre el material de soporte y la fase orgánica, al impregnar los ésteres sobre la tierra de diatomeas nueva y calcinada [1].

Adicionalmente, se observa que tanto los PCMs constituidos por tierra de diatomeas nueva como por tierra de diatomeas calcinada presentan estabilidad química, ya que los picos que presentan los espectrogramas, antes y después de la aplicación de los ciclos térmicos, coinciden. Para la tierra de diatomeas usadas se evidencia el apareamiento de un pico a 792 cm^{-1} que se le atribuye al grupo O-H y el

desplazamiento de $1\,045$ a $1\,096\text{ cm}^{-1}$ que para ambos casos corresponden a la vibración del enlace Si-O-Si [12]. Sin embargo, dichos picos corresponden a enlaces presentes en la tierra de diatomeas nueva y calcinada, por lo que la estabilidad química de los PCMs soportados en tierra de diatomeas usada no se ve afectada con la aplicación de los ciclos térmicos.

Con base en los resultados obtenidos anteriormente, se encontró que las tierras de diatomeas residuales podrían emplearse como materiales de soporte en la elaboración de PCMs, si las mismas son calcinadas. El proceso de calcinación facilita la acción de los agentes de nucleación y cristalización que permiten mejorar las propiedades térmicas de los PCMs; específicamente, el incremento del calor latente de fusión y la resistencia a la degradación térmica, a medida que transcurren los ciclos de calentamiento-enfriamiento. Adicionalmente, se eliminan los inconvenientes del uso de tierra de diatomeas usadas, sin tratamiento térmico, como desprendimiento de la fase orgánica durante la aplicación de los ciclos térmicos y la reducción de su resistencia a la degradación térmica.

Figura 5. (A) Espectro FT-IR del PCM/diatomita nueva, (B) Espectro FT-IR del PCM/diatomita usada y (C) Espectro FT-IR del PCM/diatomita calcinada antes y después de la aplicación de 0, 120, 240 y 360 ciclos térmicos, usando 100 % de ésteres de ácido esteárico comercial.

4. CONCLUSIONES

La tierra de diatomeas residuo del proceso de blanqueo de aceite de palma calcinada, es un potencial material de soporte para la elaboración de PCMs.

Las mejores condiciones de temperatura y tiempo de calcinación de las tierras de diatomeas residuo del proceso de blanqueo de aceite fueron $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ y 1 h, con un porcentaje de impregnación del 71,83%.

El uso de la tierra de diatomeas residual permite el incremento del calor latente de fusión en un 54,80% y el aumento de la resistencia a la degradación térmica.

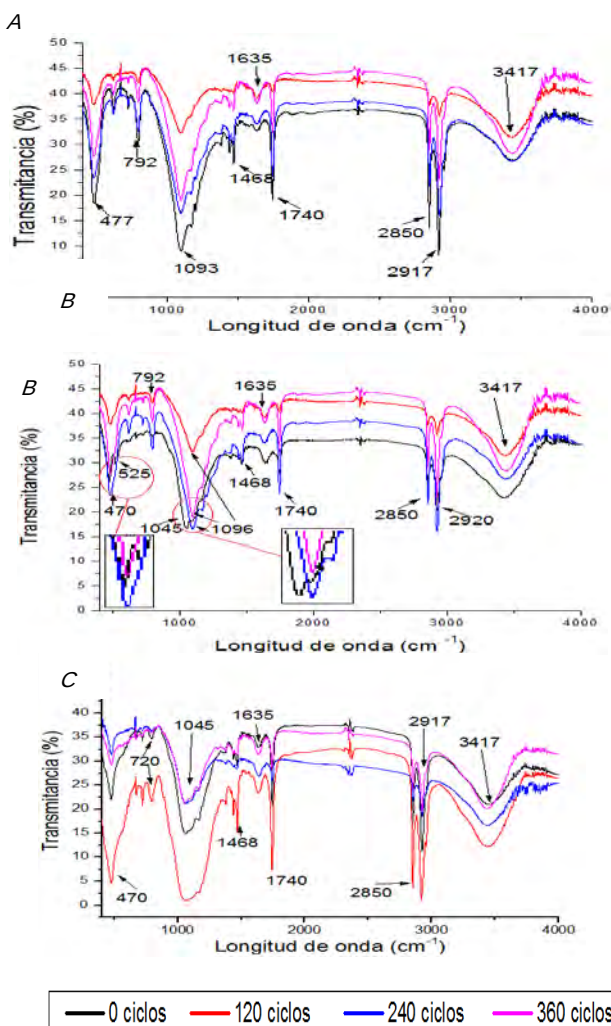
Los PCMs con el mayor contenido de ésteres de ácido esteárico comercial presentaron mayor capacidad de almacenamiento de energía en el rango de temperaturas de confort.

AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan un agradecimiento especial al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) y a la Escuela Politécnica Nacional por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Jeong, S. G., Jeon, J., Lee, J. H., y Kim, S. (2013). Optimal preparation of PCM/diatomite composites for enhancing thermal properties. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62(1), 711–717. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.03.043>
- [2] Sharifi, N. P., Aadil, A., Shaikh, N., y Sakulich, A. R. (2016). Application of Phase Change Materials in Gypsum Boards to Meet Building Energy Conservation Goals. *Energy & Buildings*. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.046>
- [3] Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., Pérez, G., y Cabeza, L. F. (2010). Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling. *Energy and Buildings*, 42(4), 534–540. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.022>
- [4] Tyagi, V. V., Kaushik, S. C., Tyagi, S. K., y Akiyama, T. (2011). Development of phase change materials based microencapsulated technology for buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(2), 1373–1391. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.10.006>
- [5] Peeters, L., de Dear, R., Hensen, J., y D'haeseleer, W. (2009). Thermal comfort in residential buildings: Comfort values and scales for building energy simulation. *Applied Energy*, 86(5), 772–780. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.07.011>
- [6] Li, M., Wu, Z., y Kao, H. (2011). Study on preparation and thermal properties of binary fatty acid/diatomite shape-stabilized phase change materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(8), 2412–2416. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.04.017>
- [7] Rathod, M. K., y Banerjee, J. (2013). Thermal stability of phase change materials used in latent heat energy storage systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 18, 246–



258. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.10.022>
- [8] Cabeza, L. F., y Mehling, H. (2003). Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Applied Thermal Engineering* (Vol. 23). [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00192-8](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00192-8)
- [9] Fleischer, A. S. (2015). Thermal Energy Storage Using Phase Change Materials Fundamentals and Applications. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-20922-7>
- [10] Rozanna, D., Chuah, T. G., Salmiah, A., Choong, T., y Sa'ari, M. (2004). Fatty Acids as Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Energy Storage: A Review. *International Journal of Green Energy*, 1(4), 495–513. <https://doi.org/10.1081/GE-200038722>
- [11] Xu, S., Zou, L., Ling, X., Wei, Y., y Zhang, S. (2014). Preparation and thermal reliability of methyl palmitate/methyl stearate mixture as a novel composite phase change material. *Energy and Buildings*, 68(1), 372–375. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.09.038>
- [12] Sari, A., y Karaipekli, A. (2012). Fatty acid esters-based composite phase change materials for thermal energy storage in buildings. *Applied Thermal Engineering*, 37, 208–216. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.017>
- [13] Karaman, S., Karaipekli, A., Sar, A., y Bicer, A. (2011). Polyethylene glycol (PEG)/diatomite composite as a novel form-stable phase change material for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(7), 1647–1653. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.022>
- [14] Qian, T., Li, J., Min, X., Deng, Y., Guan, W., y Ning, L. (2015). Diatomite: A promising natural candidate as carrier material for low, middle and high temperature phase change material. *Energy Conversion and Management*, 98, 34–45. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.071>
- [15] Fu, X., Liu, Z., Xiao, Y., Wang, J., y Lei, J. (2015). Preparation and properties of lauric acid/diatomite composites as novel form-stable phase change materials for thermal energy storage. *Energy and Buildings*, 104, 244–249. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.059>
- [16] Fang, G., Li, H., Chen, Z., y Liu, X. (2011). Preparation and properties of palmitic acid/SiO₂ composites with flame retardant as thermal energy storage materials. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 95(7), 1875–1881. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2011.02.010>
- [17] Cabeza, L. F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A., y Fernández, A. I. (2011). Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1675–1695. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.018>
- [18] Haro, C., De la Torre, E., Aragón, C., y Guevara, A. (2014). Regeneración de Arcillas de Blanqueo Empleadas en la Decoloración de Aceites Vegetales Comestibles, 34(1), 42–49. Obtenido de: <http://www.revistapolitecnica.epn.edu.ec/index.php/volumenes-hidden/50-volumen-34-nol> (Febrero, 2017).
- [19] Foletto, E. L., Alves, C. C. A., Sganzerla, L. R., y Porto, L. M. (2002). Regeneration and Utilization of Spent Bleaching Clay. *Latin American applied research*, 32 (2), 205–208. Obtenido de: http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0327-79322002000200014&lng=en&tng=en (Febrero, 2017).
- [20] Alhamed, Y. A., y Al-Zahrani, A. A. (2002). Regeneration of Spent Bleaching Clay Used in Edible Oil Refining in Saudi Arabia. The 6th Saudi Engineering Conference. Obtenido de: https://www.researchgate.net/profile/Yahia_Alhamed/publication/n/26581999 (Febrero, 2017).
- [21] Tsai, W. T., Chen, H. P., Hsieh, M. F., Sun, H. F., y Chien, S. F. (2002). Regeneration of spent bleaching earth by pyrolysis in a rotary furnace. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 63(1), 157–170. [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(01\)00150-4](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(01)00150-4)
- [22] FEDAPAL. (2017). Ecuador: Producción, consumo y excedentes de aceite de palma. Obtenido de: <http://fedapal.com/web/index.php/joomla/estadisticas-nacionales> (Febrero, 2017)
- [23] Suppes, G. J., Goff, M. J., y Lopes, S. (2003). Latent heat characteristics of fatty acid derivatives pursuant phase change material applications. *Chemical Engineering Science*, 58(9), 1751–1763. [https://doi.org/10.1016/S0009-2509\(03\)00006-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2509(03)00006-X)
- [24] Parikh, J., Channiwala, S., y Ghosal, G. (2005). A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels. *Fuel*, 84(5), 487–494. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2004.10.010>
- [25] British Standards Institution - BSI. (2009). Solid biofuels. Determination of moisture content. Oven dry method. Total moisture. Reference method. BS EN 18134-1: 2015.
- [26] British Standards Institution - BSI. (2009). Solid biofuels - Determination of the content of volatile. BS EN 15148: 2009.
- [27] British Standards Institution - BSI. (2015). Solid biofuels. Determination of ash content. BS EN 18122: 2015.
- [28] Cedeño, F. O., Prieto, M. M., Espina, A., y García, J. R. (2001). Measurements of temperature and melting heat of some pure fatty acids and their binary and ternary mixtures by differential scanning calorimetry. *Thermochimica Acta*, 369(1–2), 39–50. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(00\)00752-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(00)00752-8)
- [29] O'Brien, R. (2009). *Fats and Oils: Formulating and Processing for Applications*. (3era ed.). New York: CRC Press
- [30] Shukla, A., Buddhi, D., y Sawhney, R. L. (2008). Thermal cycling test of few selected inorganic and organic phase change materials. *Renewable Energy*, 33(12), 2606–2614. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.02.026>



Karen Acurio Cerda.- Nació en Pujilí y creció en Quito, Ecuador. Culminó sus estudios de pregrado en Ingeniería Química en la Escuela Politécnica Nacional en el año 2017. Actualmente, se desempeña como docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

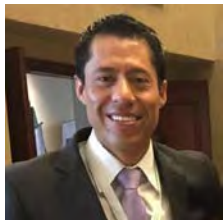


Andrés Chico Proaño.- Nació en Quito, Ecuador. Realizó sus estudios de pregrado en Ingeniería Química en la Escuela Politécnica Nacional y de posgrado en la Universidad de Surrey-Inglatera, en donde obtuvo la Maestría en Ingeniería de Procesos y Sistemas Ambientales. Actualmente, se desempeña como docente investigador de la Escuela Politécnica Nacional.



Javier Martínez Gómez.- Nació en 1983 y creció en Madrid. Licenciado en Ingeniería Industrial por la Universidad Carlos III de Madrid en 2008. MSc en Ingeniería

de Materiales por la Universidad Carlos III de Madrid en 2010. Doctorado en Ingeniería de Materiales por la Universidad Carlos III de Madrid en 2013 Trabajó como investigador de doctorado en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) desde 2016.



Marco Orozco Salcedo.- Nació en Tulcán y creció en Quito, Ecuador. Realizó sus estudios de pregrado en Ingeniería Automotriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas y de posgrado en la Escuela Politécnica Nacional en la

Maestría de Diseño, Producción y Automatización Industrial. Actualmente, se desempeña como Analista Técnico del Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables. Tiene experiencia en el desarrollo de proyectos de Eficiencia Energética y Energías Renovables.

Intermodal transport project for sustainable mobility plan in Ambato

Proyecto de Transporte Intermodal para generar una Movilidad Sustentable, caso de estudio Ciudad de Ambato

K.A. Latorre¹

D.A. Haro²

¹ Escuela Superior Politécnica de Chimborazo University, Riobamba, Ecuador
E-mail: katyta91_l@hotmail.com

² Escuela Superior Politécnica de Chimborazo University, Riobamba, Ecuador
E-mail: diegoharoavalos@yahoo.com

Abstract

The increase in the automotive fleet brings with it a variety of setbacks to the habitants of a population, such as vehicular congestion, increased travel times, high emission levels of polluting gases, among others, making urban mobility planning every day more complex, a reality that generates the imperative need to develop and implement intermodal transport models.

Therefore, there is a need to formulate alternative solutions through the "Intermodal transport project for sustainable mobility plan in Ambato", which aims to develop strategies to discourage private vehicle use and encourage Use of mass transport means interconnected to non-motorized means of transport.

The proposal for the implementation of the Intermodality of Land Transport in the central hull of the City of Ambato, includes the connectivity of public, commercial and private transport with non-motorized means of transport, restructuring the transit in the central area of the city, In order to guarantee sustainable mobility, thus contributing to the improvement of the quality of life of the inhabitants and bystanders of the sector.

The project also contemplates the socialization of the same through campaigns of diffusion denominated "by a sustainable mobility".

Keywords — Transportation, Traffic Congestion, Intermodal Transport System, Sustainable mobility

Resumen

El incremento del parque automotor, trae consigo una diversidad de contratiempos a los habitantes de una población, tales como la congestión vehicular, incremento de tiempos de desplazamientos, altos niveles de emisión de gases contaminantes, entre otros, tornando a la planificación de la movilidad urbana cada día más compleja, realidad que genera la imperiosa necesidad de desarrollar e implementar modelos de transporte intermodales.

Por lo tanto surge la necesidad de plasmar alternativas de solución a través del "Proyecto de Transporte Intermodal para generar una Movilidad Sustentable, caso de estudio Ciudad de Ambato", que tiene como objetivo el desarrollar estrategias para desalentar el uso del vehículo privado e incentivar el uso de medios de transporte masivos interconectados a medios de transporte no motorizado.

La propuesta para la aplicación de la Intermodalidad de Transporte Terrestre en el casco central de la Ciudad de Ambato, comprende la conectividad del transporte público, comercial y particular con medios de transporte no motorizados, reestructurando el tránsito en la zona centro de la ciudad, a fin de garantizar una movilidad sustentable, contribuyendo así al mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes y transeúntes del sector.

El proyecto contempla además la socialización del mismo mediante campañas de difusión denominada "por una movilidad sustentable".

Palabras clave— Transporte, Congestión Vehicular, Sistema Intermodal de Transporte, Movilidad Sustentable

Recibido: 27-10-2017

Latorre, K; Haro, D (2017) "Proyecto de Transporte Intermodal para generar una Movilidad Sustentable, caso de estudio Ciudad de Ambato"

1. INTRODUCCIÓN

La Ciudad de Ambato presenta una topografía accidentada, estableciéndose tres niveles de plataformas en la ciudad, considerándose a la plataforma céntrica como la más regular y lineal, en la misma que convergen las actividades comerciales, educativas y administrativas, razón por la cual la mayoría de los viajes se centran en esta zona, por ende el número de vehículos que circulan dentro de la periferia céntrica es sumamente elevado.

En la actualidad, la movilidad en el centro de la Ciudad de Ambato se encuentra caotizada por el incesante número de vehículos que transitan por estas vías, cuya característica principal es su reducido nivel de servicio, pues fueron caminos diseñados para bajos flujos vehiculares, sin contemplar, ni esperar, el abrupto crecimiento del parque automotor, cuyo resultado ha traído consigo el colapso de la capacidad vial, conllevando a que se produzca congestión vehicular, al incremento en los tiempos de viaje, altos niveles de contaminación ambiental, entre otros aspectos.

Sin embargo de lo señalado, lo más alarmante de este fenómeno es que no presenta síntomas de detención, por el contrario, se observa una tendencia que pretende continuar con este paradigma; enfatizando en el poder adquisitivo para la obtención de vehículos particulares y los excesivos privilegios que se da a los mismos.

Razón por la cual surge la necesidad de buscar alternativas que permitan generar una movilidad sustentable para la zona céntrica de la Ciudad, partiendo de un proyecto que integre a los diversos medios de transporte terrestre, dotando a la ciudadanía de nuevas formas para realizar sus desplazamientos y cubrir sus necesidades de movilización.

En el desarrollo del artículo se describe de forma sintetizada el diagnóstico de los actores esenciales de la movilidad, siendo el Centro de la Ciudad de Ambato el caso de estudio, así como las alternativas para subsanar los problemas detectados.

2. DIAGNÓSTICO DE LA MOVILIDAD EN EL CENTRO DE LA CIUDAD DE AMBATO

Antes de iniciar con la descripción del diagnóstico de la movilidad en la Ciudad de Ambato, es importante dar a conocer la delimitación del casco central de la Ciudad de Ambato, el cual se encuentra limitado por las siguientes calles:

- Al norte: Calle Humberto Albornoz, calle Lizardo Ruiz, Calle Pérez de Anda.
- Al Oeste: Calle Francisco Flor, Calle Olmedo.
- Al Sur: Calle Olmedo, Av. 12 de Noviembre.
- Al Este: Calle González Suárez.

A continuación se describe los principales resultados obtenidos, luego de un estudio profundo, respecto a los

principales factores de movilidad:

2.1. Vialidad

La capacidad y niveles de servicio de las vías que conforman el centro de la ciudad se las puede catalogar como vías saturadas, debido a la existencia de una demanda superior versus la oferta efectiva (o real), por ende se palpa los severos problemas de congestión vehicular existente en horas pico, a pesar de contar con un Centro de Gestión Semafórica, en el cual se sincronizan los ciclos de 53 intersecciones semafóricas, conforme a la demanda de vehículos.

Sumado a estas complicaciones de movilidad, se añade la existencia de zonas de estacionamiento dentro de la vía pública, denominado: Sistema Municipal de Estacionamiento Rotativo Tarifario (SIMERT), cuyo objeto de creación consistió en “ordenar y regular el uso de la vía pública en el casco central de la ciudad, con el fin de evitar el congestionamiento vehicular y reducir los costos de operación de los vehículos” conforme se indica en la página web de la Municipalidad de Ambato [1], Sistema que ha contribuido a la reducción de la capacidad y niveles de servicios de las vías en las cuales se encuentra implementado el mismo.

Como dato relevante, se señala que el Sistema Municipal de Estacionamiento Rotativo Tarifario cuenta con aproximadamente 140 zonas delimitadas, con un total de 1 261 plazas de estacionamiento [2]. Particular que simplemente ha paralizado la movilidad en las calles, acortando su operatividad. Deduciéndose que el programa SIMERT debió ser una medida temporal y paliativa a la congestión, más no una que sea un aporte para tal efecto.

2.2. Transporte Público

En la Ciudad de Ambato se encuentra autorizadas cinco Operadoras de Transporte Público Intracantonal Urbano de Pasajeros, las cuales prestan su servicio en 21 líneas de transporte que recorren la periferia urbana y rural del Cantón, a un costo de 0,30 centavos el pasaje, con un total de 396 unidades de transporte, mismas que se encuentran distribuidas de la siguiente forma:

Cooperativa Los Libertadores (Flota autorizada: 65 unidades de transporte).

- Línea No.1: Techo Propio – Mercado América – Andiglatá y viceversa.
- Línea No.2: La Florida – 4 Esquinas – Cashapamba y viceversa.
- Línea No.3: La Península – Las Orquídeas y viceversa.
- Línea No.4: Seminario Mayor – Ingahurco y viceversa.
- Línea No.5: Tangaiche – Macasto – Pondoá y viceversa.

Cooperativa Tungurahua (Flota autorizada: 145 unidades de transporte).

- Línea No.6: La Libertad - Ingahurco - Miraflores y viceversa.
- Línea No.7: Mercado Mayorista - Letamendi - C. Fernández y viceversa.
- Línea No.8: Montalvo - El Recreo y viceversa.
- Línea No.9: Terminal Terrestre - Huachi Progreso - Izamba y viceversa.
- Línea No. 10: T. Terrestre - M. Mayorista - Augusto Martínez y viceversa.
- Línea No.11: Pucarumí - Cunchibamba - Tiagua y viceversa.
- Línea No.14: Ficoa - Terremoto - Totoras y viceversa.

Cooperativa Unión Ambateña (Flota autorizada: 86 unidades de transporte).

- Línea No.14: Ficoa - Terremoto - Totoras y viceversa.
- Línea No.15: La Joya - El Pisque - Parque Industrial y viceversa.
- Línea No.16: Pinllo - Nuevo Ambato y viceversa.
- Línea No.17: Picaihua - Cdla. España y viceversa
- Línea No.18: San Juan - Pisque - Barrio Amazonas y viceversa.

Cooperativa Vía Flores (Flota autorizada: 45 unidades de transporte).

- Línea No.19: San Pablo - Santa Rosa - Plaza Pachano y viceversa.
- Línea No.20: Juan Benigno Vela - Ex Redondel de Izamba y viceversa.

Compañía Jerpazsol (Flota autorizada: 55 unidades de transporte).

- Línea No.21: Manzana de Oro - Huachi Grande - Puerto Arturo y viceversa.
- Línea No.22: Los Ángeles - Atocha - Izamba y viceversa.



Figura 1: Transporte Público Urbano en el centro de Ambato

A pesar de que el 70% de las líneas de transporte atraviesan la periferia central del cantón, se presenta una transcendental debilidad que enfoca la inadecuada estructura de las rutas de transporte, ya que estas se centran en el sector oriental del centro, existiendo una

carencia del servicio de transporte en la zona occidental central.

Se indica que el 26,4% de la población ambateña se moviliza empleando el servicio de transporte público [3], el mismo que se encuentra en continuos procesos para mejorar la calidad del servicio que actualmente es ofrecido, es así que a inicios del año 2016 las unidades de transporte público cuentan con la instalación de equipos de rastreo satelital (GPS) y contadores de pasajeros, dispositivos tecnológicos que permiten un mejor manejo operativo de la flota.

Sin embargo, a pesar de contar con esta tecnología a bordo, no se observa los avances y evolución que la misma debería generar respecto al desarrollo del Sistema de Información al Usuario (SIU) Sistema Integrado de Recaudo (SIR) y Sistema de Ayuda a la Explotación (SAE), paradigmas necesario para otorgar una prestación de servicio eficiente.

2.3. Transporte Comercial

Por otra parte el servicio de transporte comercial se presenta en el cotidiano vivir de los ciudadanos, por tanto el 8% de la población se moviliza empleando el servicio de transporte comercial [3]. El cual se presenta en las siguientes modalidades:

- Taxi convencional
- Taxi convencional rural
- Carga Liviana
- Transporte Escolar e Institucional

Señalando que la figura de taxi convencional rural, como tal no existe dentro de la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial y su Reglamento [4].

El total de unidades que confieren del servicio de transporte comercial en la Ciudad, se detalla a continuación:

Tabla 1: Número de Operadoras y Unidades en la modalidad comercial

CUADRO RESUMEN: NÚMERO DE OPERADORAS Y UNIDADES		
SERVICIO DE TRANSPORTE COMERCIAL	TOTAL	
	OPERADORAS	UNIDADES
Taxi convencional	50	2398
Taxi convencional parroquial rural	7	160
Transporte en carga liviana	28	721
Transporte Escolar e Institucional	11	296
TOTAL	96	3575

Se acota que el costo mínimo de una carrera en taxi convencional, taxi convencional parroquial rural es de \$1,20 en horario diurno y de \$1,30 en horario nocturno,

los cuales comprenden 2 kilómetros de distancia.

2.4. Vehículos particulares en las vías

Es notoria la preferencia de la población por la movilización en vehículos particulares, es así que el 59% de la población se moviliza empleando el vehículo particular [3], posicionando a este medio de transporte como el más empleado para el desarrollo de los viajes y satisfacer sus necesidades de movilidad. (Véase Fig. 2.)



Figura 2: Congestión vehicular en el centro de Ambato

Mediante un estudio de aforo efectuado en una semana típica del mes de abril de 2017, en las principales vías de acceso y salida del Centro de la Ciudad, se obtuvo datos apreciables que expresan la teoría de la preferencia al uso del vehículo particular sobre medios masivos o alternos, obteniéndose la siguiente información:

Vías de acceso analizadas:

- Calle Cevallos bajada de la Yahaira.
- Calle Francisco Flor.
- Calle Olmedo dirección calle Francisco Flor.
- Puente de Montalvo.
- Calle 13 de Abril.
- Calle Lizardo Ruiz.
- Calle Espejo hacia Av. 12 de Noviembre.
- Av. Los Andes hacia la calle Espejo.
- Calle Bolívar desde la calle González Suárez.
- Calle Julián Coronel.
- Calle González Suárez desde Redondel.
- Av. 12 de Noviembre.
- Av. Cevallos norte hacia la calle Abdón Calderón.

Tabla 2: Aforo vehicular de vías de acceso al Centro de la Ciudad

DÍAS	TOTAL
Lunes	105 749
Martes	101 434
Miércoles	103 110
Jueves	99 156
Viernes	111 826
Sábado	89 675
Domingo	63 570

Vías de salida analizadas:

- Calle Cevallos subida de la Yahaira
- Calle Francisco Flor
- Calle Olmedo desde Francisco Flor
- Puente de Montalvo
- Calle 13 de Abril
- Calle Urdaneta dirección al Parque sucre
- Calle Espejo desde Av. 12 de Noviembre
- Av. Los Andes desde la calle Espejo
- Calle Julián Coronel
- Calle González Suárez hacia Redondel
- Av. 12 de Noviembre
- Av. Cevallos desde la calle Abdón Calderón

Tabla 3: Aforo vehicular de vías de salida del Centro de la Ciudad

DÍAS	TOTAL
Lunes	114 069
Martes	110 236
Miércoles	110 874
Jueves	110 018
Viernes	117 886
Sábado	98 946
Domingo	69 629

En relación al número de vehículos matriculados en el cantón Ambato (80 000 vehículos) [5]; se analiza que el número de viajes que los mismos efectúan al centro de la ciudad corresponde a una relación de 1,47 veces en el día de mayor afluencia vehicular.

2.5. Transporte no motorizado

Finalmente el medio que contribuye a la movilidad ecológica y sustentable, que debería ser el más utilizado pero que, sin embargo es el menos empleado, por cuanto el 6,6% de la población se moviliza a través de este medio alternativo de transporte [3], sea este la bicicleta o caminata, indicadores de suma importancia que permiten el engranaje con otros medios motorizados, es decir generando la intermodal del transporte.

A pesar de este porcentaje considerable, se visibiliza que actualmente en la Ciudad no existen vías exclusivas o compartidas para los ciclistas, o calles destinadas netamente a la circulación vehicular.

3. Alternativas para generar una intermodalidad de transporte y una movilidad sustentable

3.1. Vialidad

La solución para generar una movilidad sustentable, no radica en la construcción y apertura de nuevas vías, por el contrario, consiste en la optimización de las ya existentes, por cuando se palpa como alternativa para mejorar la movilidad la eliminación de las zonas SIMERT de manera paulatina y la implementación de la respectiva señalización vertical y horizontal para la prohibición de estacionamiento en las vías de intervención. Si bien es cierto, se debe dar alternativas

de estacionamiento para los vehículos particulares, los cuales se recomiendan que sean en predios privados o predios municipales.

Pues esta medida permite aminorar los beneficios actuales que se da al vehículo particular y de cierta forma impulsar a la utilización de medios de transporte masivos.

3.2. Transporte Público

Se requiere de un estudio real respecto a los deseos de viaje de la población, con la finalidad de establecer líneas de deseo, puntos de fuga: de generación y atracción de viajes, con la finalidad de reestructurar las rutas y líneas de transporte para que doten de mayor cobertura del servicio, especialmente en áreas que al momento no cuentan con la facilidad del servicio de transporte.

Así también, este estudio permitirá determinar el mejor modelo de transporte masivo, sea mediante la creación de corredores exclusivos de transporte, como la implementación de un sistema BRT (*Bus Rapid Transit*) adecuado con alimentadores, entre otras opciones de transporte masivo, que generará una reducción de los tiempos de desplazamiento para los usuarios, así como una mayor cobertura del servicio.

3.3. Transporte Comercial

Mantener actualizado el estudio de necesidades de transporte y de dimensionamiento de flota, que determine estrictamente el número necesario de unidades requeridas, con el objeto de evitar sobre ofertar los servicios de transporte, que lo único que generan es una intensa competencia, inseguridad vial y el incremento de viajes negativos que aportan a la congestión y contaminación ambiental.

En caso de que el mencionado estudio arroje una sobre oferta de unidades, se debe revertir los cupos (unidades) autorizados y mantener exclusivamente el numérico adecuado para abastecer a la demanda. O a su vez predestinar las unidades sobrantes a las parroquias rurales del cantón, que presentan deficientes sistemas de transporte.

3.4. Vehículos particulares en las vías

Implementar medidas de restricción de circulación en las vías que integran la periferia del casco central, una de ellas se enmarca en el pago de una contraprestación económica a cambio del ingreso a las vías, en forma de peaje.

Creación de parqueaderos de borde en los exteriores de la periferia céntrica, que permitan a los conductores dejar aparcado su vehículo, sin costo alguno, y conectarse con un medio de transporte público o alternativo para que satisfaga su necesidad de movilización.

Eliminación de espacios públicos para el

estacionamiento de los vehículos particulares, que obligue al conductor a acceder a los parqueaderos de borde o a parqueaderos privados.

Elevados costos de estacionamiento en parqueaderos privados, que generen que el usuario del vehículo particular decida si realmente es admisible el pago de los altos tributos por concepto de rentar unas horas un estacionamiento, dirigiendo su decisión al análisis de otras opciones para realizar sus viajes (medios masivos o no motorizados).

3.5. Transporte no motorizado

Determinación de espacios seguros para los ciclistas, mediante la incorporación de ciclovías exclusivas que concedan seguridad a quienes transitan por las mismas.

Implementación del Sistema de Bicicleta Pública, el cual se encuentre distribuido en los puntos de fuga del centro de la Ciudad, así como en las principales paradas del Transporte Público y a su vez en los parqueaderos de borde, que abarcaran la mayor cantidad de usuarios; para motivar a los usuarios de los otros medios de transporte a optar por una opción amigable con el medio ambiente, que beneficia el estado físico de quien lo emplea, mejorando su calidad de vida, desarrollando de esta manera el concepto de la intermodalidad de transporte.

Asignación de vías para la circulación exclusiva de peatones, esencialmente en las vías de mayor flujo peatonal.

3.6. Intermodalidad de Transporte

Con la conjugación de los componentes antes descritos, la intermodalidad de transporte se generará de forma uniforme: Restricción de la circulación de vehículos particulares, parqueaderos de borde, líneas de transporte estructuradas, ciclovías, bicicleta pública, vías peatonales, desarrollarán una zona céntrica accesible, menos contaminada, de circulación rápida y que cuenta con una movilidad eficiente.

Es decir, la intermodalidad consiste en emplear varios medios de transporte, con la finalidad de cubrir las necesidades de movilización de una población; y qué mejor que empleando medios masivos de transporte para conectarse con medios no motorizados o viceversa.

3.7. Campaña: Por una movilidad sustentable

El proyecto de Intermodalidad debe ir de la mano con campañas de educación a los usuarios viales, que fomenten el uso de estos medios interconectados, de los medios no motorizados, haciendo énfasis en los beneficios que se generan con el empleo de los mismos, tales como la reducción de tiempos de desplazamiento, mitigación de la congestión, por ende de la contaminación ambiental y sobretodo exaltando la mejora en el aspecto de salud.



Por tanto, surge la necesidad de difundir estas iniciativas con la ciudadanía, promoviendo la utilización de nuevas formas de movilización.

Realizando un extracto de lo ya mencionado, se reduce a:

- Desincentivar el uso del vehículo particular, restringiendo el ingreso de vehículos al casco central de la Ciudad a través de una contraprestación económica para permitir su circulación al interior de la periferia céntrica.
- Creación de parqueaderos de borde en la periferia del casco central, con la finalidad de que quienes se movilizan en sus vehículos particulares, no ingresen en ellos a las vías céntricas de la ciudad, que lo realicen utilizando un medio alternativo de transporte o mediante el transporte público.
- Implementar un sistema de bicicleta pública, que se conecte de forma estratégica con las principales paradas del transporte público en el centro de la ciudad, desarrollando una red de ciclovías con sus respectivas estaciones que cubran las necesidades de movilidad.
- Reestructuración de rutas de transporte, con la finalidad que doten del servicio de transporte a zonas y sectores que en la actualidad se encuentran desabastecidos del servicio.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- La solución para generar una movilidad sustentable no se encuentra ligada al desarrollo de nuevas vías, sino a la optimización de las ya existentes, realzando la importancia de medios de transporte masivo, mismo que se deben interconectar eficientemente con otros medios de transporte, es decir, mediante la implementación de un transporte intermodal.
- A través de la incorporación de un transporte intermodal en el casco central de la Ciudad de Ambato, con las alternativas antes descritas, se estima una reducción de un 30% de congestión en las vías internas de la ciudad.
- Los medios alternos de transporte deben tomar una mayor injerencia al momento de planificar una ciudad, pues son los medios de transporte del futuro.
- Se sugiere se tomen en consideración las alternativas planteadas en el presente documento, las cuales contribuirán a la generación de una movilidad sustentable; alternativas que deben ir de la mano de una correcta campaña que incentive a los usuarios del vehículo particular a

optar por otra alternativa de transporte.

- Para lograr mencionada Intermodalidad es necesario que las alternativas señaladas anteriormente sean aplicadas en conjunto, ya que con la aplicación por separado no se obtendrá la movilidad deseada.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gobierno Autónomo Descentralizado Municipalidad de Ambato. (04 de 05 de 2015). Ambato.gob.ec. Obtenido de <http://www.ambato.gob.ec/simert-organiza-el-estacionamiento-vehicular-positivamente>
- [2] Daniel Zurita. (21 de 08 de 2017). Sistema Municipal de Estacionamiento Rotativo Tarifario. (K. Latorre, Entrevistador)
- [3] Asociación León & Godoy – Hidroplan. (08 de 2013). Plan Maestro de Transporte y Movilidad del Cantón Ambato, horizonte 2032. Ambato, Tungurahua, Ecuador.
- [4] Asamblea Nacional Constituyente. (07 de 08 de 2008). Ley Orgánica Reformativa a la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial. Montecristi, Manabí, Ecuador.
- [5] María Susana Arens. (15 de 8 de 2017). Agencia de Matriculación. (K. L. Hernández, Entrevistador)



Katherine Latorre Hernández.-

Nació en Quito, Ecuador en 1991. Recibió su título de Ingeniero en Gestión de Transporte de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en 2016; actualmente se encuentra cursando la Maestría en Transporte y Logística del Instituto de Posgrado y Educación Continua de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Sus campos de investigación están relacionados en el área de transporte, tránsito y seguridad vial.



Diego Alexander Haro Avalos.-

Nació en la ciudad de Riobamba, Ecuador en 1993. Recibió su título de Ingeniero en Gestión de Transporte de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo en el 2016. Actualmente se encuentra cursando estudios de la carrera de Derecho en la Universidad Técnica Particular de Loja, y una Maestría en Transporte y Logística en la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Digital Instrument to Evaluate the Human Heat Stress

Instrumento Digital para la Determinación del Estrés Térmico en Personas

L.H. Vera¹ A.D. Firman¹ L.A. Zini¹ M. Cáceres¹

¹Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) – Grupo en Energías Renovables (GER)-FaCENA- Corrientes, Argentina

E-mail: lh_vera@yahoo.com.ar

Abstract

The northeast Argentinian's industries, generally, presents a thermally inadequate working environment. Situation originated by the high temperatures in the summer months and inadequate thermal conditions. In this condition, the workers are in a scenario of thermal stress, a situation that compromises the concentration and physical capacity; causing accidents or health problems. To evaluate the thermal working conditions, the Group in Renewable Energies (GER) of the National University of the Northeast, developed a meter that allows determining the thermal stress index and, thus, evaluating workers' rest time to avoid possible accidents.

The instrument presented contains digital sensors that allow measure the ambient temperature, globe temperature, relative humidity and atmospheric pressure to calculate the Heat Stress Index for people. It is portable, has autonomy of 96 h, has a screen to display measured variables and is capable of recording data on an SD card. A Software has been developed for the reading and representation of the measured data on the psychometric chart and gives the possibility to evaluate the reduction of working hours based on the calculated index and the metabolic rate of the workers. At this stage of the research, there is a calibrated functional prototype, with which will be measurements in industrial facilities.

Index terms — Thermal Comfort, Instrumentation, Heat Stress, Energetic Efficiency.

Resumen

En las industrias del noreste de Argentina, en general, se reconoce que presentan un ambiente de trabajo térmicamente inadecuado. Situación originada por las altas temperaturas en los meses de verano y por la falta de un acondicionamiento térmico. En esta condición, el ser humano se encuentra en un escenario de falta de confort o estrés térmico, situación que compromete la concentración y la capacidad física; Causando accidentes o problemas de salud. Para evaluar las condiciones de trabajo, el Grupo de Energías Renovables (GER) de la Universidad Nacional del Nordeste, desarrolló un medidor que permite determinar el índice de estrés térmico y, de esta forma, evaluar el tiempo de descanso de los trabajadores para evitar posibles accidentes.

El instrumento presentado contiene sensores digitales que permiten medir la temperatura ambiente, la temperatura del globo, la humedad relativa y la presión atmosférica para calcular el índice de estrés por calor para las personas. Es portátil, tiene una autonomía de 96 h, tiene una pantalla para mostrar las variables medidas y es capaz de grabar datos en una tarjeta SD. Se ha desarrollado un software para la lectura y representación de los datos medidos en la tabla psicométrica y permiten evaluar la reducción de la jornada de trabajo basada en el índice calculado y la tasa metabólica de los trabajadores. En esta etapa de la investigación, existe un prototipo funcional calibrado, con el que se planifican mediciones en un parque industrial de la región.

Palabras clave— Confort Térmico, Instrumentación, Estrés Térmico, Eficiencia Energética.

Recibido: 02/01/2018, Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Vera, L.; Zini, L. Firman A.; Cáceres, M.; (2017). "Instrumento Digital para la Determinación del Confort Térmico". Revista Técnica "energía". No. 13, Pp. El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

ISSN 1390-5074.

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de confort térmico tienen como objetivo analizar y establecer las condiciones necesarias para la evaluación y diseño de un ambiente térmico adecuado para las actividades y ocupación humanas, así como establecer métodos y principios para un detallado análisis térmico de un ambiente.

La importancia del estudio de confort térmico, está basado principalmente en 3 factores:

a) La satisfacción al sentirse térmicamente confortable.

b) El desempeño humano: estudios muestran una clara tendencia de que el desconfort causado por calor o frío, reduce el desempeño humano [1]. Las actividades intelectuales, manuales y perceptivas, generalmente presentan un mejor rendimiento cuando son realizadas en una condición de confort térmico.

c) La eficiencia energética: debido a la creciente industrialización, las personas de una sociedad moderna realizan principalmente sus actividades en recintos cerrados, de esta forma, pasan gran parte de sus vidas en ambientes con climas artificiales (ambientes acondicionados).

Analizando los tres factores antes mencionados, y trasladándolos a las condiciones ambientales existentes en diferentes tipos de edificaciones del nordeste argentino, en general, se reconoce que presentan un entorno de trabajo térmicamente inadecuado. Situación originada por las elevadas temperaturas en los meses de verano y por la falta de un condicionamiento térmico. En esta condición, el ser humano se encuentra en un escenario de falta de confort o de estrés térmico, situación que compromete la concentración y la capacidad física; pudiendo causar accidentes o problemas de salud.

En el mercado existen instrumentos nacionales e importados que permiten medir el confort térmico, se observa que los mismos comparten funciones similares: poseen sensores de temperatura de bulbo seco, de bulbo húmedo y de globo, una pantalla para mostrar los datos medidos; su costo varía entre USD 2 000,00 [1] y USD 4 000,00 [2], dependiendo de su capacidad de almacenamiento, autonomía, *software* específico para procesamiento y visualización de datos, entre otras capacidades.

Lo expuesto a llevado al Grupo en Energías Renovables (GER) perteneciente a la Universidad Nacional del Nordeste a desarrollar el primer prototipo de un medidor digital de estrés térmico con la capacidad y calidad de medición de variables que permita determinar de forma adecuada y precisa el índice de estrés y el tiempo de descanso de los trabajadores. De esta forma contar con la información de índices de estrés térmico y su relación con accidentes de trabajo en la región NEA de Argentina (información inexistente en

la actualidad). El prototipo desarrollado, además de vincular todas las características de los instrumentos anteriormente mencionados, mide la presión atmosférica (ampliando su rango de aplicación) e incorpora funciones de registro de datos y *software* para PC. El medidor fue diseñado para cumplir los requisitos mencionados con un costo menor a los equipos comerciales.

2. CONFORT TÉRMICO

El confort térmico en las personas, se presenta cuando el cuerpo se mantiene dentro de rangos estrechos de temperatura, la humedad de la piel es baja y el esfuerzo fisiológico de la regulación de temperatura se reduce al mínimo [4]. Una definición ampliamente aceptada es “El confort térmico es aquella condición mental que expresa satisfacción con el ambiente térmico” [5].

2.1. Normativas vigentes

En la Argentina, la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo (Ley N° 19 587 y su Decreto Reglamentario N° 351/79 con las modificaciones de la Res. N° 295/2003) establece que la higiene y seguridad en el trabajo debe comprender las normas técnicas y medidas sanitarias, precautorias y reglamenta obligaciones relativas a la carga térmica con el objeto de preservar y mantener la integridad psicofísica de los trabajadores y prevenir, reducir, eliminar o aislar los riesgos de los distintos centros o puestos de trabajo; estimular y desarrollar una actitud positiva respecto de la prevención de los accidentes o enfermedades que puedan derivarse de la actividad laboral.

A nivel internacional se toman como criterios de referencia para considerar los efectos de la temperatura ambiente en el desempeño de los trabajadores la norma ISO 7243 (1989) y la norma ASHRAE F8 (2001).

2.2. Índices de Estrés Térmico

El método más exacto para determinar el nivel de estrés térmico de un individuo es a través de la medición de los indicadores fisiológicos de estrés (tasa de transpiración, nivel de deshidratación, temperatura corporal, etc.), estos valores permiten cuantificar los indicadores e identificar la situación térmica [3]. Sin embargo, la medición de tales indicadores es de difícil implementación. Por esta razón, existen otros indicadores que permiten evaluar el nivel de estrés térmico al que está sujeto un trabajador en función de su actividad física (o tasa metabólica) y de las condiciones térmicas del ambiente en el que se encuentra. Los cuales son normalmente designados como índices de estrés térmico.

Actualmente, el índice de estrés térmico más utilizado e indicado en la Ley N° 19 587 es el *Wet Bulb Globe Temperature* o W_{BGT} , que puede ser traducido como “Índice de Temperatura de Bulbo Húmedo y de

Temperatura de Globo”. Este índice, propuesto en los años 1950 por la Marina de Guerra de los EUA, se basa en la medición de dos temperaturas: La Temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) y la Temperatura de globo (T_g). Esta última es la temperatura medida por un termómetro colocado en el interior de un globo de cobre de 150 mm de diámetro pintado de negro mate [6]. De esta forma, el valor registrado por el termómetro es la temperatura media del ambiente en donde se encuentra situado.

De esta forma, es posible encontrar una combinación de los valores de temperatura de globo y temperatura de bulbo húmedo que conduce a la evaluación del comportamiento térmico del cuerpo humano.

En (1) se presenta el cálculo del índice W_{BGT} interior.

$$WBGT_i = 0,7 \cdot T_{bh} + 0,3 \cdot T_g \quad (1)$$

El índice propuesto en (1) es utilizado actualmente por la Ley de Higiene y Seguridad en el Trabajo para el cálculo del estrés térmico en ambientes interiores, cuando se desea evaluar el confort térmico en ambientes exteriores el efecto de la temperatura ambiente (T_a) debe ser contemplada. De esta forma la expresión a ser utilizada en estas condiciones es presentada en (2).

$$WBGT_e = 0,7 \cdot T_{bh} + 0,2 \cdot T_g + 0,3 \cdot T_a \quad (2)$$

Una vez conocido el valor de W_{BGT} es posible, a través de la comparación con valores de referencia, determinar el nivel de estrés térmico en el que se encuentra el trabajador. Si el W_{BGT} es superior a los valores indicados en la Tabla 1 será necesario disminuir el tiempo de permanencia del individuo, o crear condiciones que permitan una reducción del índice del local (mediante calefacción, enfriamiento, ventilación, etc.).

Tabla 1 - Valores máximos recomendados para el índice W_{BGT} para un tiempo de exposición de 8 horas (ISO 7243).

Tipo de Actividad	Valor Máximo del WBGT (°C)			
	Trabajador Aclimatado*		Trabajador NO Aclimatado*	
Descanso	33		32	
Trabajo manual leve	30		29	
Trabajo manual moderado	28		26	
	Aire parado	Corriente de aire	Aire parado	Corriente de aire
Actividad física intensa	25	26	22	23
Actividad física muy intensa	23	25	18	20

* Persona aclimatada: aquella que está adaptada para tener mayor capacidad para tolerar condiciones de estrés térmico.

El tipo de actividad presentado en la Tabla 1 está directamente vinculado con la tasa metabólica (M), de esta forma es posible determinar según la actividad y el valor del índice W_{BGT} , las condiciones de trabajo de un individuo y evaluar la necesidad de reducir el tiempo expuesto a estas condiciones. De esta forma, se evita la situación de riesgo de estrés térmico.

La Fig. 1 presenta curvas del W_{BGT} que se relacionan con la tasa metabólica del individuo. Estas curvas permiten, una vez conocido M [7] y el W_{BGT} crear algoritmos que calculan la disminución de la jornada de trabajo.

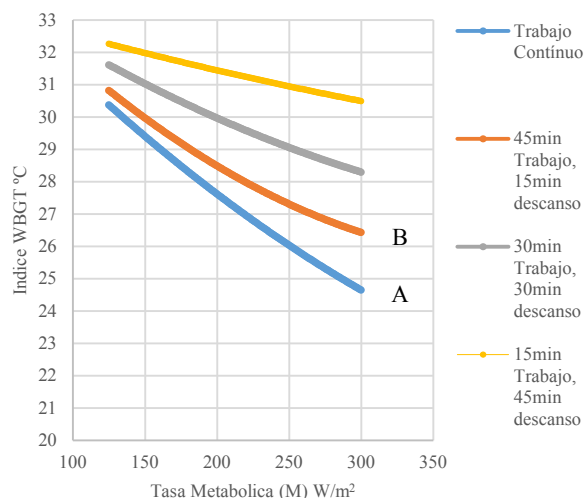


Figura 1: Curva de valores que relacionan el índice W_{BGT} con M para ciclos de trabajo/descanso [8].

En la Fig. 1 existe una curva de trabajo continuo y tres de diferentes combinaciones de tiempos de trabajo / descanso. Si el punto definido por el valor de W_{BGT} y M se encuentra debajo de la curva A, el individuo puede realizar la actividad de forma continua. Si se encuentra entre la curva A y B debe alternar ciclos de 45 minutos de trabajo con 15 de descanso. Si se encuentra dentro de la curva B y C, los ciclos serán de 30 minutos de trabajo con 30 de descanso. Finalmente, si se encuentra en la curva D, debe trabajar 15 minutos y descansar 45. Esta es la metodología utilizada para determinar el tiempo de descanso por cada hora.

3. DETERMINACION DE VARIABLES AMBIENTALES

A partir de la ecuación del índice W_{BGT} se observa que es necesario medir la temperatura de bulbo húmedo, la temperatura de globo y la temperatura ambiente. La medición de la T_{bh} conlleva a la necesidad de contar con un recipiente con agua destilada la cual continuamente se encuentra evaporando para representar la condición de enfriamiento adiabático; en la práctica es muy común que el recipiente se quede sin agua conduciendo a lecturas erróneas de la T_{bh} . Considerando este

inconveniente se utiliza un medidor de humedad relativa y se recurre a la norma ASHRAE F06 y los algoritmos propuestos por Simões [6], para calcular, a partir de la humedad relativa del aire, la T_{bh} .

La T_{bs} es medida directamente y la T_g debe medirse según especificaciones de diámetro colar y material del globo.

3.1. Humedad Relativa.

El aire húmedo es una mezcla binaria cuya presión total P – presión atmosférica total (que en condiciones normales y al nivel del mar 101,325 Pa) es la suma de P_a - presión parcial del aire seco y P_w - presión parcial del vapor de agua. La presión parcial del vapor de agua varía desde cero (aire seco) hasta un máximo (aire saturado) y esta variación depende de la temperatura de la mezcla. Esta presión es aproximadamente la presión de saturación del vapor de agua (P_{ws}) a la temperatura en que se encuentra la mezcla. De esta forma, para un determinado valor de temperatura, un parámetro que permite determinar el porcentaje de vapor de agua saturado en la mezcla aire-agua es el valor de las presiones parciales.

La presión de saturación del vapor de agua P_{ws} puede ser calculada a través de (3)

$$P_{ws} = e^{\frac{a}{T} + b - c \cdot T + d \cdot T^2 - e \cdot T^3 + f \cdot \ln T} \quad (3)$$

donde, a , b , c , d , e y f son constantes [6], y T es la temperatura absoluta del aire.

Esta ecuación es válida para temperaturas de 0 a 200 °C, y si se reemplaza el valor de T por el valor de la temperatura ambiente (conocida también como temperatura de bulbo seco, T_{bs}) se determina la presión de saturación del vapor de agua para T_{bs} , y utilizando la temperatura de bulbo húmedo se determina el valor presión de saturación del vapor de agua para la T_{bh} .

La masa total de aire húmedo está formada por una mezcla constituida por la suma de la masa de aire seco y la masa de vapor de agua. Esta última varía de cero hasta un máximo en función de la temperatura y la relación entre las cantidades de estas dos masas es la humedad absoluta W (g vapor/kg aire seco).

El aire húmedo puede ser considerado una mezcla de gases perfectos independientes, aire seco y vapor de agua, y cada uno obedece la ecuación de estado de los gases perfectos. De esta forma, se puede determinar, a través de la relación de fracciones molares y presiones, el valor de W (4).

$$W = 0,62198 \cdot \frac{P_w}{P - P_w} \quad (4)$$

Para resolver (4) es necesario determinar la presión parcial del vapor de agua. Este cálculo se realiza utilizando la humedad relativa (HR), la ecuación de estado de los gases perfectos y la relación entre la

fracción molar de cada elemento de la mezcla (5).

$$P_w = HR \cdot P_{ws} \quad (5)$$

Para cualquier estado del aire húmedo, existe una temperatura T_{bh} en la cual el agua líquida evapora en el aire y lo lleva a la saturación. Para los procesos de saturación adiabático a presión constante, el contenido de humedad aumenta de un valor inicial W para un valor de humedad absoluta W_{stbh} correspondiente a la saturación en la temperatura T_{bh} . Analizando el proceso descrito y contemplando la conservación de la entalpía a presión constante, se llega a (6).

$$W = \frac{(2501 - 2,381 \cdot T_{bh}) \cdot W_{stbh} - 1,006 \cdot (T_{bs} - T_{bh})}{2501 + 1,805 \cdot T_{bs} - 4,186 \cdot T_{bh}} \quad (6)$$

Donde W_{stbh} , es una función de la T_{bh} para un valor fijo de presión. De esta forma, el valor de T_{bh} que satisface (6) para determinados valores de W y de P , es la temperatura de bulbo húmedo termodinámico que se desea calcular.

La ecuación (6) es utilizada para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo, a través de un proceso iterativo, partiendo de los valores de presión atmosférica total P , temperatura de bulbo seco T_{bs} y humedad relativa HR .

En este punto es importante destacar que el cálculo de la T_{bh} depende de la presión atmosférica, por lo cual es necesario medir esta última para corregir los valores calculados en lugares donde la presión atmosférica se aleje de los valores nominales (lugares con importante elevación respecto al nivel del mar). En caso de no realizar esta corrección el valor de la HR , y por ende el valor de la T_{bh} , el valor del índice de estrés presentaría un desvío respecto al valor real.

3.2. Temperatura de globo.

La radiación a la que está sometida una persona dentro de un entorno puede ser determinada por las dimensiones del medio ambiente, sus características térmicas y ubicación de la persona en el mismo. Este método puede ser complejo y bastante laborioso, ya que puede haber múltiples fuentes de radiación de distintos tipos. De forma simplificada esta temperatura se determina utilizando un sensor de temperatura que se ubica en el centro de una esfera hueca de metal (globo), que es la variable solicitada (T_g) para determinar el índice de estrés térmico.

La superficie externa del globo debe absorber la radiación del ambiente circundante, por lo que debe ser de color negro, idealmente por cobertura electroquímica o más comúnmente con pintura negra opaca. Se recomienda un diámetro de 15cm para evitar inexactitudes en los resultados por efecto de la temperatura y velocidad del aire. Una condición de diseño del mismo era la condición de ser un equipo

portátil, que sea de fácil manipulación, razón por la cual se adoptó para el globo del instrumento un diámetro menor al recomendado (8 cm).

3.2.1 Temperatura media radiante

Para evaluar no solo el índice de estrés, sino también las condiciones de confort [3], es necesaria la determinación de la temperatura radiante media, para la cual se utiliza la denominada temperatura de globo, entre otras variables. Es decir, la temperatura del globo, en situación de equilibrio térmico permite calcular la temperatura media radiante (T_r).

El instrumento desarrollado también calcula el valor de la T_r (con el objetivo de poder evaluar los índices de confort térmico de las personas). Como se ha expuesto el diámetro del globo, es menor al recomendado, razón por lo cual se ha corregido el valor de la T_r para el diámetro adoptado, realizando un balance de energía, (7).

$$R_g + C_g = 0 \quad (7)$$

donde R_g representa los intercambios térmicos por radiación entre las paredes del entorno y C_g los intercambios térmicos por convección entre el aire y el globo. La transferencia de calor por radiación, R_g , está dada por la ecuación (8).

$$R_g = \varepsilon_g \cdot \sigma \cdot (T_r^4 - T_g^4) \quad (8)$$

donde ε_g es la emisividad del globo, σ la constante de Stefan-Boltzmann y T_r la temperatura radiante media.

La transferencia de calor por convección, C_g , está dada por la ecuación (9).

$$C_g = h_{cg} \cdot (T_a - T_g) \quad (9)$$

donde h_{cg} es el coeficiente de transferencia de calor por convección al nivel del globo.

En los casos de convección natural $h_{cg} = 1,4(\Delta T/D)^{1/4}$, en donde D es el diámetro del globo en metros y ΔT es la diferencia de temperatura entre el ambiente y el globo [3].

Sustituyendo los valores de R_g y C_g en las expresiones anteriores, despejando la temperatura media radiante y considerando las temperaturas en K, para el caso de convección natural, queda la ecuación (10).

$$T_r = \left[(T_g)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon_g} \left[\frac{|T_g - T_a|^{1/4}}{D} \right] \cdot (T_g - T_a) \right]^{1/4} \quad (10)$$

La ecuación 10 permite hallar la T_r , conociendo el diámetro del globo, su emisividad y su temperatura.

Considerando dos globos de un mismo material, igual emisividad y a una misma temperatura de globo, pero de

diferentes diámetros, la ecuación (10) nos permite encontrar una ecuación de ajuste.

4. SISTEMA DE MEDICIÓN

Para medir temperatura de globo se utiliza el sensor DS18B20 [10] colocado dentro del globo, posee una resolución desde 9 a 12 bits y una precisión de $\pm 0,5$ °C en el rango de -10 °C a + 85 °C, lo que lo hace adecuado para el rango de temperaturas de trabajo (0 a 50 °C). Dicho sensor se comunica con el microcontrolador a través del protocolo *1-Wire* [11].

Para medir humedad relativa y la temperatura ambiente (o de bulbo seco) se emplea el sensor de humedad relativa y temperatura SHT75 [12]. La medición de humedad relativa tiene una precisión de $\pm 1,8\%$ HR con una resolución de 12bits en un rango entre 10 a 90% HR. Para el rango de temperatura de 10 a 40 °C, posee una precisión de $\pm 0,3$ °C, con una resolución de 14bits. Se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo *2-wire* [12]. Dicho sensor está ubicado en el interior de una cámara por la que circula aire forzado a 3 m/s. Posee un *cooler* para asegura una renovación constante del aire.

La presión atmosférica se mide con el sensor de presión compensado por temperatura BMP180 [13]. Su rango de detección de presión va desde 300 a 1100 hPa lo que representa una altura respecto al nivel del mar de 9000 m a -500 m. Su resolución es de 0,03 hPa / 0,25 m. Su rango de funcionamiento es de -40 a +85 °C, con una exactitud de ± 2 °C en su medición de temperatura interna. Se comunica con el microcontrolador mediante el protocolo *I²C* [14].

La fecha y hora se mantienen actualizadas a través de un reloj de tiempo real (RTC) modelo Pcf8563 [15], y se comunica con el microcontrolador mediante el uso del protocolo *I²C*.

Los sensores fueron seleccionados por ser de alta precisión, encontrarse en el mercado nacional y ser digitales, de esta manera se logra inmunidad frente a problemas de ruidos y se evitan etapas de amplificación, condiciones que se verifican en los sensores analógicos

En función de la demanda de los sensores y el *cooler* se seleccionó una batería de litio (modelo LG BL-48th) que posee una capacidad de 3 000 mAh para responder a una autonomía de 96 h de funcionamiento.

Se diseñó una fuente conmutada de tensión a partir del integrado MC34063 [16] que permite adaptar la tensión entregada por la batería (3,7 V) a la utilizada por el microcontrolador y los sensores (3,3 V).

Utiliza una pantalla LCD que otorga al operario la capacidad de visualizar los datos medidos y calculados. Estos mismos datos, junto con la hora y fecha, se guardan cada 5 minutos en un archivo correspondiente

al día de medición dentro de la tarjeta *SD*, siendo el valor almacenado un promedio de 5 mediciones.

4.1 Adquisición de datos.

El medidor desarrollado, antes de comenzar la adquisición de datos, realiza una comprobación general de estado del sistema, asegurando que la batería posea carga, que todos los sensores estén conectados y que la tarjeta *SD* se encuentre presente. Posteriormente, se realiza la medición de cada sensor; procedimiento que se repite 5 veces, se calcula la temperatura de bulbo húmedo (ecuaciones psicrométricas descriptas en el apartado 2) utilizando métodos numéricos iterativos [17] y obtiene la hora actual almacenada en el *RTC*. El paso siguiente es presentar los valores medidos e índices calculados en el *LCD* y almacenarlos en la tarjeta *SD*. Finalmente, entra en modo de bajo consumo esperando 1 minuto para realizar el siguiente proceso de medición. Este procedimiento se realiza con la finalidad de ahorrar energía y aumentar la autonomía del instrumento.

4.2 Estructura física del instrumento

Considerando los sensores de medición, sistema electrónico de control, almacenamiento y de visualización, baterías y fuente, se diseñó el equipo para determinar el Índice de Estrés Térmico. Para su diseño se evaluaron los sistemas existentes en el mercado, y se analizaron las mejoras necesarias para llegar a un equipo que responda de forma adecuada a los requerimientos de un especialista en seguridad e higiene.

De esta forma, se llegó a un diseño en el cual, en el cuerpo principal, se encuentran los componentes electrónicos, los sensores, la pantalla y la batería, además de una esfera de cobre pintado de color negro que en su interior tiene instalado el sensor de temperatura encargado de medir la T_g . El equipo es completamente digital, la unidad central de procesamiento es un microcontrolador Atmega 328P [9] al que se le conectan todos los dispositivos. En la Fig. 2 se observa una foto del equipo desarrollado.

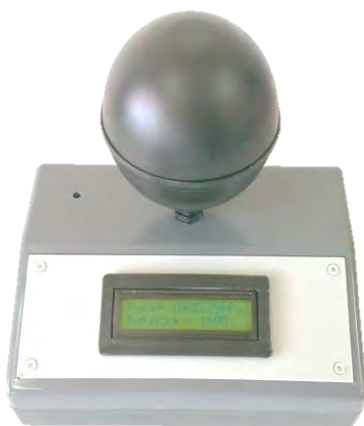
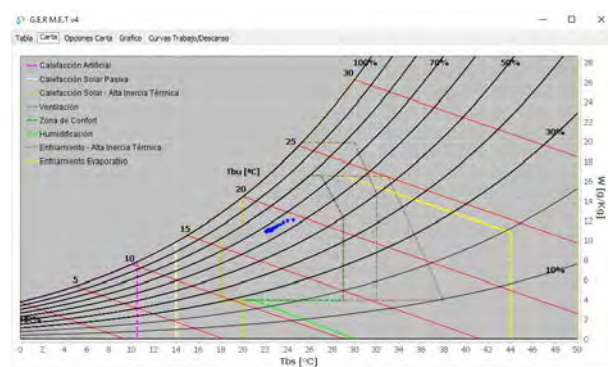


Figura 2: Fotografía del prototipo desarrollado para la determinación del índice de confort térmico.

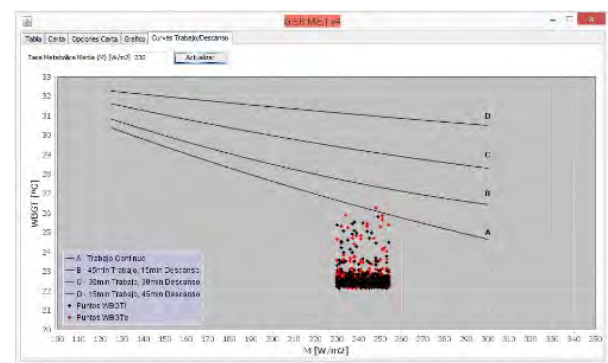
5. PROGRAMA COMPUTACIONAL PARA EL TRATAMIENTO DE DATOS

Los valores medidos y almacenados en la tarjeta *SD* pueden ser cargados y visualizados en un programa específicamente desarrollado en lenguaje *JAVA*, que representa los mismos en una tabla de datos. El programa tiene la capacidad de presentar directamente, los datos medidos, sobre una carta psicrométrica desarrollada específicamente para esta aplicación. Además, agrega la posibilidad de realizar cálculos energéticos para trasladar un estado característico de ciertas condiciones de humedad y temperatura a una nueva condición.

Existe la opción de presentar gráficamente los datos medidos e índices calculados en función del tiempo para observar su variación; o puede graficarse el *WBGT* sobre las curvas presentadas en la Fig. 1, para estimar cuánto tiempo se debe reducir la jornada de trabajo para que el individuo no sufra condiciones de estrés térmico. En la Fig. 4 se observan capturas de pantalla del software descrito.



(a)



(b)

Figura 3: Capturas de pantalla del programa computacional de visualización y tratamiento de datos. a) Carta psicrométrica con puntos medidos y zona de confort, b) Curvas de reducción del tiempo de trabajo en función de W_{BGT} y M .

6. RESULTADOS

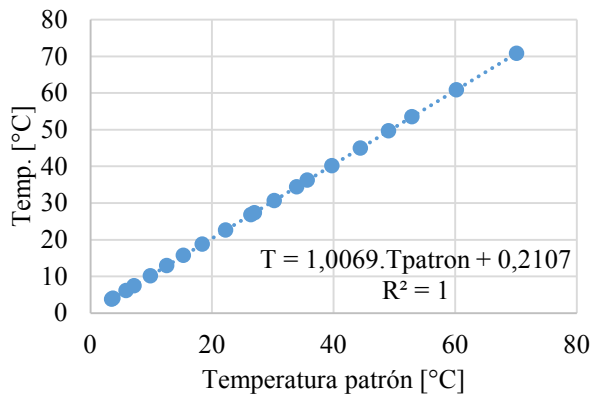
6.1. Contraste

El sensor de temperatura DS18B20 fue contrastado contra un termómetro Testo 735 con sonda Pt100

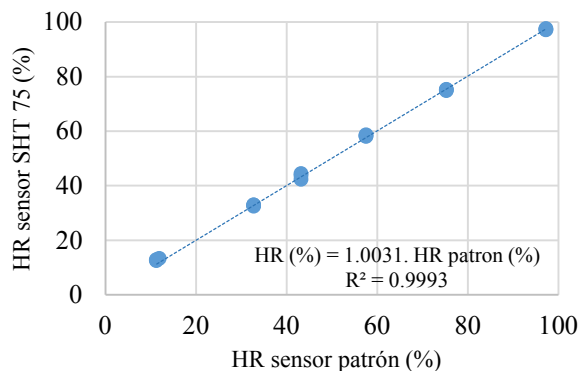
calibrada, utilizando un baño térmico controlado electrónicamente [18].

Para determinar la humedad relativa del sensor SHT75 se realizó el procedimiento siguiendo las recomendaciones dadas por la Norma ASTM E 104 – 2 “El mantenimiento de la humedad relativa constante por medio de soluciones acuosas” (ASTM International, 2002). Así mismo se tuvieron en cuenta las instrucciones de la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML) en su recomendación internacional OIML R 121 “La escala de humedad relativa de aire certificada con soluciones de sales saturadas” (OIML, 1996)

En la Fig. 4 se observan las curvas de contrastación y el ajuste logrado.



(a)



(b)

Figura 4: Contrastación de valores de los sensores utilizados respecto a patrones. a) temperatura medida por el sensor en contrastación respecto a una sonda Pt100, b) Humedad relativa medida por el sensor respecto a sales de referencia..

También se verificó la respuesta térmica de la temperatura de globo para una esfera de 15cm en relación a otra esfera de 8cm. Esta última se realizó con el objetivo de determinar si existía una diferencia entre tiempos y valores de temperatura en condiciones de equilibrio.

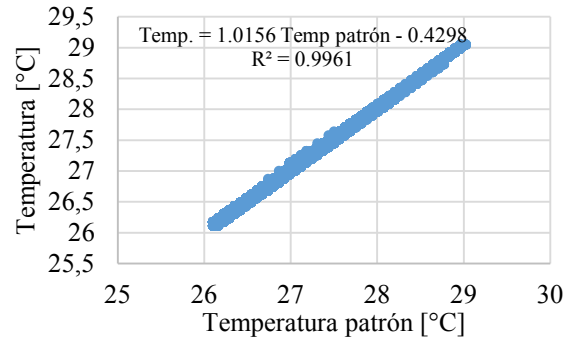


Figura 5: Correlación entre valores de temperatura de globo medida en una esfera de 15cm con relación a una esfera de 8cm.

Todos los coeficientes para realizar un ajuste de los valores medidos por los sensores se cargaron en el software del microcontrolador.

6.2. Primeros Resultados

A continuación, se presentan valores medidos en las oficinas del GER para diferentes días y condiciones ambientales.

En la Fig. 6 se presentan, dentro de una carta psicrométrica, los valores de T_{bs} y HR medidos durante 24 h. de funcionamiento continuo del equipo medidor, registrando 274 puntos. Las temperaturas medidas varían en el rango de 20 a 23 [°C] y las de humedad relativa en torno al 50%. Los valores obtenidos son para un día típico templado, donde el W_{BTG} varía entre 17,5 y 19,0. Para las condiciones medidas se determina que las personas en la oficina se encuentran dentro de los valores normales de índices de estrés y dentro de la zona de confort (círculo rojo).

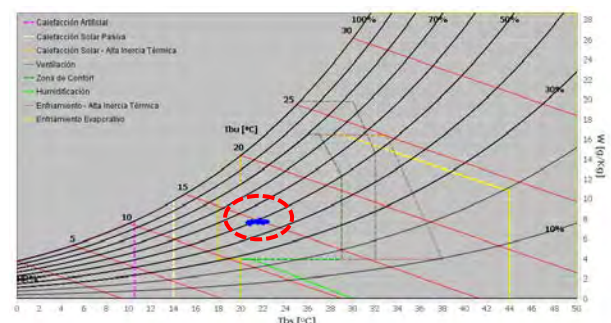


Figura 6 – Variación a lo largo del día de los valores medidos de HR y T_{bs}

En la Fig. 7 se presenta la evolución del índice de estrés térmico para un nuevo día (índice interno en negro y externo en rojo), también templado, pero ya con corrientes de aire en el lugar de medición. Al existir corrientes de aire, la humedad relativa disminuye al rango del 30 al 40 [%] provocando una mayor variación del W_{BTG} , pero manteniéndose dentro del rango de los valores presentados para el día anterior. Los puntos registrados se encuentran también en la zona de confort

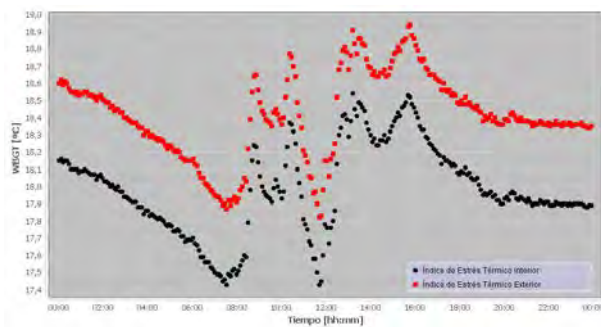


Figura 7: Variación de los Índices en un día con corrientes de aire.
El medidor se encontraba en una oficina en la que había circulación de personas y cuyas ventanas se encontraban abiertas.

En un tercer día de medición se comprobaron valores de temperatura ambiente de 28°C y HR del 80%, lo que llevó al cálculo de índices de estrés más elevado, alcanzando valores de 25. Condiciones térmicas de trabajo dentro de la zona de confort, pero cercanos al límite superior de la zona de confort, por otro lado.

En la Fig. 8 se han graficado la variación de W_{BTG} interno y externo, para este último día, dentro de un entorno que relaciona las horas de trabajo y descanso. En la misma se observa que es necesario reducir la carga horaria de trabajo ya que los índices se encuentran debajo de la Curva A

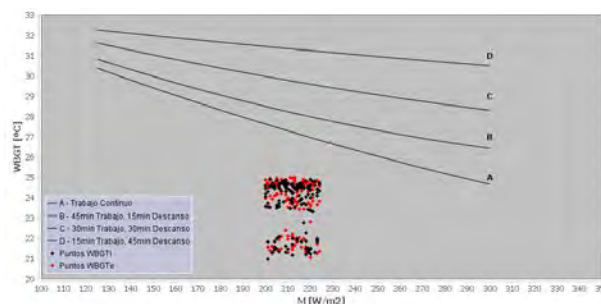


Figura 8: Los puntos registrados se mantienen por debajo de la curva de trabajo continuo, por lo que no es necesario reducir el tiempo de trabajo.

7. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó un medidor digital de estrés térmico desarrollado por el Grupo en Energías Renovables (GER) de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (FaCENA-UNNE). El instrumento desarrollado se realizó con el objetivo de determinar el estrés térmico al que están sometidos los operarios que trabajan en industrias de diferentes rubros en la región nordeste de la Argentina. De esta forma, se proyectó y construyó un instrumento con dispositivos accesibles en el mercado nacional, que cumple con las normativas nacionales, de bajo costo, autónomo y portátil.

El sistema desarrollado consta básicamente de un microcontrolador que recibe los valores de temperatura y de humedad relativa, estos valores son utilizados para,

a través de las relaciones psicométricas, calcular la temperatura de bulbo húmedo y seguidamente los índices de estrés térmico interior y exterior. Los valores medidos y calculados son mostrados a través de una pantalla. La construcción del medidor es compacta y consta de una esfera hueca de cobre pintada de negro opaco, con la finalidad de determinar la temperatura de globo. La temperatura ambiente y la humedad relativa son medidas en un compartimiento dentro del cuerpo del instrumento, que se halla aislada del circuito electrónico, y un *cooler* auxilia a la renovación continua del aire con el ambiente para evitar una medida errónea. El sensor de presión se ubica en la parte lateral, expuesto a la superficie, protegido contra elementos externos que puedan dañarlo.

Los sensores instalados en el instrumento fueron contrastados previamente frente a instrumentos calibrados.

Se han presentado las primeras mediciones realizadas en oficinas del GER y volcadas las mismas dentro del entorno gráfico de análisis que fue desarrollado específicamente para este equipo.

Considerando la importancia de la caracterización térmica de los ambientes de trabajo, se presenta al instrumento desarrollado como una posible herramienta para la seguridad personal de los trabajadores y para el análisis y futura adaptación infraestructural a las circunstancias bioclimáticas adecuadas para lograr condiciones de confort térmico.

AGRADECIMIENTOS

El Grupo de trabajo agradece a la Subsecretaría de Gestión y Coordinación de Políticas Universitarias (SPU) del Ministerio de Ciencia y Técnica (MINCyT) y a la Secretaría General de Ciencia y Técnica-UNNE.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TDA Argentina, http://tdaarg.com.ar/?page_id=103, accedido 08/2015.
- [2] QUEST TECHNOLOGIES QT-32, http://www.siafa.com.ar/instrum equip/hi_temp_carga.html, accedido 08/2015.
- [3] Lamberts R (2002) Conforto Térmico e Stress Térmico Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis.
- [4] ASHRAE HVAC (2001) Fundamentals – Capítulo 8.
- [5] STANDARD, ASHRAE. 55 (2010). Thermal environmental conditions for human occupancy, 2010.
- [6] Simões Pires, J. R (1999). Fundamentos e Aplicações da Psicrometria. São Paulo.

- [7] ISO, I. (1989). 7243: Hot environments-estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature). Geneva: ISO.
- [8] LEITE, E. (2002). Stress térmico por calor–estudo comparativo dos métodos e normas de quantificação. 2002. 123 f (Doctoral dissertation, Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Departamento de Pós-Graduação da Universidade Federal de Santa Catarina em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis).
- [9] Atmel, <http://www.atmel.com/devices/atmega328.aspx>, accedido 05/2015.
- [10] Maxim Integrated, <https://www.maximintegrated.com/en/products/analog/sensors-and-sensor-interface/DS18B20.html>, accedido 05/2015.
- [11] NOTE, Maxim Application (2002). Overview of 1-Wire Technology and Its Use.
- [12] Sensirion, <http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature/humidity-temperature-sensor-sht7x/>, accedido 05/2015.
- [13] Bosch, <https://www.adafruit.com/products/1603>, accedido 05/2015.
- [14] SEMICONDUCTORS, Philips. The I2C-bus specification. Philips Semiconductors, 2000, vol. 9397, no 750, p. 00954.
- [15] NXP, http://www.nxp.com/products/interface_and_connectivity/i2c/i2c_real_time_clocks_rtc/series/PCF8563.html, accedido 05/2015.
- [16] ON Semiconductor, <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/product.do?id=MC34063A>, accedido 05/2015.
- [17] Vera, L., Firman, A., Diaz, M., & Busso, A. DESARROLLO DE UN MEDIDOR DE ESTRES TÉRMICO. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente .Vol. 14, 2010. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.
- [18] Poletto, G., Cáceres, M., Busso, A. DESARROLLO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO PARA LA CALIBRACION DE SENSORES DE TEMPERATURA. UNNE - XXI Reunión de Comunicaciones Científicas y Tecnológicas – 2015.



Luis H. Vera.- Nació en Machagai, Argentina en 1976. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Nacional del Nordeste en 2000; de Máster en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Brasil, en 2004; título de Doctor en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Brasil, en 2009 y su título de Especialista en Vinculación Tecnológica de la Universidad Nacional del Nordeste en 2013. Sus campos de investigación están relacionados con la aplicación de sistemas de aprovechamiento de energía, las Energías Renovables y la Eficiencia Energética.



Andrés D. Firman.- 40 años de edad. Ingeniero Electricista Orientación Electrónica (2006). Dr. En Ciencias Área Energías Renovables (2014). Investigador del Grupo en Energías Renovables de la Universidad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Corrientes, Argentina.



Luciano A. Zini.- Nació en Goya, Corrientes, Argentina en 1989. Recibió su título de Ingeniero en Electrónica de la Universidad Nacional del Nordeste en 2016. Su campo de investigación está relacionado al área de energías renovables e instrumentación.



Manuel Cáceres.- Nació en Rosario, Argentina en 1980. Alcanzó el grado de Ingeniero Electricista (O. Electrónica) en la Universidad Nacional del Nordeste en 2009 y el grado de Doctor en Ciencias Área Energías Renovables en la Universidad Nacional de Salta, Argentina, en 2014. Sus campos de investigación se centran mayormente en aplicaciones de sistemas fotovoltaicos, electrónica aplicada a la instrumentación y al procesamiento de señales, electrónica de potencia.

Evaluation of the Urban Heat Island intensity in the city of Guayaquil

Evaluación de la intensidad de la Isla Urbana de Calor en la ciudad de Guayaquil

Massimo Palme¹

Guillermo Soriano²

Geovanna Villacreses³

José Macías³

¹Universidad Católica del Norte, Escuela de Arquitectura, Antofagasta, Chile.
E-mail: mpalme@ucn.cl

²Escuela Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador
E-mail: gsorian@espol.edu.ec

³Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables, Quito, Ecuador
E-mail: geovanna.villacreses@iner.gob.ec; jose.macias@iner.gob.ec

Abstract

Urban Heat Island phenomenon refers to the overheating of urbanized environments respect to their surroundings. UHI causes losses of comfort in the street, increases in the building energy consumption and a general modification of weather. Combination of UHI and global climate change could generate an increase up to 500% in the air conditioning use. The coast of Ecuador is characterized by hot humid climate, with maximum daily temperature over 30 °C. The biggest city of the country is Guayaquil which leads on the river Guayas, near to the Pacific Ocean, in the described weather conditions. This paper presents simulations which were made with monitoring data of Guayaquil. Simulations were conducted by using the Urban Weather Generator tool and a GIS-based spatial analysis in order to estimate the urban representative parameters for different sectors of the cities. The monitoring was conducted during the first months of 2017 in 10 locations of the city. Simulation results show a general urban heat island intensity of 2-5 °C in the city, without sensitive variations between zones. Simulation strategy tries to maximize the difference in the urban form (following also the historical development of the city). UHI is present especially during the nights. The monitoring is currently ongoing; preliminary results will be used to confirm the simulations.

Index terms— Urban Heat Island, Guayaquil, Urban weather, Urban simulation

Resumen

El fenómeno Isla Urbana de Calor se refiere al sobrecalentamiento de un entorno urbanizado respecto a las áreas circundantes. La isla de calor causa pérdida de confort en las calles, aumento de los consumos energéticos de los edificios y una modificación general del clima. La combinación de isla de calor y del cambio climático global podría generar un aumento hasta del 500% en la utilización de aire acondicionado. La costa de Ecuador se caracteriza por tener un clima cálido húmedo, con temperaturas máximas diarias por encima de los 30°C. La ciudad más grande del país, Guayaquil, se encuentra situada en la orilla del río Guayas, cerca al Océano Pacífico, en las condiciones climáticas descritas. Este artículo presenta simulaciones realizadas en base a datos de monitoreo de la ciudad de Guayaquil. Las simulaciones se realizaron con el software Urban Weather Generator y para estimar los parámetros urbanos representativos de diferentes sectores de la ciudad se usó los Sistemas de Información Geográfica SIG. El monitoreo fue realizado durante los primeros meses de 2017 en 10 ubicaciones de la ciudad. Los resultados de las simulaciones muestran una intensidad general de la isla de calor entre 2 y 5 grados a través de toda la ciudad, sin variaciones significativas entre zonas. La estrategia de simulación trata de maximizar las diferencias en la forma urbana (siguiendo además el crecimiento histórico de la ciudad). La isla de calor se hace presente especialmente durante las noches. El monitoreo se encuentra actualmente en curso: los resultados preliminares se utilizarán para confirmar las simulaciones.

Palabras clave— Isla urbana de calor, Guayaquil, clima urbano, simulación urbana

Recibido:30-01-2018, Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Forma sugerida de citación: Palme, M. et al. (2017). "Evaluación de la intensidad de la isla de calor en la ciudad de Guayaquil"

1. INTRODUCCIÓN

La Isla Urbana de Calor es un fenómeno que, si bien se ha venido estudiando desde hace tiempo [1]–[4], todavía necesita más estudios para entender sus reales impactos sobre el planeta. Las ciudades parecen ser el futuro de la humanidad, sin embargo son también los lugares en donde más se produce la disipación energética hacia el ambiente [5]. Este tipo de estructura de disipación [6] puede anular en la práctica los esfuerzos para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio en la matriz energética [7]. Por ello, en los últimos años se han intensificado los estudios de monitoreo y simulación del fenómeno a lo largo del mundo [8]. En América del Sur, sin embargo, los datos disponibles son todavía muy escasos, focalizándose especialmente en Brasil, Chile y Argentina [9]–[13].

El clima de Ecuador, cálido y húmedo en la mayoría de su extensión (macro regiones de la costa, sierra y amazonia), permite la correcta urbanización siempre y cuando se tenga en cuenta las peculiaridades climáticas. La presencia de la gran ciudad de Guayaquil, la más poblada del país (más de 2.000.000 de habitantes), vuelve indispensable la realización de estudios sobre el microclima urbano.

La ciudad ha tenido además un desarrollo muy irregular, pasando muy rápidamente desde una extensión circunscrita en su casco histórico hacia una ciudad dispersa, en donde han encontrado lugar tanto migrantes rurales como los pobladores con mayor nivel adquisitivo (Fig. 1). La morfología urbana, todavía bastante uniforme, ha visto en los últimos años la colocación de edificios de desarrollo vertical en ciertos sectores de la ciudad. Esto ha causado modificaciones en los escasos flujos de aire que contribuían a la evacuación del calor de la ciudad.

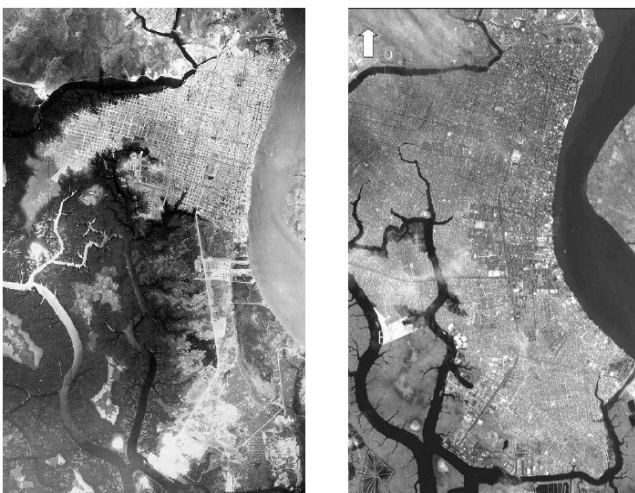


Figura 1: Crecimiento de la ciudad entre 1960 y 2001

2. METODOLOGÍA

En los estudios de isla de calor, normalmente se utiliza una de las siguientes técnicas:

- análisis de imágenes satelitales
- monitorización en sitio
- simulación atmosférica

Los estudios realizados por satélite, proporcionan una buena resolución espacial pero no permiten un análisis temporal detallado; al revés, los estudios de monitorización permiten la obtención de datos horarios de temperatura pero cubren solamente puntos específicos (en donde se emplazan los sensores). Los estudios de simulación, pueden ser entonces una buena aproximación espacio-temporal al fenómeno, siempre y cuando estén bien calibrados y representen de una manera objetiva los sectores urbanos considerados.

2.1. Selección de los sectores

Debido a su crecimiento desordenado, la ciudad de Guayaquil presenta diferencias entre sectores tanto en términos de materialidad como en la forma urbana misma. En este trabajo se ha decidido identificar arbitrariamente los sectores a analizar, siguiendo el desarrollo histórico de la ciudad y tratando de maximizar las diferencias morfológicas presentes, con la finalidad de estimar su impacto en la intensidad de la isla de calor resultante.

Los sectores seleccionados son los siguientes:

1. Barrio histórico de “Las Peñas”
2. Centro histórico de la ciudad
3. Zona de primera expansión sur-oeste
4. Zona de segunda expansión norte
5. Zona industrial
6. Zona de campus universitario
7. Zona de nueva urbanización en el río
8. Zona de expansión sur extremo

Los sectores han sido investigados con la herramienta ArcGis, mediante fotointerpretación a partir de una ortofoto (Fig. 2) se levantó los parámetros necesarios para la simulación urbana como: superficie construida, superficie de fachada desarrollada, superficie verde. Las Fig. 3-10 reportan las imágenes de los sectores y su levantamiento en el SIG.



Figura 2: Sectores seleccionados



Figura 4: Centro histórico



Figura 5: Zona de expansión S-O



Figura 3: Sector urbano "Las Peñas"



Figura 6: Zona de expansión N

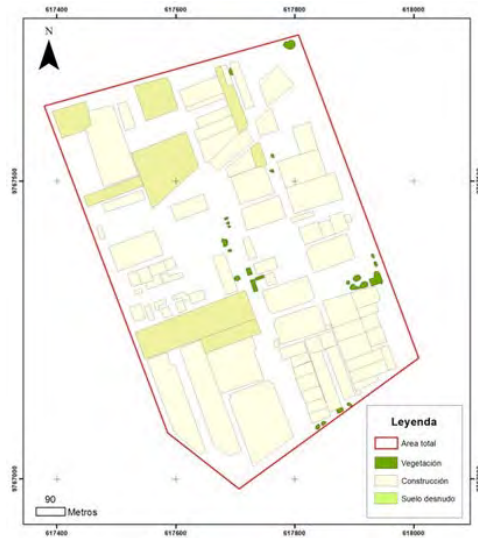


Figura 7: Zona industrial



Figura 10: Expansión S extremo



Figura 8: Zona campus universitario



Figura 9: Zona de nuevo desarrollo en el río

2.2. Simulación Urban Weather Generator

Urban Weather Generator (UWG) es una herramienta de simulación que acopla un análisis atmosférico con un análisis del funcionamiento de edificios [14]. Estudios de sensibilidad [15]–[17] han demostrado que los parámetros fundamentales para la realización de la simulación son de tres tipologías:

- Parámetros morfológicos (superficie construida, fachada desarrollada, área verde)
- Propiedades ópticas de las superficies (paredes, techos, calles)
- Generación de calor antrópico (tráfico, acondicionamiento, equipos)

A partir del levantamiento efectuado, se obtuvieron los parámetros más importantes para su inserción en UWG. La Tabla 1 reporta los valores de los parámetros morfológicos obtenidos.

Tabla 1: Valores de parámetros morfológicos de las UTC

	S_v/h	S_c/h	F/h
Las Peñas	0.77	0.17	1.5
Centro histórico	0.1	0.04	2.6
Zona expansión Sur-Oeste	0.73	0.02	1.4
Zona expansión Norte	0.6	0.04	1.5
Zona industrial	0.41	0.01	0.1
Campus universitario	0.2	0.18	0.2
Zona nuevo desarrollo	0.61	0.1	2.9
Zona extremo Sur	0.71	0.11	0.7

2.3. Propiedades de los materiales

Las propiedades ópticas de los materiales se han obtenido a partir de pruebas de laboratorios efectuadas en la Escuela Politécnica del Litoral. La Fig. 11 muestra el espectrofotómetro UV/Vis/NIR utilizado en el análisis. La Fig. 12 muestra los típicos materiales utilizados para techos en la ciudad. La tabla 2 resume las propiedades consideradas para cada ubicación.



Figura 11: equipo de medición

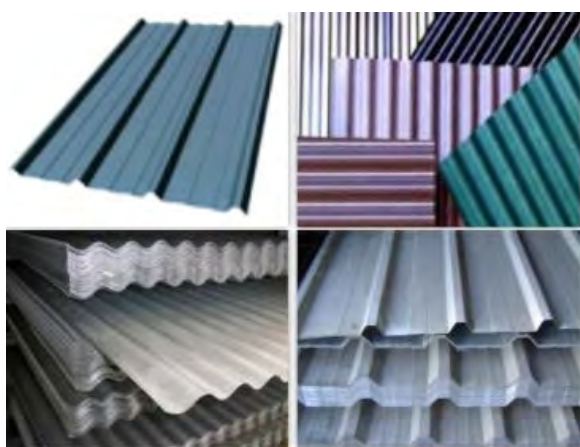


Figura 12: típicos materiales de techos

Tabla 2: Valores de las propiedades de los materiales

	Muros		Techos		Suelos	
	R	E	R	E	R	E
Las Peñas	0.58	0.90	0.51	0.28	0.30	0.95
Centro	0.13	0.90	0.32	0.90	0.15	0.91
Sur-Oeste	0.58	0.90	0.51	0.28	0.20	0.76
Norte	0.38	0.90	0.51	0.28	0.20	0.76
Zona industrial	0.58	0.90	0.48	0.94	0.20	0.76
Campus	0.58	0.90	0.42	0.90	0.30	0.95
Desarrollo	0.58	0.90	0.42	0.90	0.25	0.88

Extremo Sur	0.58	0.90	0.51	0.28	0.20	0.76
-------------	------	------	------	------	------	------

3. RESULTADOS

Los resultados evidencian la presencia de una isla de calor de intensidad promedio de unos 2.5 °C en toda la ciudad, con pequeñas variaciones entre sectores. Durante el día se pueden tener islas de calor incluso negativas, debido a la presencia de elementos de sombra en el casco urbano. Durante las noches, las islas de calor aumentan su intensidad hasta 4.5 °C. Las tablas 3 y 4 resumen las temperaturas y las intensidades de isla de calor para días de tipo despejado y nublado, obtenidas por simulación UWG.

Tabla 3: Temperatura e intensidad de isla de calor día despejado

	Mañana		Tarde		Noche	
	T (°C)	I (°C)	T (°C)	I (°C)	T (°C)	I (°C)
Las Peñas	29.5	-1.2	32.2	2.2	30.0	4.5
Centro	30.0	-0.7	32.5	2.5	30.0	4.5
Sur-Oeste	30.0	-0.7	32.7	2.7	30.2	4.7
Norte	30.0	-0.7	32.7	2.7	30.1	4.6
Zona industrial	30.4	-0.3	33.0	3.0	29.7	4.2
Campus	29.7	-1.0	32.3	2.3	29.7	4.2
Desarrollo	29.5	-1.2	31.7	1.7	29.5	4.0
Extremo Sur	30.0	-0.7	32.6	2.6	30.2	4.7

Tabla 4: Temperatura e intensidad de isla de calor día nublado

	Mañana		Tarde		Noche	
	T (°C)	I (°C)	T (°C)	I (°C)	T (°C)	I (°C)
Las Peñas	28.2	-0.6	29.7	1.7	28.0	2.8
Centro	29.0	0.2	30.0	2.0	28.7	3.5
Sur-Oeste	29.0	0.2	30.0	2.0	28.2	3.0
Norte	29.0	0.2	30.0	2.0	28.2	3.0
Zona industrial	29.1	0.3	31.0	3.0	27.8	2.6
Campus	28.2	-0.6	29.7	1.7	27.4	2.2
Desarrollo	28.2	-0.6	29.5	1.5	27.4	2.2
Extremo Sur	29.0	0.2	30.0	2.0	28.2	3.0

4. CONCLUSIONES

La isla de calor es un fenómeno que puede volverse preocupante para una ciudad como Guayaquil, dispersa y ubicada en un clima cálido y húmedo. Resultados de simulaciones detectan una isla de calor de unos 2.5°C, con pico de más de 4°C en muchos sectores de la ciudad. La zonificación efectuada muestra solamente pequeñas variaciones entre un sector y otro, dejando

entender que las variables macro climáticas son preponderantes sobre las variables urbanas en este caso. Monitorizaciones en curso parecen confirmar los resultados de las simulaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Howard, "The Climate of London," Int. Assoc. Urban Clim., p. 285, 1988.
- [2] T. R. Oke, Boundary Layer Climate. 1987.
- [3] T. R. Oke, "The energetic basis of the urban heat island," Q. J. R. Meteorol. Soc., vol. 108, no. 455, pp. 1–24, 1982.
- [4] T. R. Oke, "City size and the urban heat island," Atmos. Environ. Pergamon Pres, vol. 7, pp. 769–779, 1973.
- [5] I. Prigogine and I. Stengers, Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature. 1984.
- [6] S. K. Lai, H. Han, and P. C. Ko, "Are cities dissipative structures?," Int. J. Urban Sci., vol. 17, no. 1, pp. 46–55, 2013.
- [7] M. Palme, The possible shift between heating and cooling demand of buildings under climate change conditions: Are some mitigation policies wrongly understood? 2017.
- [8] M. Santamouris, "Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions," Sci. Total Environ., vol. 512–513, pp. 582–598, 2015.
- [9] H. Romero, F. Irrarázaval, D. Opazo, M. Salgado, and P. Smith, "Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile," Eure, vol. 36, no. 109, pp. 35–62, 2010.
- [10] P. Sarricolea and H. Romero, "ANÁLISIS DE LOS FACTORES CONDICIONANTES SOBRE LAS TEMPERATURAS DE EMISIÓN SUPERFICIAL EN EL ÁREA METROPOLITANA DE VALPARAÍSO, CHILE," ACE Archit. City Environ., no. 14, pp. 45–66, 2010.
- [11] H. R. Sobral, "Heat island in São Paulo, Brazil: Effects on health," Crit. Public Health, vol. 15, no. 2, pp. 147–156, 2005.
- [12] C. Carrasco, M. Palme, M. Angel Galvez, L. Inostroza, U. Padilla, and A. Fonseca, "Urban Heat Island of Valparaíso, Chile - A Comparison between 2007 and 2016," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 245, no. 7.
- [13] P. I. Figuerola and N. A. Mazzeo, "Urban-rural temperature differences in Buenos Aires," Int. J. Climatol., vol. 18, no. 15, pp. 1709–1723, 1998.
- [14] B. Bueno, L. Norford, J. Hidalgo, and G. Pigeon, "The urban weather generator," J. Build. Perform. Simul., vol. 6, pp. 269–281, 2013.
- [15] A. Nakano, "Urban weather generator user

interface development: Towards a usable tool for integrating urban heat island effect within design process," Igarss 2014, pp. 1–141, 2015.

- [16] A. Salvati, M. Palme, and L. Inostroza, "The key parameters for urban heat island assessment in the Mediterranean context: A sensitivity analysis using the Urban Weather Generator model," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 245, p. 82055, 2017.
- [17] M. Palme, C. Carrasco, and A. Lobato, "Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Effect in South American Cities," Procedia Eng., vol. 169, pp. 199–206, 2016.



Massimo Palme.- Ingeniero en Materiales por la Universidad de Trieste, Italia y Doctor en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Actualmente es Profesor Asociado de la Escuela de Arquitectura de la Universidad Católica del Norte en Antofagasta, Chile. Desde 2006 realiza investigaciones en las áreas de la arquitectura y el urbanismo sostenible, la simulación del desempeño energético de los edificios y el impacto del cambio climático en el entorno construido.



Guillermo Soriano.- Cuenta con un doctorado (PhD) en ingeniería mecánica de Texas A&M University su investigación se enfocó en problemas de transferencia de calor por impacto de gotas, además cuenta con una Maestría en Ingeniería Industrial de Georgia Institute of Technology. Actualmente, es profesor agregado de la carrera de ingeniería mecánica de la Escuela Politécnica del Litoral. Su interés es el uso de energía y optimización de sistemas térmicos. Entre sus últimos proyectos se encuentra la evaluación de desempeño energético de diferentes métodos de construcción usados en Ecuador y el estudio de métodos de disipación de calor en el suelo para aplicaciones de climatización.



Geovanna Villacreses.- Ingeniera Geógrafa y del Medio Ambiente, egresada del Máster en Ciencias en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de Salzburgo (avalada por la Universidad San Francisco de Quito). Actualmente, es investigadora en el Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables en Ecuador. Desde el

2014 realiza sus investigaciones en el campo de la eficiencia energética en edificaciones y la aplicación de métodos multicriterio para la selección de sitios con potencial renovable en el país.



José Macías.- Nació en 1986 en Portoviejo, Ecuador. Estudió Ingeniería Mecánica y el 2017 obtuvo su maestría en Ciencias de la Ingeniería en la Escuela Superior Politécnica del Litoral de la ciudad de Guayaquil. Actualmente es investigador en el Instituto Nacional de Eficiencia

Energética y Energías Renovables en Ecuador. Realiza sus actividades en el laboratorio de Ensayos Térmicos y Eficiencia Energética ubicado Guayaquil. Sus trabajos se enfocan principalmente en la mejora del rendimiento energético de edificaciones.

Urban Heat Island in South-America. Simulation and monitoring in coastal cities of Chile

Isla Urbana de Calor en América del Sur. Simulación y monitoreo en ciudades costeras de Chile

M. Palme¹

C. Carrasco²

¹Escuela de Arquitectura, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile
E-mail: mpalme@ucn.cl

²Escuela de Construcción, Facultad de Ingeniería, Universidad de Valparaíso, Chile
E-mail: claudio.carrasco@uv.cl

Abstract

This paper presents simulations and monitoring of the Urban Heat Island phenomenon conducted in the Chilean cities of Antofagasta and Valparaíso. Both cities are middle sized (between 300.000 and 500.000 inhabitants) and are located on the coast of the Pacific Ocean. Simulations were conducted by using the Urban Weather Generator tool and a GIS-based spatial analysis in order to estimate the urban representative parameters for different sectors of the cities. Different monitoring strategies were applied to the two cities: in the case of Antofagasta, fixed data loggers recorded temperature during 2015 and 2016 in 7 city sectors; in the case of Valparaíso, a mobile monitoring was conducted during a winter day in 2007 and it was repeated in 2016. Monitoring results show an Urban Heat Island intensity of 2-5 °C in 2016 for both cities, according to the simulations. Spatial distribution of the UHI demonstrates the existence of specific sectors of the cities where the phenomenon is more intense. This is due to the urban form (e. g. high-rise buildings) and to the anthropogenic heat production (cars and buildings conditioning). Urban form affects especially night-time UHI, while heat production affects both day-time and night-time UHI. A comparison between 2007 and 2016 of the case of Valparaíso shows that UHI is growing up year by year, possibly because of the global climate change or because of a more intensive use of the energy in the city (air-conditioning, transportation). The resulting thermal sensation, both inside buildings and in the street, could be regarded as uncomfortable during many days of the summer and will lead to even more intensive energy use in the near future.

Resumen

Este trabajo presenta resultados de simulaciones y monitoreo del fenómeno isla urbana de calor realizado en las ciudades chilenas de Antofagasta y Valparaíso. Ambas ciudades son de tamaño intermedio (entre 300.000 y 500.000 habitantes) y se encuentran a las orillas del Océano Pacífico. Las simulaciones se realizaron utilizando la herramienta Urban Weather Generator y un proceso de análisis espacial basado en SIG para estimar los parámetros urbanos representativos de diferentes sectores de las ciudades. Diferentes estrategias de monitoreo fueron aplicadas en los dos casos: en Antofagasta, aparatos fijos registraron las temperaturas en 2015 y 2016 en 7 sectores de la ciudad; en Valparaíso un recorrido móvil fue realizado en un día de invierno de 2007 y fue replicado en 2016. Los resultados del monitoreo muestran una intensidad de isla urbana de calor de 2-5 °C en 2016 para ambas ciudades, de acuerdo con las simulaciones. La distribución espacial de la isla de calor demuestra la existencia de sectores específicos en donde el fenómeno es más intenso. Esto se debe a la forma urbana (edificios altos) y a la generación de calor antropogénica (automóviles y edificios). La forma urbana afecta especialmente las horas nocturnas, mientras que la producción de calor afecta todo el día. La comparación entre 2007 y 2016 del caso de Valparaíso muestra que la isla de calor está aumentando, posiblemente por el efecto del cambio climático global o a causa de una utilización más intensiva de la energía (aire acondicionado, transporte). La sensación térmica resultante, tanto en el interior como en el exterior de los edificios, puede ser considerada como uncomfortable durante muchos días del verano y causará un aumento del uso intensivo de la energía.

Index terms— Urban Heat Island, Chile, Urban weather, Urban simulation

Palabras clave— Isla urbana de calor, Chile, Clima urbano, Simulación urbana

Recibido: 30-01-2018, Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Forma sugerida de citación: Palme, M.; Carrasco, C. (2017). "Isla urbana de calor en América del Sur. Simulación y monitoreo en ciudades costeras de Chile"

1. INTRODUCCIÓN

La isla urbana de calor es un fenómeno estudiado desde finales del siglo diecinueve [1] y formalizado en sus aspectos energéticos desde la segunda mitad del siglo veinte [2]–[4]. Básicamente, se trata de una diferencia de temperatura entre ciudad y entorno rural (siempre positiva durante la noche y a veces negativa durante el día dependiendo de los climas específicos y de la generación de calor propia de la urbanización) debida a la retención de calor de las superficies opacas que conforman los ambientes construidos. Por lo tanto, los factores más influyentes en su generación son:

- Los materiales que conforman el entorno (techos, paredes, suelos, agua, áreas verdes);
- La morfología específica del sitio (altura de los edificios, superficie ocupada, fachada desarrollada, relación ancho/alto de las calles);
- La generación de calor propia del entorno debido a tráfico vehicular, acondicionamiento de los edificios, metabolismo de las personas, utilización de aparatos de toda naturaleza.

A pesar de tener un desarrollo teórico consolidado, el fenómeno es todavía objeto de estudio debido a la presencia de muchos factores que influyen su intensidad, de origen diferente y no siempre computables de manera sencilla [5]–[7]. A esto se suma la necesidad de obtener datos empíricos que confirmen los resultados de simulaciones o especulaciones de carácter teórico sobre su impacto en las diferentes ciudades del mundo.

En América del Sur, además, la falta de datos sobre clima urbano es todavía mayor, encontrándose disponibles a la fecha solamente unos pocos estudios publicados [8]–[10]. A pesar de ello, investigaciones recientes han avanzado en la comprensión del fenómeno, relacionándolo con la forma urbana e introduciendo metodologías para la evaluación de los parámetros necesarios para poder predecir su intensidad en ciudades del continente [11]–[13].

En este trabajo, resultados de estudios de simulación previos, realizados para diferentes ciudades de la costa pacífica de América del Sur, son comparados con monitorizaciones efectuadas en dos ciudades chilenas. Las ciudades de Valparaíso y Antofagasta se encuentran emplazadas en la costa pacífica de Chile, en un clima que varía entre el Mediterráneo (Valparaíso) y el desértico costero (Antofagasta). Presentan una isla de calor de una intensidad entre 2 y 5 grados centígrados, más pronunciada en Valparaíso que en Antofagasta, debido a la influencia del clima árido en el segundo caso. Presentan una morfología urbana muy variada, y en general han tenido un crecimiento desorganizado que ha producido enormes diferencias en los parámetros de clasificación de los entornos edificados, especialmente altura y tasa de ocupación del suelo.

2. METODOLOGÍA

Para este estudio se realizaron simulaciones y monitorizaciones durante el período 2015-2017 (Antofagasta) y 2006-2017 (Valparaíso).

2.1. Simulaciones

Las simulaciones se realizaron con la herramienta informática Urban Weather Generator (UWG). Este software utiliza un simulador atmosférico y un simulador de performance de los edificios para generar un archivo climático urbano a partir de un archivo base, generalmente obtenido a través de un proceso de representación de un año meteorológico típico sobre datos monitoreados en ambiente rural. Para efectuar el cálculo, UWG necesita de un set de parámetros representativos del entorno urbano a simular en cuanto a su materialidad, morfología y calor de origen antrópica (edificios y tráfico).

Para ser representativos de una ciudad, los sectores simulados deben además haber sido obtenidos a través de un proceso de análisis de datos espaciales que pueda generar unas categorías de tejido urbano (UTC). En este trabajo se utilizan las categorías obtenidas (4 para Antofagasta y 5 para Valparaíso) en trabajos anteriores [14], [15] a través de un análisis de componente principal (PCA) sobre un estudio espacial realizado con herramientas SIG.

En la tabla 1 se presentan los valores de los parámetros morfológicos utilizados: superficie construida por hectárea (S_c/h), superficie de área verde por hectárea (S_v/h), superficie de fachada desarrollada por hectárea (F/h).

Tabla 1: Valores de parámetros morfológicos de las UTC

	S_c/h	S_v/h	F/h
Antofagasta U1	0.41	0.20	0.76
Antofagasta U2	0.42	0.01	2.10
Antofagasta U3	0.65	0.00	1.20
Antofagasta U4	0.36	0.01	0.41
Valparaíso U1	0.75	0.11	1.62
Valparaíso U2	0.25	0.64	0.76
Valparaíso U3	0.16	0.85	0.10
Valparaíso U4	0.61	0.01	1.30
Valparaíso U5	0.56	0.16	0.66

Según indican estudios de sensibilidad realizados [16], [17], además de los parámetros morfológicos, los otros valores que más influyen en la generación del clima urbano por UWG son el calor de origen antrópica en la calle debido al tráfico (en este trabajo, 25 W/m^2 en todos los sectores) y las propiedades ópticas de las superficies, especialmente de los techos (en este trabajo, 0.51 y 0.42 son los valores asumidos como reflectividad para Antofagasta y Valparaíso respectivamente).

2.2. Monitorización

La monitorización se llevó a cabo en dos maneras diferentes para los casos. En Antofagasta, se instalaron medidores fijos en 6 ubicaciones, mientras que en Valparaíso se procedió a una monitorización dinámica de diferentes recorridos de acceso a la ciudad en 2006 y se repitió la misma monitorización en 2016. La Fig. 1 muestra los recorridos.



Figura 1: Recorridos de monitorización para el caso de Valparaíso

3. RESULTADOS

3.1. Simulaciones

Los resultados de las simulaciones muestran una isla de calor de intensidad variable, más intensa durante las noches y con importantes diferencias estacionales, tanto en el caso de Antofagasta como en el caso de Valparaíso. Las Fig. 2 y 3 reportan los resultados de simulación en Antofagasta para una semana de verano y de invierno respectivamente. Se puede notar como la isla de calor es más pronunciada en invierno, alcanzando más de 2.5 °C de intensidad, tanto en la tarde como de noche.

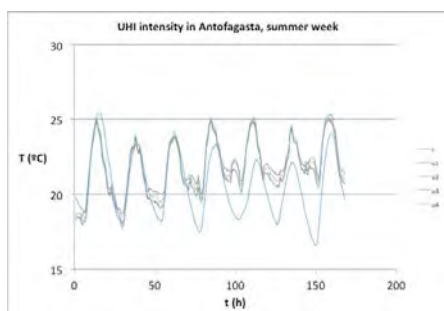


Figura 2: Resultados de simulación para Antofagasta en verano

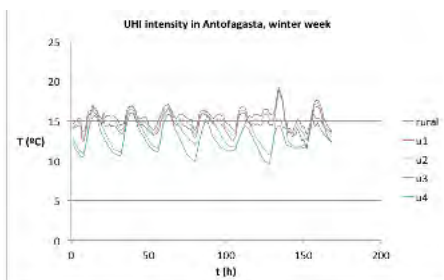


Figura 3: Resultados de simulación para Antofagasta en invierno

Las Fig. 4 y 5 reportan los resultados de simulación en Valparaíso para una semana de verano y una de invierno. De forma muy similar a lo detectado en el caso de Antofagasta, la isla de calor es más pronunciada en invierno, alcanzando los 5 °C de intensidad durante las noches. Respecto al caso de Antofagasta, durante el día en Valparaíso puede pronunciarse la inversión del fenómeno, con generación de intensidades de isla de calor ligeramente negativas debido al efecto de las sombras.

En ambas ciudades es verificable una diferencia de intensidad de isla de calor entre un sector urbana y otro que llegan a alcanzar 1°C. Los sectores con más densidad de ocupación, menos áreas verdes y más superficie de fachada desarrollada son los que muestran niveles más altos de temperatura.

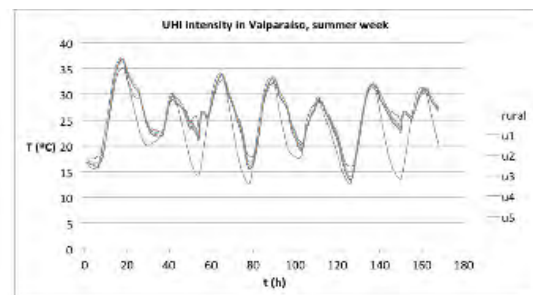


Figura 4: Resultados de simulación para Valparaíso en verano

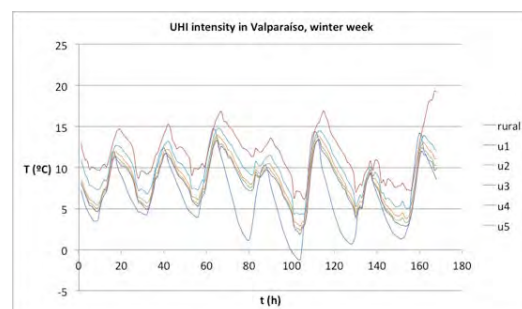


Figura 5: Resultados de simulación para Valparaíso en invierno

3.2. Monitorizaciones

La monitorización de la ciudad de Antofagasta reportó diferencias sustanciales entre ubicaciones. La Fig. 6 muestra claramente como en ciertos sectores el perfil de temperatura sigue claramente el mismo perfil de zonas extraurbanas, debido principalmente a corrientes de aire, presencia de vegetación y cierta altura relativa respecto al centro de la ciudad. En sectores más encerrados, los valores de temperatura suben en 2-3 °C, por efecto de las actividades que allí se

desarrollan (puerto, ferrocarril) además que de la morfología urbana.

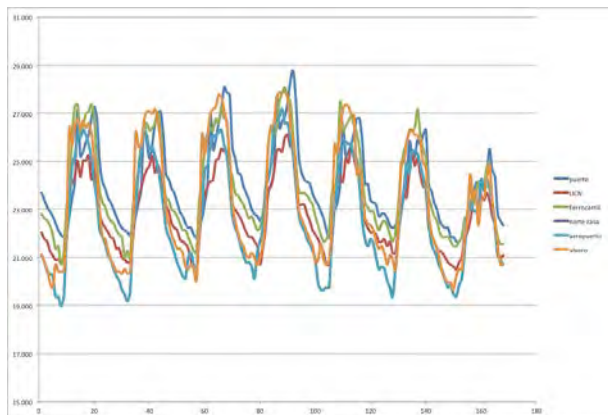


Figura 6: Resultados de monitorización en Antofagasta

En el caso de Valparaíso, se realizaron los recorridos en tres horarios diferentes (mañana, mediodía y tarde) durante un día de invierno en 2007 y se repitió el trabajo en 2016. Se detecta una isla de calor que depende mucho de la combinación entre horario y trama urbana, cosa que confirma la importancia del efecto de las sombras sobre la isla de calor diurna. Las Fig. 7 y 8 muestran la intensidad de la isla de calor a las 20 horas, para 2007 y 2016 respectivamente. Se puede notar como en los puntos centrales de los transectos, especialmente del transecto 1 y 2, se obtienen los valores más elevados de intensidad de isla de calor.

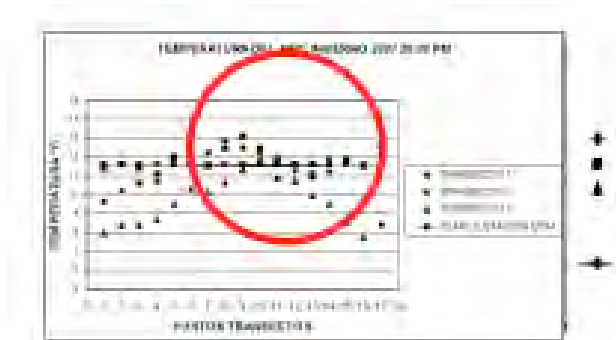


Figura 7: Resultados de monitorización en Valparaíso 2007

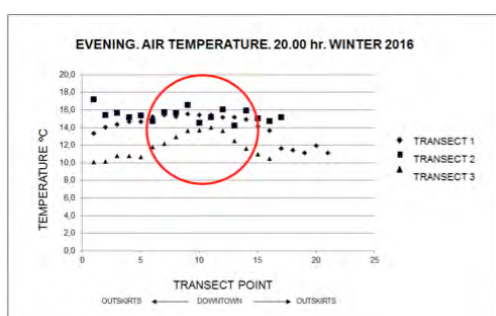


Figura 8: Resultados de monitorización en Valparaíso 2016

Otro dato muy importante que es posible extraer del análisis de estos resultados es que en el decenio transcurrido entre 2007 y 2016, la intensidad de calor en Valparaíso aumentó en aproximadamente 1°C , cosa que hace pensar en un efecto de retroalimentación entre la urbanización y el clima urbano: aún sin cambios significativos en la densidad de los sectores analizados, hubo aumento de la intensidad de isla de calor, debido evidentemente a un uso más intensivo del automóvil y de aparatos de acondicionamiento térmico de los edificios, además que otro tipo de instrumentos y equipos dispersores de calor.

Uno de los sectores más afectados es justamente la zona central de la ciudad, en donde se ubican la mayor parte de los edificios de oficinas, que por su uso tienen una intensidad energética mayor.

4. CONCLUSIONES

El presente trabajo evaluó la existencia de islas de calor en las ciudades chilenas de Antofagasta y Valparaíso, su distribución espacial dependiente de la morfología urbana y su variabilidad temporal. Los resultados muestran un buen ajuste de las simulaciones con los datos reales obtenidos por monitorización. También se obtuvo el preocupante resultado de un aumento del fenómeno en el tiempo, con una velocidad (1°C por decenio) muy superior a la velocidad de calentamiento global de la atmósfera. Esto hace pensar que en el futuro el enfoque ecológico debiera dirigirse hacia la problemática de la disipación de calor en las ciudades, además que en el cambio en la matriz energética para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

De acuerdo a estudios internacionales [18], [19], la intensidad de utilización de aire acondicionado aumentará en hasta un 500% en los próximos 30 años, debido principalmente a los nuevos estándares de confort y de consumo de los países emergentes. Si bien el tamaño poblacional hace que China e India sean el epicentro de esta preocupante predicción, América del Sur también va a contribuir con una tasa comparable de aumento.

Futuras investigaciones deberán considerar factores como la distribución de materiales y especialmente el tráfico vehicular para obtener indicaciones espaciales más concretas que puedan dirigir los futuros procesos de desarrollo urbano de una manera más sostenible.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha realizado gracias a las aportaciones de la Universidad Católica del Norte y de la Universidad de Valparaíso. Los autores desean agradecer además al Dr. Cristián Henríquez por compartir los datos de monitorización de la ciudad de Antofagasta.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. Howard, "The Climate of London," Int. Assoc. Urban Clim., p. 285, 1988.
- [2] T. R. Oke, "The energetic basis of the urban heat island," Q. J. R. Meteorol. Soc., vol. 108, no. 455, pp. 1–24, 1982.
- [3] T. R. Oke, "City size and the urban heat island," Atmos. Environ. Pergamon Pres, vol. 7, pp. 769–779, 1973.
- [4] T. R. Oke, Boundary Layer Climate. 1987.
- [5] M. Santamouris, "Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions," Sci. Total Environ., vol. 512–513, pp. 582–598, 2015.
- [6] M. Kolokotroni, Y. Zhang, and R. Watkins, "The London Heat Island and building cooling design," Sol. Energy, vol. 81, no. 1, pp. 102–110, 2007.
- [7] M. Santamouris and D. Kolokotsa, Urban climate mitigation techniques. 2016.
- [8] H. R. Sobral, "Heat island in São Paulo, Brazil: Effects on health," Crit. Public Health, vol. 15, no. 2, pp. 147–156, 2005.
- [9] H. Romero, F. Irrázaval, D. Opazo, M. Salgado, and P. Smith, "Climas urbanos y contaminación atmosférica en Santiago de Chile," Eure, vol. 36, no. 109, pp. 35–62, 2010.
- [10] P. Sarricolea and H. Romero, "ANÁLISIS DE LOS FACTORES CONDICIONANTES SOBRE LAS TEMPERATURAS DE EMISIÓN SUPERFICIAL EN EL ÁREA METROPOLITANA DE VALPARAÍSO, CHILE," ACE Archit. City Environ., no. 14, pp. 45–66, 2010.
- [11] M. Palme, C. Carrasco, and A. Lobato, "Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Effect in South American Cities," Procedia Eng., vol. 169, pp. 199–206, 2016.
- [12] M. B. Sosa, E. N. Correa, and M. A. Cantón, "Urban grid forms as a strategy for reducing heat island effects in arid cities," Sustain. Cities Soc., vol. 32, pp. 547–556, 2017.
- [13] C. Carrasco, M. Palme, M. Angel Galvez, L. Inostroza, U. Padilla, and A. Fonseca, "Urban Heat Island of Valparaíso, Chile - A Comparison between 2007 and 2016," in IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2017, vol. 245, no. 7.
- [14] M. Palme, L. Inostroza, G. Villacreses, A. Lobato, and C. Carrasco, "Urban weather data and building models for the inclusion of the urban heat island effect in building performance simulation," Data Br., vol. 14, pp. 671–675, 2017.
- [15] M. Palme, L. Inostroza, G. Villacreses, A. Lobato-Cordero, and C. Carrasco, "From urban climate to energy consumption. Enhancing building performance simulation by including the urban heat island effect," Energy Build., vol. 145, 2017.
- [16] A. Salvati, M. Palme, and L. Inostroza, "The key parameters for urban heat island assessment in the Mediterranean context: A sensitivity analysis using the Urban Weather Generator model," IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., vol. 245, p. 82055, 2017.
- [17] A. Nakano, "Urban weather generator user interface development: Towards a usable tool for integrating urban heat island effect within design process," Igarss 2014. pp. 1–141, 2015.
- [18] D. J. Sailor, "Risks of summertime extreme thermal conditions in buildings as a result of climate change and exacerbation of urban heat islands," Build. Environ., vol. 78, pp. 81–88, 2014.
- [19] M. Santamouris, "On the energy impact of urban heat island and global warming on buildings," Energy Build., vol. 82, pp. 100–113, 2014.



Massimo Palme.- Ingeniero en Materiales por la Universidad de Trieste, Italia y Doctor en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Actualmente es Profesor Asociado de la Escuela de Arquitectura de la

Universidad Católica del Norte en Antofagasta, Chile. Desde 2006 realiza investigaciones en las áreas de la arquitectura y el urbanismo sostenible, la simulación del desempeño energético de los edificios y el impacto del cambio climático en el entorno construido.

Claudio Carrasco Aldunate.- Arquitecto por la Universidad de Valparaíso, Chile y Doctor en Arquitectura, Energía y Medio Ambiente por la Universidad Politécnica de Cataluña, España. Actualmente es Profesor Asociado de la Escuela de Construcción de la Universidad de Valparaíso.

Evaluation and passive design optimization of an university amphitheater in a temperate climate in Ecuador

Evaluación y optimización en base al diseño pasivo de un coliseo universitario en una zona climática templada del Ecuador

B. P. Remache¹ M. I. Miño²

¹Carrera de Logística y transporte, Universidad Politécnica Estatal del Carchi, Tulcán Calle Antisana y Avenida Universitaria, Ecuador

E-mail: paul.remache@upec.edu.ec

²UCL Energy Institute, University College London, 14Upper Woburn Place, London WC1H 0NN, United Kingdom

E-mail: isabel.mino.16@ucl.ac.uk

Abstract

In this paper, we present the results of the project about the simulation of passive techniques for the optimization of the envelope of an amphitheatre type building located in a temperate climate of Ecuador. The coliseum of the Universidad San Francisco de Quito generates indoor temperatures out of the thermal comfort range during extended periods of time, therefore it has been proposed to redesign the envelope by means of the application of passive design techniques such as the replacement of roof materials and cross-ventilation. The simulation was run in the software DesignBuilder for which a climate file was developed using data from local climate stations. Additionally, international standards ANSI/ASHRAE 55 e ISO 7730 were used in order to establish the thermal comfort range. It has been demonstrated that the optimization of roof materials only, reduces cooling energy consumption by 28%. In addition, it was shown that the period of time when the temperature of the coliseum remains out of the thermal comfort range was reduced by 29%. However, it was found that when the temperature of the coliseum is out of the thermal comfort range it is below the lower limit of such range, indicating that the thermal comfort range should be reconsidered since it could be moved towards lower values due to the high metabolic levels of the sportsmen.

Index terms— Amphitheatre, construction materials, DesignBuilder, energy efficiency, optimization, passive design, thermal comfort.

Resumen

En este documento se presentan los resultados del proyecto acerca de la simulación de técnicas pasivas para la optimización de la envolvente de una edificación tipo anfiteatro ubicada en una zona climática templada del Ecuador. El coliseo de la Universidad San Francisco de Quito genera temperaturas internas fuera del rango de confort térmico durante extendidos periodos de tiempo, por lo que se propone el rediseño de su envolvente por medio de la aplicación de técnicas de diseño pasivas como el reemplazo de materiales de construcción y ventilación cruzada. La simulación se realizó en el software DesignBuilder para lo cual se desarrolló un archivo de clima basado en datos de estaciones climáticas de la zona. Adicionalmente, se utilizaron las normativas internacionales ANSI/ASHRAE 55 e ISO 7730 para establecer el rango de temperaturas de confort térmico. Se ha logrado demostrar que solamente al optimizar los materiales utilizados en el techo, el consumo energético por enfriamiento se reduce en un 28%. Además, se demostró que el periodo de tiempo en el que la temperatura interna del coliseo se mantiene fuera del rango de confort térmico se redujo en un 29%. Sin embargo, se encontró que cuando la temperatura interna del coliseo se ubica fuera del rango de confort térmico, esta se encuentra debajo del límite inferior de dicho rango, lo cual indica que el rango de confort térmico debería reconsiderarse pues este podría desplazarse hacia valores más bajos debido a los altos niveles metabólicos de los deportistas.

Palabras clave— Anfiteatro, confort térmico, DesignBuilder, diseño pasivo, eficiencia energética, materiales de construcción, optimización.

Recibido: Colocar fecha de envío (Ej: 15-07-2016), Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial
Forma sugerida de citación: Colocar Primer Apellido y la inicial del nombre de todos los autores Ej: Peterchev, A.; Handel, G. (2017). Nombre del trabajo técnico entre comillas. El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

1. INTRODUCCIÓN

La conciencia sobre el uso y optimización de los recursos ha crecido en los últimos años [1]. Países como Chile, México y España cuentan actualmente con normativas que establecen requerimientos sobre eficiencia energética al momento de construir edificaciones [2]. Sin embargo, de acuerdo a [3], en América Latina la adopción de un modelo sostenible de construcción de edificaciones aún se encuentra en proceso. Por otro lado, de acuerdo a [4], el consumo energético de los sectores residencial y comercial en el Ecuador alcanzan un 18% igualando al sector industria y superando al sector construcción que posee un 16%. Adicionalmente, climatizar el espacio interno de una edificación puede ocupar entre el 18% y 73% de su consumo energético total [5]. A pesar de que la inversión inicial de construcciones energéticamente eficientes es más alta que la inversión de construcciones ordinarias [6], una edificación, cuyo proceso de diseño tuvo en cuenta factores como ubicación, geografía, materiales, niveles de aislamiento térmico, cargas metabólicas y de equipos electrónicos, brindará mejores prestaciones de confort térmico [7], así como bajos niveles de consumo energético por climatización (costos operativos). El coliseo de la Universidad San Francisco de Quito, es un claro ejemplo de una edificación tipo anfiteatro que no fue diseñada en base a sus necesidades energéticas, por lo que se ha planteado el analizar y rediseñar la envolvente de la edificación a través de un modelo energético desarrollado en DesignBuilder. Los resultados muestran que solamente al optimizar los materiales del techo del coliseo se obtiene una reducción del 28% en el consumo energético por ventilación mecánica. También, el número de horas que la temperatura interna del coliseo se mantiene fuera del rango de confort se redujo en un 29%. A continuación, se detalla la metodología utilizada para el proceso de rediseño de la envolvente del coliseo, así como los parámetros que se han tomado en cuenta para levantar el caso base y construir el modelo optimizado en DesignBuilder. Se hace énfasis en el desarrollo del archivo de clima utilizado en las simulaciones y el establecimiento del rango de confort térmico. Finalmente se presentan resultados de la investigación y se realizan conclusiones y recomendaciones.

2. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en esta investigación se ha dividido en 3 fases:

2.1. Fase de recopilación de información

El proceso de recopilación de datos se ha dividido en dos sub-fases que se han llevado a cabo simultáneamente. Una de ellas corresponde a la revisión bibliográfica, en la que se revisan e identifican estrategias pasivas que puedan aplicarse en el caso del coliseo de la Universidad San Francisco de Quito, mientras que la otra corresponde a una investigación de campo. La investigación de campo tiene como objetivo el recopilar información

que permita levantar el modelo 3D en el software DesignBuilder.

2.2.1 Investigación de campo

Dentro del proceso de investigación de campo se ha procurado incluir toda la información necesaria para establecer no solamente el modelo 3D del coliseo, sino también, los diferentes perfiles que contribuyen en la simulación.

Ocupación: La densidad ocupacional se estableció teniendo en cuenta varios factores. En primer lugar, fue necesario considerar que la Universidad consta de tres diferentes periodos a lo largo del año y a través de los cuales la ocupación varía. Considerando que la capacidad máxima del coliseo es de 1200 personas, se tienen diferentes porcentajes de ocupación de acuerdo a la Tabla 1. Las actividades especiales son eventos en los que el coliseo se ocupa al 100%.

Tabla 1: Ocupación de acuerdo al periodo del año

Periodo	Detalle	Porcentaje de ocupación Lunes a Viernes	Porcentaje de ocupación fines de semana	Porcentaje de ocupación actividades especiales
Primer periodo	Clases regulares y actividades especiales	8.3%	12.5%	100%
Segundo Periodo	Clases de verano	5%	8.3%	100%
Tercer Periodo	Vacaciones, solo actividades especiales	2.5%	5%	100%

Además, se ha considerado la variación de densidad ocupacional, actividad, niveles de iluminación y recambio de aire fresco de acuerdo al día de la semana y dependiendo de la zona del coliseo.

Rango de confort térmico: En base a los lineamientos de las normativas ANSI/ASHRAE 55 e ISO 7730, se estableció un rango de 21°C con 50% de humedad relativa hasta 25°C con 50% de humedad relativa. Una serie de encuestas contribuyeron en la determinación del rango de confort térmico, que incluyeron información sobre género, cantidad de nubes en el cielo, actividad metabólica, sensación de confort térmico, cantidad de aire, olor, temperatura externa a la edificación, temperatura interna de la edificación, zona del coliseo y nivel CLO (factor de vestimenta). Es importante mencionar que datos como las temperaturas interna y externa de la edificación, así como el nivel de vestimenta CLO no fueron proporcionados por los encuestados sino por el encuestador por medio del uso de sensores de temperatura y tablas proporcionadas por las normativas correspondientes.

Materiales: Parte esencial del modelo base lo conforman los materiales actuales del coliseo. En base a investigación de campo y análisis de planos arquitectónicos se obtuvieron los materiales que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Materiales actuales del coliseo de la Universidad San Francisco de Quito

Construcción	Material	Espesor (mm)	Coefficiente de convección (W/m ² K)
Techo	Techo galvanizado verde	0,44	11,54
Pared exterior	Enlozado-bloque-enlozado	150	19,87
Pared interior	Enlozado-bloque-enlozado	150	5,54
Piso	Hormigón-alfombra	250	0,342
Ventanas	Vidrio	3	5,894

Cargas térmicas: Para el caso de cargas térmicas se tomaron en cuenta dos elementos importantes: equipos de oficina y luminarias. Para cada uno se generaron los perfiles de consumo correspondientes que fueron cargados en el modelo que posteriormente se desarrolló en el software DesignBuilder.

Archivo de clima: Se construyó el archivo de clima utilizando datos de las estaciones meteorológicas de la Universidad San Francisco de Quito y de la ciudad de Tumbaco. El archivo de clima generado proporciona información de temperatura del aire, velocidad y dirección del viento, radiación solar, humedad relativa y presión atmosférica. También, fue necesario determinar la ubicación exacta del coliseo utilizando GPS, obteniéndose las siguientes coordenadas:

- Latitud -0,19
- Longitud -78.43

El algoritmo utilizado para construir el archivo .epw de clima se muestra en la Fig. 2.



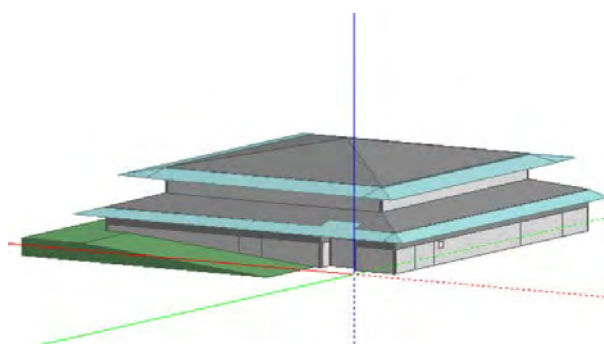
Figura 2: Algoritmo para construcción del archivo de clima

2.2. Fase de modelado del caso base

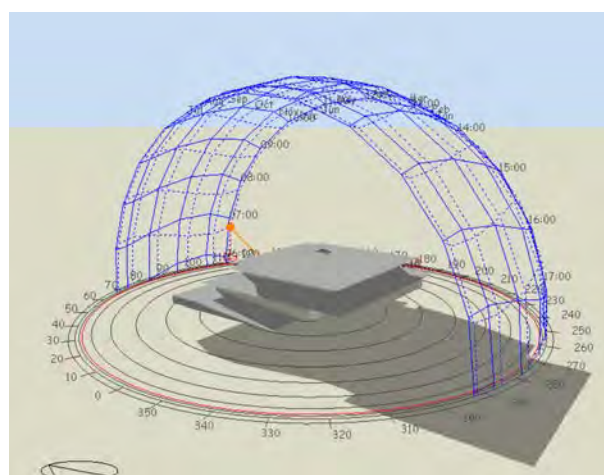
Una vez obtenida toda la información técnica del edificio, así como valores de parámetros, perfiles de consumo y el archivo de clima, se levantó el modelo en 3D en DesignBuilder. Se tuvo especial cuidado en identificar construcciones cercanas que pudieran intervenir generando sombras u obstruyendo el flujo natural del viento (Fig. 3).



(a)



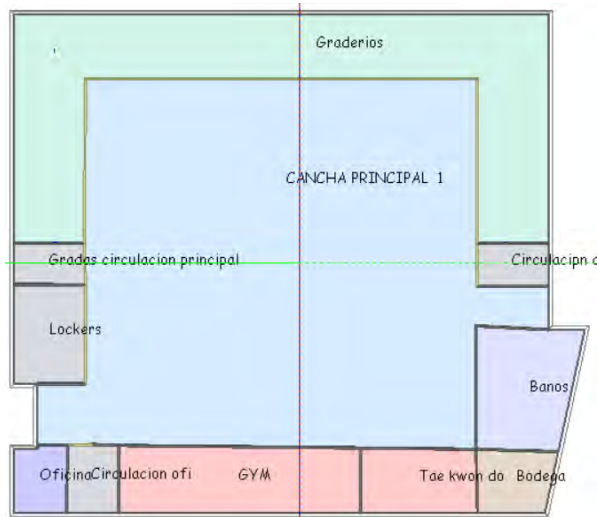
(b)



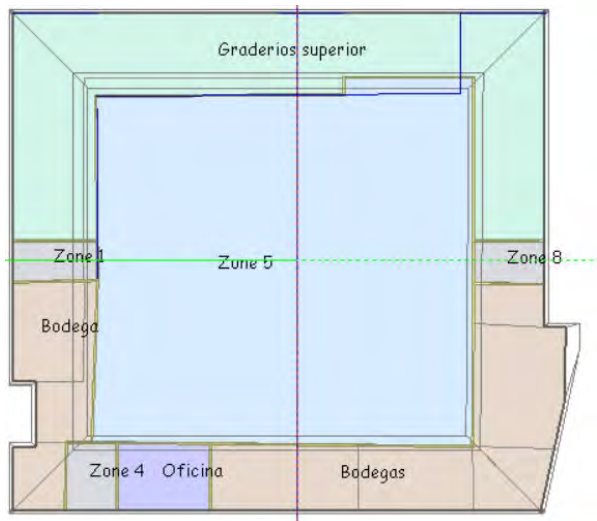
(c)

Figura 3: (a) Coliseo de la Universidad San Francisco de Quito, Foto Real (b) Modelo en 3D del coliseo de la Universidad San Francisco de Quito desarrollado en DesignBuilder (c) Posición del sol (Hora-Fecha), resultado del archivo climático generado

Se incluyeron todas las zonas del coliseo para eliminar al máximo las incertidumbres y obtener resultados lo más cercanos posibles a los reales, como se muestra en la Fig. 4.



(a)



(b)

Figura 4: (a) Zonificación del primer piso del coliseo (b) Zonificación del segundo piso del coliseo

2.3. Fase de optimización del caso base

La optimización del caso base consiste en la aplicación de estrategias pasivas de climatización para reducir el consumo energético del edificio y mejorar los niveles de confort térmico de los ocupantes. Varias estrategias fueron analizadas en la fase de levantamiento de información, siendo las más adecuadas para el caso del coliseo las mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3: Estrategias pasivas de optimización energética aplicables al caso del coliseo de la Universidad San Francisco de Quito

Estrategia de optimización energética	Problemas comunes	Aplicabilidad
Optimizar ganancias de calor internas	Área excesiva de ventanas	N/A
	Iluminación ineficiente	N/A
	Mal manejo de iluminación	N/A
	Ganancias de calor innecesarias	N/A
Optimizar ventilación natural	Mejorar el diseño de ventanas o aperturas	Aplica
	Utilizar aperturas en el techo	Aplica
	Almacenar calor durante el día y removerlo en la noche	N/A
	Sistema híbrido de ventilación	N/A
Optimizar el uso de la luz del día	Control de luces artificiales	N/A
	Alto reflejo de luz natural	N/A
	Distribución de luz natural	N/A
Almacenamiento de energía	Capacidad térmica	N/A
	Respuesta térmica	N/A
	Niveles de aislamiento térmico	Aplica
	Control automático	N/A
Minimizar pérdidas de distribución	Forma de la edificación	N/A
	Numero de zonas	N/A

En base a las estrategias pasivas aplicables presentadas en la Tabla 3, se desarrolló un modelo en el que se optimizaron los materiales del techo, de las particiones del coliseo y se rediseñaron las ventanas para favorecer el flujo cruzado de viento. Con esto se buscó reducir los flujos de calor por convección y radiación a través de paredes y techo, así como optimizar el efecto de ventilación natural. En la Tabla 5 se muestra un resumen de los cambios realizados.

Tabla 5: Estrategias pasivas aplicadas en el caso optimizado del coliseo de la Universidad San Francisco de Quito

Zona	Material	Descripción
Techo	Techo metálico	0,44 mm de espesor
	Aislamiento de fibra de vidrio	348 mm de espesor
	Techo metálico	0,44 mm de espesor
Paredes	Cemento	12 mm de espesor
	Bloque	150 mm de espesor
	Aire	50 mm de espesor
	Gypsum	12 mm de espesor
Ventanas	Vidrio	Ventanas en las parte superior e inferior del edificio

3. RESULTADOS

El modelo del caso base, así como el modelo optimizado, y de acuerdo al archivo de clima generado, fueron simulados en un año típico, obteniéndose los siguientes resultados:

A lo largo del año típico, la temperatura operativa promedio mensual de los dos casos se muestra en la Fig. 6. Aquí se evidencia la reducción de dicha temperatura en el modelo optimizado en el que no sobrepasa los 19,4°C mientras que en el caso base alcanza aproximadamente los 20°C.

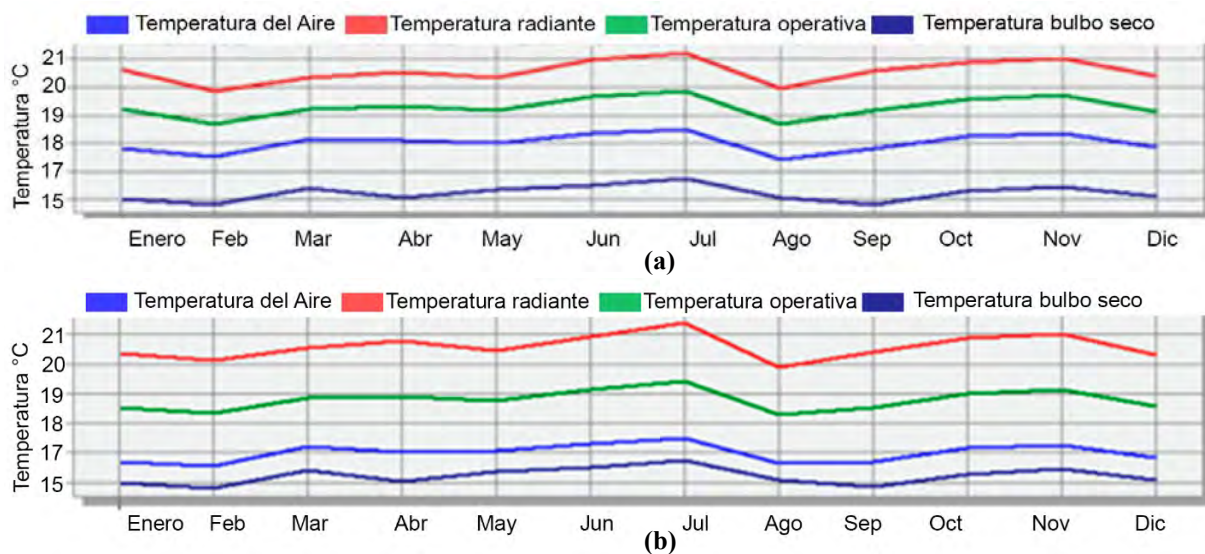


Figura 5: Temperatura mensual durante un año típico (a) Caso Base (b) Caso optimizado

Sin embargo, para apreciar con mayor precisión la incidencia de la optimización, se presentan en la Fig. 7 los gráficos de temperatura operativa para los dos casos a lo largo del año típico, pero con una resolución diaria durante la semana más caliente del año.

En este caso se observa que la temperatura operativa del caso optimizado no sobrepasa los 28°C mientras que la temperatura operativa en el caso base sobrepasa los 30°C.

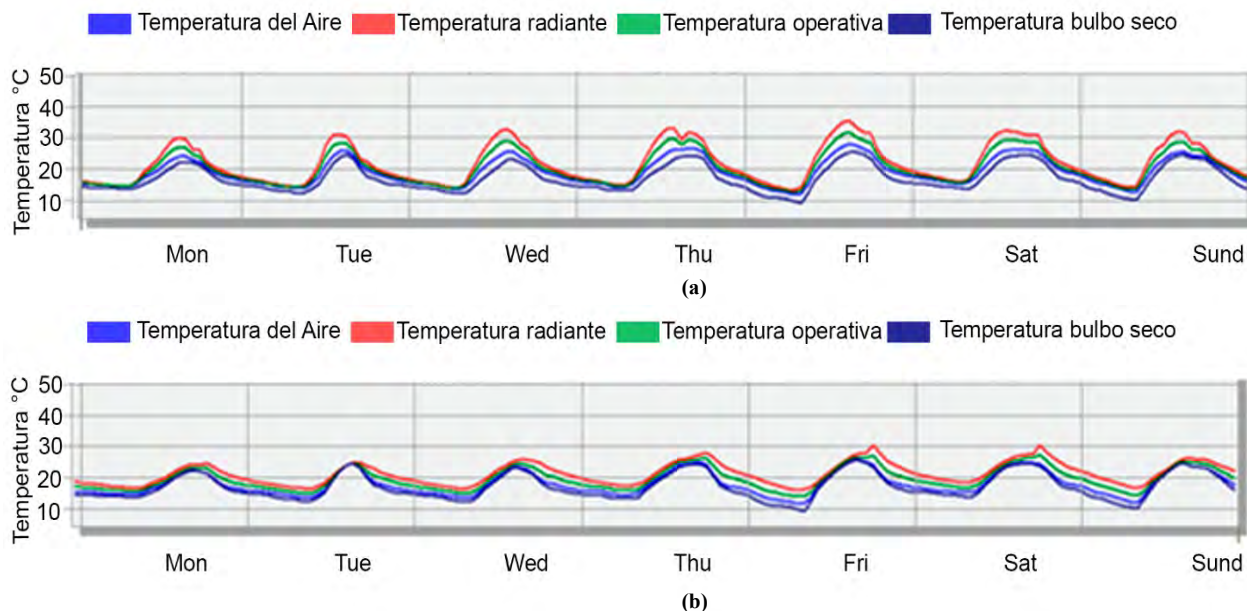


Figura 5: Temperatura diaria durante la semana del 4 al 11 de Junio en un año típico (a) Caso Base (b) Caso optimizado

Adicional a esto, en la Tabla 6 se muestran el número de horas a diferentes temperaturas durante la semana más caliente del año típico correspondiente a las fechas del 11 al 4 de junio.

Tabla 5: Número de horas a diferentes temperaturas durante la semana del 4 al 11 de junio

Temperatura °C	Caso base (Horas)	Caso optimizado (Horas)
31	3	
30	5	
29	8	
28	14	
27	8	1
26	6	9
25	8	11
24	6	12
23	6	13
22	5	10
21	11	12
20	6	9
19	5	10
18	4	6
17	5	6
16	8	5
15	2	12
14	5	3
13	5	1
12	3	

Se puede observar que para el caso optimizado la el mayor número de horas la temperatura operativa se encuentra dentro del rango de confort, mientras que en el caso base se aprecia que la mayoría de horas la temperatura se encuentra sobre el límite superior del rango.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se redujo el número de horas fuera de la zona de confort para el coliseo de la Universidad San Francisco de Quito, pasando de 2776 horas para el caso base a 1997 horas para el caso optimizado.

Se identificó que el principal problema de diseño en la edificación se encuentra en los materiales del techo, estos absorben el calor de la radiación solar aumentando drásticamente la temperatura operativa en el interior del coliseo. Solo al optimizar los materiales del techo se obtuvo una reducción del 28% en consumo energético por ventilación mecánica.

Ciertas estrategias de optimización influyen más que otras, como por ejemplo las estrategias de modificar las paredes y realizar nuevas ventanas para optimizar la circulación de aire no contribuyen tanto como mejorar los materiales del techo.

La selección de materiales en el proceso de diseño de una edificación, enfocada en disminuir el consumo energético por climatización y mejorar el confort térmico.

co de los ocupantes, puede significar una mayor inversión inicial pero una disminución en costos operativos, así como un incremento en la satisfacción del ocupante.

Es esencial construir un archivo climático específico para la ubicación de la edificación ya que de esto dependerá la fiabilidad de los resultados.

El archivo climático generado durante el proyecto y la experiencia en el análisis de las diferentes estrategias pasivas de climatización, pueden aplicarse en otros proyectos de eficiencia energética de edificaciones tanto de la Universidad San Francisco de Quito como de la zona climática de Cumbayá, siendo esta una contribución no solo para la comunidad investigativa sino también para el sector de la construcción en general.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad San Francisco de Quito por la apertura para realizar la presente investigación, así como también al Instituto Nacional de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER) por su soporte técnico. También agradecemos al Ing. Esteban Chermali por realizar su tesis en base a esta investigación y colaborar en todo el proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Newton, "Climate change, another hurdle for older generation," Gerodontology, vol. 26(4), pp. 243-244, 2009.
- [2] Téllez, L. A., Villarreal, L., Menchaca, C., Porsen, R., Bremer, M. H, Situación de la edificación sostenible en América Latina. Mexico: PNUMA, 2014.
- [3] El Universo, Construcciones sustentables buscan ganar terreno en el Ecuador, 2016. Obtenido de: <https://www.eluniverso.com/vida-estilo/2016/08/07/nota/5728566/construcciones-sustentables-buscan-ganar-terreno-pais>
- [4] Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Balance energético nacional, 2014. Disponible en: [http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/balance-](http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/balance-energetico/)

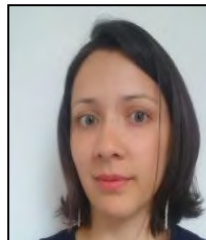
energetico/

- [5] D. Ürgue-Vorsatz, L. Cabeza, S., Serrano, C. Barreneche, K. Petrichenco, "Heating and cooling energy trends and drivers in buildings," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol 41, pp. 85-98, Jan., 2015.
- [6] C. Clauser, "Geothermal energy use in Germany status and potential," Geothermics, vol. 26(2), pp. 203-220, Abr., 1997.
- [7] N. Djuric, V. Novakovic, J. N. Holst, Z. Mitrovic, "Optimization of energy consumption in buildings with hydronic heating systems considering thermal comfort by use of computer-based tools," Energy and Buildings. vol. 39 (4), pp. 471-477, Abr., 2007.



Byron Paul Remache Vinueza.- Nació en Quito, Ecuador en 1986. Recibió su título de Ingeniero Mecánico de la Escuela Politécnica Nacional en 2011 y su título de Máster en Sistemas de Energía de la Universidad de Melbourne en 2014. Sus campos de investigación están relacionados con el diseño de edificaciones sustentables, aplicación de técnicas de climatización

pasivas y el análisis de ciclo de vida.



Isabel Miño-Rodríguez.- Investigadora Ecuatoriana que obtuvo su título de Arquitecta de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador; de Máster en Diseño y Construcción Sustentable de la Universidad del Desarrollo y actualmente cursa estudios para obtener su título de

PhD en Diseño e Ingeniería Ambiental en el University College London. Sus campos de investigación están relacionados con la eficiencia energética en edificaciones y el confort térmico.

Pareto Optimization and Fuzzy Logic for Coordinated Voltage Control in Electric Distribution Networks with the presence of Distributed generation.

Optimización de Pareto y Lógica Difusa para el Control Coordinado de Voltaje en Redes de Distribución Eléctrica con presencia de Generación distribuida.

J.R. Castro¹ M. Saad² S. Lefebvre² D. Asber³ L. Lenoir³

¹Universidad Técnica Particular de Loja (UTPL), Loja, Ecuador

E-mail: jrcastro@utpl.edu.ec

²École de technologie supérieure, Montreal, Canada

E-mail: maarouf.saad@etsmtl.ca; sergelefebvre@cpq@gmail.com

³L'Institut de recherche d'Hydro-Québec, IREQ, Varennes (QC), Canada

E-mail: asber.dalal@ireq.ca; lenoir.laurent@ireq.ca

Abstract

Electric distribution networks have Distributed Generation (DG) as a new actor, which requires new optimization and control techniques. This article proposes a new mathematical model of Coordinated Voltage Control (CVC). This new technique demonstrates the benefits of reactive power produced by DGs to minimize reactive power losses and voltage variations. This new technique called Variable Power Factor (VPF) uses Pareto Optimization to find the optimal voltage values in the pilot bus and the Fuzzy-PI controller to find the optimal reactive power value of the DGs. This new technique is applied to the IEEE 13 node test feeder network with a real and unbalanced load. The results demonstrate the efficiency of the proposed technique and the impact on the minimization of losses in electrical distribution networks.

Index terms— Pareto Optimization, Fuzzy Logic, Multi-Objective problem (MOP), Distributed Generation (DG), Electrical Distribution Networks.

Resumen

Las redes de distribución eléctricas tienen a la Generación Distribuida (DG) como un nuevo actor por lo que se requiere de nuevas estrategias de optimización y control. Este trabajo propone un nuevo modelo matemático de Control Coordinado de Voltaje (Coordinated Voltage Control “CVC”). Esta nueva técnica demuestra los beneficios de la potencia reactiva producida por los DGs para minimizar las pérdidas de potencia reactiva y minimizar las variaciones de voltaje. Esta nueva técnica llamada “Variable Factor de Potencia (VPF)” usa la Optimización de Pareto para encontrar los valores óptimos de voltaje en la barra principal y el controlador Fuzzy-PI para encontrar el valor óptimo de potencia reactiva de los DGs. Esta nueva técnica es aplicada a la red IEEE 13 node test feeder con una carga real y desbalanceada. Los resultados demuestran la eficiencia de la técnica propuesta y del impacto sobre la minimización de pérdidas en redes de distribución eléctricas.

Palabras clave— Optimización de Pareto, Lógica Difusa, Multi-Objetivo problema (MOP), Generación Distribuida, red de distribución eléctrica.

Recibido: (21-01-2018), Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Forma sugerida de citación: Castro J. et al (2018).

Nombre del trabajo técnico entre comillas “Pareto Optimization and Fuzzy Logic for Coordinated Voltage Control in electric distribution networks with the presence of distributed generation”.

El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes de distribución necesitan ajustar el voltaje en sus barras de acuerdo a la variación de la carga. Generalmente, la red tiene elementos que mantienen el voltaje dentro de los límites establecidos como los transformadores con tomas variables (OLTC), banco de capacitores e inductores [1].

Muchos investigadores usan CVC para mantener el voltaje dentro de los límites en redes de distribución con la presencia de DGs basado en tres objetivos[2]. El primer objetivo es minimizar el voltaje sobre la barra principal; el segundo objetivo es manejar adecuadamente la potencia reactiva en la red y el tercer objetivo es minimizar la variación de voltaje en los Generadores. Esto crea un problema de tres ecuaciones que forman Función Multi-Objetiva Problema (MOP)[2-5].

Los métodos que usan CVC resuelve adecuadamente el problema [2-4]. Sin embargo; a) no hay una solución que enfoque las pérdidas como un objetivo de MOP y b) CVC plantea tres objetivos, este nuevo método propone un nuevo modelo matemático para resolver el CVC usando únicamente dos objetivos en la MOP.

Las contribuciones de este trabajo consisten esencialmente en:

- 1) Un nuevo modelo matemático para CVC que incluya las pérdidas de potencia reactiva como un objetivo de MOP
- 2) Proponer un algoritmo para solucionar el MOP basado en Pareto y el controlador Fuzzy-PI
- 3) Aplicar cargas reales y variables para mostrar el impacto de los DGs en redes de distribución.
- 4) Reducir el número de objetivos para un CVC.

2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

El MOP tiene como objetivo ayudar a los técnicos que planifican y manejan la red de distribución a seleccionar los puntos de operación óptimos incluyendo a los DGs.

2.1. Variación de voltaje

El objetivo de la variación del voltaje es minimizar la variación sobre la barra principal. La forma matemática se la puede escribir como [3]:

$$F_1 = \sum_{i \in P} \lambda_i \left[(V_i^{ref} - V_i) - \sum_{k \in DG} C_{i,k}^V \cdot \Delta V_k \right]^2 \quad (1)$$

Donde P y DG son los índices de la barra principal y los DGs; V_i^{ref} , V_i son el voltaje de referencia y el voltaje medido sobre la barra i respectivamente y ΔV_k es la diferencia de voltaje entre dos iteraciones sobre el

generador en la barra k , ΔV_k es el coeficiente de la matriz de sensibilidad del voltaje de variación sobre las barras i y k respectivamente y λ_i es el peso.

2.2. Potencia Activa y Reactiva de los DGs

El segundo objetivo es la minimización de las pérdidas. Si la entrega del DG varía desde Q_{DGk1} a Q_{DGk2} entonces la pérdida de la potencia reactiva varía desde $Q_{l_{k1}}$ a $Q_{l_{k2}}$ respectivamente[6-8]. El factor de sensibilidad estará dado por [9]:

$$F_2 = \frac{dQ_{loss}}{dQ_{DGk}} = \sum_{k \in DG} \lambda_k^q \left(\frac{Q_{l_{k1}} - Q_{l_{k2}}}{Q_{DGk1} - Q_{DGk2}} \right) \quad (2)$$

Donde: λ_k^q es el coeficiente del peso.

El factor de potencia del DG viene dado por:

$$PF_{DGk} = \frac{P_{DGk}}{\sqrt{P_{DGk}^2 + Q_{DGk}^2}} \quad (3)$$

Donde P_{DGk} y Q_{DGk} es la potencia activa y reactiva del DG_k, y PF_{DGk} es el factor de potencia del DG_k. Asumiendo:

$$a_k = (\text{sign}) \tan(\cos^{-1}(PF_{DGk})) \quad (4)$$

La salida de la potencia reactiva del DG será:

$$Q_{DGk} = a_k P_{DGk} \quad (5)$$

Donde: $\text{sign} = \pm 1$ si el DG inyecta/consume potencia reactiva. De la ecuación 2, 3, 4 y 5 podemos escribir:

$$F_2 = \frac{dQ_{loss}}{dQ_{DGk}} = \sum_{k \in DG} \lambda_k^q \left(\frac{Q_{l_{k1}} - Q_{l_{k2}}}{a_k (P_{DGk1} - P_{DGk2})} \right) \quad (6)$$

Donde $P_{DGk} \leq P_{DGk}^{MAX}$ y $P_{DGk1} - P_{DGk2}$ es la variación del DG.

Basados en las relaciones anteriores, la MOP queda definida como:

$$\text{Min}(F_1; F_2) = \sum_{i \in P} \lambda_i \left[(V_i^{ref} - V_i) - \sum_{k \in DG} C_{i,k}^V \cdot \Delta V_k \right]^2; \quad (7)$$

$$\sum_{k \in DG} \lambda_k^q \left(\frac{Q_{l_{k1}} - Q_{l_{k2}}}{a_k (P_{DGk1} - P_{DGk2})} \right)$$

Sujeto a:

$$\lambda_i + \lambda_k^q = 1 \quad (8)$$

3. ALGORITMO PROPUESTO

La figura 1 presenta los pasos necesarios para que VPF encuentre el óptimo valor de voltaje en la barra principal y el óptimo valor de la potencia reactiva entregada por los DGs.

El software OpenDSS es el encargado de calcular el flujo de potencia de la red de distribución. OpenDSS es un software gratuito que se especializa en redes eléctricas [10]. La variación de demanda eléctrica hace que los parámetros eléctricos de la red estén cambiando continuamente, OpenDSS es el encargado de encontrar los nuevos parámetros eléctricos.

Simulink de Matlab trabaja en forma conjunta con OpenDSS. En Matlab se realiza los cálculos de Optimización [11]. Pareto y el controlador Fuzzy-PI encuentran los valores óptimos.

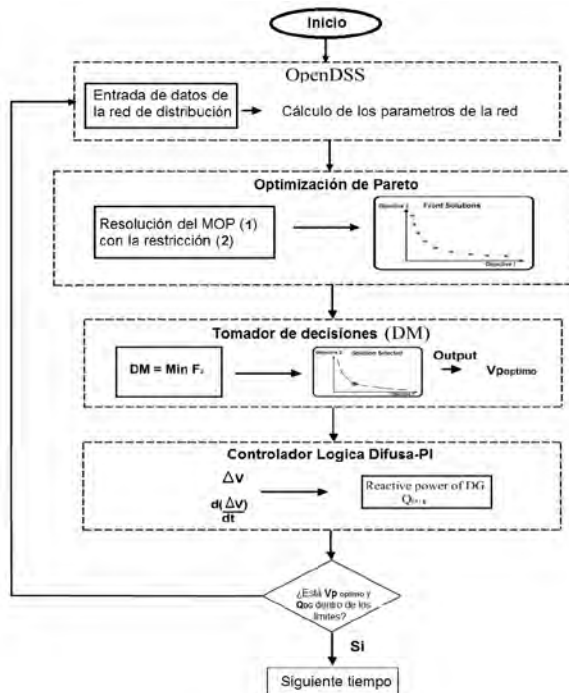


Figura 1: Diagrama de flujo del método propuesto VPF

Pareto utiliza algoritmos genéticos para encontrar la Frontera de Pareto[12]. Todos los conjuntos de soluciones que se encuentran en la Frontera de Pareto son soluciones válidas[13,14]. Un tomador de decisiones (DM) es necesario para encontrar un solo conjunto de soluciones. Este DM depende de las necesidades de los operadores de la red. En este caso, DM escogerá el conjunto de soluciones que minimice las pérdidas de potencia reactiva.

4. CASO DE ESTUDIO. IEEE 13 NODE TEST FEEDER

El tamaño del DG está calculado para una red con cargas variables y desbalanceadas. Para demostrar esta nueva técnica, una versión simplificada de una red de distribución es aplicada (IEEE 13 node test feeder) en la cual se conecta únicamente un DG (barra 675) como se muestra en la figura 2 [15].

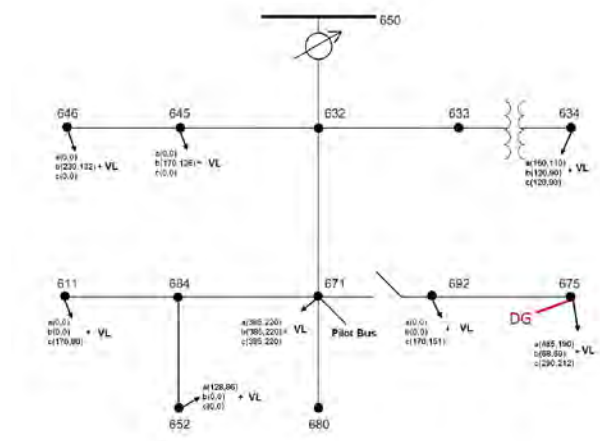


Figura 2: IEEE 13 node test feeder con cargas variables y desbalanceadas

4.1. Resultados de la simulación

En este estudio, las cargas variables son añadidas a cada barra de la red como lo muestra la figura 3a. La figura 3b muestra la carga variable sobre la barra principal (Barra 675). Todos estos datos han sido entregados por Hydro-Quebec.

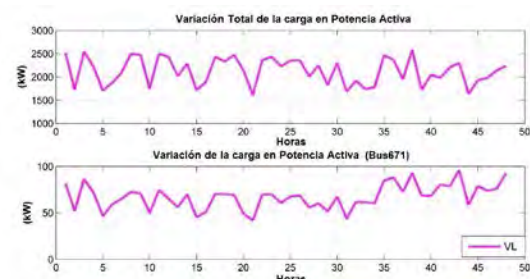


Figura 3: a) Carga variable Total; b) Carga variable en barra 675

La figura 4b muestra la variación de voltaje sobre la barra principal. VPF reduce las pérdidas y mantiene el voltaje dentro de los límites permisibles. Cambios bruscos en la carga causan variaciones en la generación de potencia reactiva del DG esto se observa en la figura 4a.

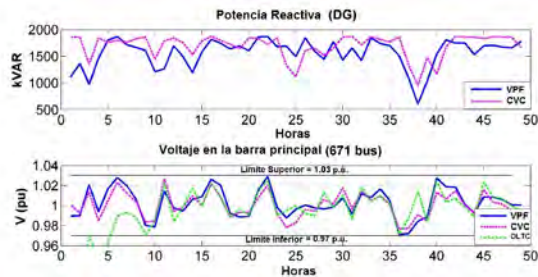


Figura 4: a) Potencia reactiva del DG; b) Voltaje en la barra 671

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Cuando la variación de voltaje en el método CVC es superior a 0.025 p.u (Tabla 1), el voltaje en VPF es menor excepto en la hora 35 y 39. En la hora 35, VPF requiere menos potencia reactiva del DG (figura 4a), esto se produce debido al fuerte cambio en la carga (figura 3a). En la hora 39, la velocidad de cambio de controlador PI produce una fuerte variación de la potencia reactiva del DG, causando la variación del voltaje. Sin embargo, el perfil de voltaje permanece dentro de los límites permitidos.

Tabla 1: Variación de Voltaje (p.u). Métodos CVC y VPF

Hour	OLTC	CVC	VPF
4	0.039	0.023	0.023
10	0.029	0.028	0.026
11	0.029	0.028	0.017
22	0.032	0.026	0.021
35	0.029	0.028	0.030
39	0.032	0.021	0.034
44	0.026	0.016	0.016

Las tradicionales redes de distribución utilizan únicamente el OLTC (On-Load Tap Changer) para controlar la variación del voltaje. La figura 4b muestra el comportamiento del voltaje en la red de distribución utilizando solo el OLTC.

VPF considera la MOP solamente con dos funciones objetivas: la minimización de la variación del voltaje sobre la barra principal y la minimización de las pérdidas de potencia reactiva. La tabla 2 presenta un resumen del método propuesto.

Tabla 2: Comparación entre CVC y VPF

	CVC	VPF
Número de objetivos (MOP)	3	2
Pesos dinámicos		X
DG en redes de distribución	X	X
Carga Variable y desbalanceada		X

Voltaje coordinado (barra principal)	X	X
Óptima participación de potencia reactiva	X	X
Uso de la optimización de Pareto	X	X
Uso de lógica difusa		X
FP variable en el DG		X
Manejo óptimo de las pérdidas		X

6. CONCLUSIONES

Un nuevo método llamado VPF es presentado. VPF muestra los beneficios del uso óptimo de la potencia reactiva de los DGs en redes de distribución. El problema es descompuesto en dos funciones objetivas, las pérdidas de potencia reactiva y la variación del voltaje sobre la barra principal.

El problema es formulado como una MOP y sus dos funciones objetivas son optimizadas simultáneamente. VPF fue usado para analizar el problema sobre una red de distribución IEEE 13 node test feeder con cargas variables y un DG.

VPF usa la optimización de Pareto y el controlador Lógica Difusa-PI para solucionar el MOP. VPF optimiza la potencia reactiva del DG para mantener el voltaje de la barra principal dentro de los límites establecidos.

Como futuro trabajo recomendado, se sugiere probar esta técnica en redes de distribución eléctrica del Ecuador.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Castro, "Intelligent distribution voltage control with distributed generation," Ph.D., Electrical Engineering, Ecole de technologie supérieure, 2016.
- [2] J. R. Castro, M. Saad, S. Lefebvre, D. Asber, and L. Lenoir, "Optimal voltage control in distribution network in the presence of DGs," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 78, pp. 239-247, 6// 2016.
- [3] O. Richardot, A. Viciu, Y. Besanger, N. HadjSaid, and C. Kieny, "Coordinated Voltage Control in Distribution Networks Using Distributed Generation," in *Transmission and Distribution Conference and Exhibition, 2005/2006 IEEE PES*, 2006, pp. 1196-1201.
- [4] J. Castro, M. Saad, S. Lefebvre, D. Asber, and L. Lenoir, "Coordinated Voltage Control in Distribution Network with the Presence of DGs and Variable Loads Using Pareto and Fuzzy Logic," *Energies*, vol. 9, p. 107, 2016.

- [5] Y. Gao, J. Liu, J. Yang, H. Liang, and J. Zhang, "Multi-Objective Planning of Multi-Type Distributed Generation Considering Timing Characteristics and Environmental Benefits," *Energies*, vol. 7, p. 6242, 2014.
- [6] Ochoa, L. F., A. Keane, and G. P. Harrison, "Minimizing the Reactive Support for Distributed Generation: Enhanced Passive Operation and Smart Distribution Networks," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 2134-2142, 2011.
- [7] L. F. Ochoa and G. P. Harrison, "Minimizing Energy Losses: Optimal Accommodation and Smart Operation of Renewable Distributed Generation," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 26, pp. 198-205, 2011.
- [8] F. A. Viawan and D. Karlsson, "Coordinated voltage and reactive power control in the presence of distributed generation," in *Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, 2008 IEEE*, 2008, pp. 1-6.
- [9] A. Anwar and H. R. Pota, "Loss reduction of power distribution network using optimum size and location of distributed generation," in *Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 2011 21st Australasian*, 2011, pp. 1-6.
- [10] "OpenDSS manual and reference guide," [Online] Available: <http://sourceforge.net/projects/electricdss>.
- [11] MathWorks, "Matlab, version 2014a, (R2014a)," in *The Mathworks Inc.*, ed. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2014.
- [12] V. Dutta, T. O'Donnell, S. Borkakati, and D. Bora, "PI-Fuzzy rule based controller for Analysis and performance evaluation of dc motor speed control," in *Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE), 2014 International Conference on*, 2014, pp. 175-180.
- [13] Ngatchou, P., Z. Anahita, and M. A. El-Sharkawi, "Pareto Multi Objective Optimization," in *Intelligent Systems Application to Power Systems, 2005. Proceedings of the 13th International Conference on*, 2005, pp. 84-91.
- [14] B. Tomoiaga, M. Chindriș, A. Sumper, A. Sudria-Andreu, and R. Villafila-Robles, "Pareto Optimal Reconfiguration of Power Distribution Systems Using a Genetic Algorithm Based on NSGA-II," *Energies*, vol. 6, p. 1439, 2013.
- [15] N. Grid, "The Grid Code," 2010.



José Raúl Castro Mendieta se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Universidad de Cuenca - Ecuador en 1995. En 2016, en Montreal Canadá obtuvo un Ph.D. de la Ecole de technologie supérieure en ingeniería eléctrica. Trabaja como profesor en la Universidad Particular de Loja - Ecuador desde el 2006 donde enseña Energía, Control y Optimización. Sus principales líneas de investigación son en control no lineal y la optimización aplicada a Energías Renovables y a Sistemas Eléctricos de Potencia.



Maarouf Saad recibió su título de Ingeniero Eléctrico, de Master en Ingeniería Eléctrica de la Ecole Polytechnique de Montreal en 1982 y 1984 respectivamente. En 1988, recibió su Ph.D. en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de McGill. El professor Saad trabaja en la Ecole de technologie supérieure desde 1987 donde enseña teoría de control y robótica. Sus campos de investigación es principalmente en Control No Lineal y la Optimización aplicado a la Robótica y a Sistemas de Potencia.

Evaluation of Noise Pollution in Urban Touristic and Entertainment Zones. Case Study: La Mariscal parish, Quito-Ecuador.

Evaluación de la Contaminación Acústica en Sectores Urbanos Turísticos y de Entretenimiento. Caso de Estudio: parroquia La Mariscal, Quito-Ecuador.

R.M. Vásconez¹

A.B. Pila²

Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Universidad de las Américas
Quito, Ecuador

¹E-mail: rvasconez@udlanet.ec,

²E-mail: apila@udlanet.ec

Abstract

This research aims to make an assessment of the contribution of leisure and entertainment activities to the environmental noise of the urban area of "La Mariscal" in Quito. First, traffic noise simulation software was used as the main tool for modeling traffic noise pollution levels, as this is the main source of environmental pollution in the sector. In addition, short-term measurement points and long-term monitoring stations were established to confirm and adjust the noise pollution traffic model to obtain a noise map that fits the reality of the parish. Once the levels of noise pollution caused by the vehicles were known, an in situ measurement of the pollution caused by bars, restaurants and discos of the area of study was carried out to evaluate the contribution of these activities to the environment. It was concluded that nocturnal leisure activities increase the level of noise pollution by 20% and do not respect the maximum permissible levels stipulated by law for different land uses.

Index terms— Noise pollution, Traffic Noise, Predictive Model, Acoustical environment, Sound perception, Noise Mapping.

Resumen

Este trabajo busca realizar una valoración de la aportación de las actividades de ocio y entretenimiento al ruido ambiental de la parroquia urbana "La Mariscal" de la ciudad de Quito. Se utilizó un software de simulación de ruido de tráfico como herramienta principal para modelar los niveles de contaminación acústica, ya que esta es la principal fuente de contaminación ambiental del sector. Además se establecieron puntos de medición de corto plazo y largo plazo (15 horas) para corroborar y ajustar el modelo y así obtener un mapa de ruido que se ajusta a la realidad sonora del sector. Una vez conocidos los niveles de contaminación acústica causada por los vehículos se procedió a realizar mediciones in situ de la contaminación causada por bares, restaurantes y discotecas de la parroquia para evaluar el aporte de estas actividades al entorno. Se concluyó que las actividades nocturnas de ocio elevan en un 20% el nivel de contaminación acústica y no cumplen con los niveles máximos permisibles que estipula la ley para los diferentes usos de suelo.

Palabras clave— Contaminación Acústica, Ruido de Tráfico, Modelo Predictivo, Ambiente acústico, Percepción Sonora, Mapa de ruido.

Recibido: 27-10-2017, Aprobado tras revisión: Fecha colocada por el Consejo Editorial

Forma sugerida de citación: Vásconez, R.; Pila, A. (2017). "Evaluación de la contaminación acústica en sectores urbanos turísticos y de entretenimiento. Caso de estudio: Sector La Mariscal, Quito-Ecuador. El número de página lo colocará el Consejo Editorial.

1. INTRODUCCIÓN

El ruido es considerado un contaminante invasivo que puede provocar diferentes efectos en la salud y bienestar de las personas, que van desde simples molestias hasta problemas clínicos no reversibles [1].

La contaminación acústica constituye una problemática ambiental que se ha incrementado con el desarrollo tecnológico, comercial e industrial de la sociedad actual. En la ciudad, el ruido está directamente asociado con toda actividad humana, especialmente en áreas urbanizadas, en donde aumenta con el desarrollo del transporte [2]. Otro factor que produce contaminación son las actividades de ocio que conducen a la concentración de un gran número de personas.

Un mapa de ruido es una herramienta cartográfica que permite una visualización rápida y sencilla de la distribución de los niveles de ruido en un área determinada. Es un método muy eficiente de evaluación del ruido urbano y muy utilizado para la planificación territorial [3].

En Europa, de acuerdo a la Directiva 2002/49/EC, relacionada con la molestia y el manejo del ruido ambiental, los estados miembros deben realizar mapas estratégicos de ruido y planes de acción para mitigar su impacto. En América del Sur, no existen directivas regionales, sin embargo cada país cuenta con normativas que mencionan la elaboración de mapas de ruido. Varios países han realizado mapas de ruido, sobre todo en ciudades capitales como Buenos Aires [4], Río de Janeiro [2]. En Chile las ciudades de Puerto Montt [5] y Santiago [6], en Colombia, Medellín [7] y Cartagena [8], en las cuales se evidencia que el ruido de tráfico sobrepasa los límites permitidos según la zonificación de uso de suelo. En un estudio realizado en Santiago de Chile se describe una técnica para la elaboración de mapas de ruido en zonas de ocio [9], el cual es similar al análisis realizado en este estudio.

En Ecuador, la normativa existente es el Texto Unificado de Legislación Ambiental “TULSMA”, la cual obliga en su Anexo 5 a los GAD Municipales con una población mayor o igual a 250.000 habitantes a elaborar mapas de ruido ambiental como una herramienta estratégica para la gestión del control de la contaminación acústica y la planificación territorial.” [10]. La ciudad de Quito cuenta con una población de 2,239.191 habitantes, (INEC, 2010), en ella no se han encontrado estudios que indiquen la generación de mapas de ruido en zonas de ocio.

La Mariscal es una de las 32 parroquias urbanas del Distrito Metropolitano de Quito. En ella se concentran establecimientos comerciales, culturales, educativos, hospitalarios y de diversión. El Municipio señala a esta parroquia como uno de los referentes más importantes del Quito moderno y nodo de concentración y actividades económicas y turísticas. En este sector se llevan a cabo actividades nocturnas y de ocio en los

locales de entretenimiento que se han establecido como bares, discotecas y pubs.



Figura 1: Sector de La Mariscal. Tomado de Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda- MDMQ, 2012.

En este estudio la valoración de la contaminación acústica se fundamenta en la representación gráfica de los niveles sonoros en un mapa de ruido de toda la parroquia a través de simulación usando el modelo predictivo RLS-90. Los datos obtenidos servirán para comparar los niveles de ruido producido por la circulación vehicular con los niveles generados por actividades turísticas y de ocio, especialmente bares y discotecas. Esto a través de mediciones acústicas, con el fin de conocer cuál es el aporte que generan estas fuentes al ruido ambiental. Así mismo se pretende evaluar la cantidad de población expuesta a contaminación acústica en el sector evaluado.

2. METODOLOGÍA

La elaboración de mapas de ruido puede hacerse usando mediciones reales en puntos estratégicos, usando modelos de predicción mediante simulaciones, o como en este caso, combinando la simulación con mediciones [2].

A continuación se muestra y describe un esquema estandarizado de los pasos prácticos para la elaboración de un mapa de ruido.

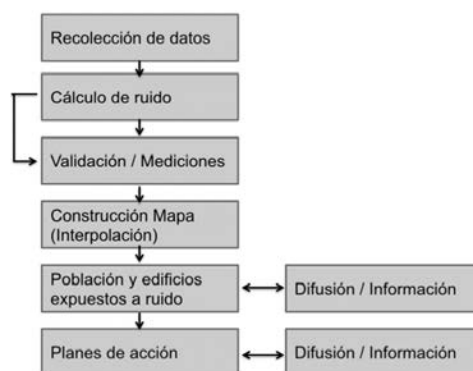


Figura 2: Esquema del procedimiento para realizar un mapa de ruido. Adaptado de Murphy y King, 2014, p. 89

Vásconez, R.; Pila, A. / "Evaluación de la contaminación acústica en sectores urbanos turísticos y de entretenimiento. Caso de estudio: Sector La Mariscal, Quito-Ecuador.

2.1. Recolección de datos

En la etapa de recolección de datos, la información obtenida relacionada con los receptores de ruido es: Censo de población, escuelas y hospitales, receptores cerca de la infraestructura o ejes de comunicación, usos y tipologías de uso del suelo desde el punto de vista de zonificación acústica, datos cartográficos disponibles, autoridades involucradas. La información sobre las fuentes de ruido comprende: Descripción de vías de tránsito, caracterización y descripción de las fuentes de ruido, ruido de fondo, datos de ubicación, dimensiones y datos de tránsito, velocidad, puntos de aceleración y frenado [11].

En este sentido se realiza un análisis del tránsito vehicular y se recogen datos físicos y ambientales tales como: la localización y características constructivas de las edificaciones, obstáculos naturales o barreras acústicas, y factores meteorológicos como velocidad del viento, temperatura, humedad.

2.2. Cálculo de ruido

2.2.1 Generación de mapas de ruido por modelamiento computacional

Este proceso requiere inicialmente una adecuada delimitación de la zona de análisis acústico mediante imágenes satelitales, fotografías, planos y visitas de reconocimiento del sector.



Figura 3: Delimitación de la zona de estudio. Imagen aérea de la parroquia La Mariscal

Las distintas entradas de datos relevantes para el procesamiento en el software de simulación dependen del modelo de predicción que se utilice. En el presente caso de estudio se utilizó el modelo predictivo alemán RLS-90.

En dicho método se consideran variables como: Número de vehículos por hora, velocidad de circulación, porcentaje de vehículos pesados, características de la superficie de la vía, además de los datos geométricos

como son la pendiente de la vía, correcciones por la adición de energía debido a las reflexiones producidas por las construcciones contiguas, el nivel de ruido en parqueaderos, atenuación de la absorción del terreno y condiciones meteorológicas.

Esta información es necesaria para la determinación del nivel de ruido emitido (L_{me}) [dBA]. El nivel de ruido en los puntos de recepción (L_m) [dBA] se calcula a partir de ajustes relacionados con el flujo vehicular, la señalización vial (semaforización), y otros elementos como barreras acústicas, puentes, pasos elevados y deprimidos [12][13].

2.2.2 Levantamiento digital del terreno

Para obtener las curvas de elevación se crea un modelo digital de elevaciones (DEM) mediante imágenes satelitales estereoscópicas de alta resolución que contienen información de las coordenadas del área que representa.

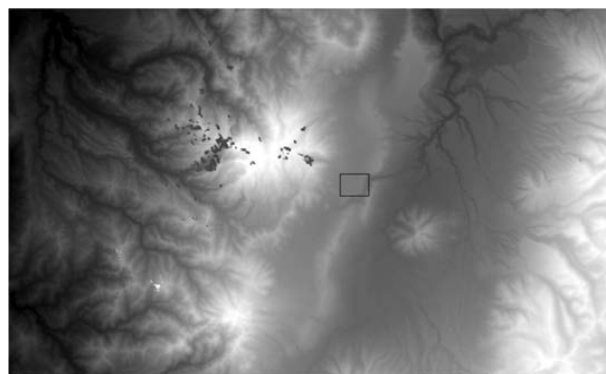


Figura 4: Obtención de información digital del terreno de imágenes satelitales. Tomado de U.S. Geological Survey - 2017.

2.2.3 Creación de una base de datos geográficos

El tamaño del área de estudio se limita al área de interés y se genera un primer modelo Raster que se procesa para generar las curvas de elevación.



Figura 5: Modelamiento de curvas de nivel

Se procede a importar y geo-referenciar los planos de

vías, sectorización, uso de suelo y fotografías satelitales sobre las curvas de nivel creadas. De esta forma se dispone de la información para crear la base de datos geográfica en formatos de acceso rápido y alta resolución.



Figura 6: Modelado digital de vías

2.2.4 Proyección de edificaciones

Los edificios son un factor muy importante en el modelo físico para la evaluación de la propagación de ruido exterior debido a que el aporte de las reflexiones sobre las fachadas de los objetos verticales es determinante en el modelamiento. Por otro lado, en cada edificación se ubican los receptores para el cálculo de emisión y además las mismas contienen un conjunto de información importante en el caso de tratarse de un mapa de ruido urbano, un mapa acústico de fachadas o un mapa estratégico de ruido.



Figura 7: Definición de edificios en el software de simulación

Se proyectaron 2681 edificaciones cuya geometría fue digitalizada sobre una fotografía aérea verificando siempre las coordenadas y usos de suelo.

Se comprobó el tipo de fachada, el número de pisos, la altura aproximada del edificio, dirección, nombre y referencias importantes. La altura del edificio es muy importante para el apantallamiento y la reflexión

durante el cálculo de la propagación de ruido.

Para mayor exactitud el modelamiento se basó en el Código Ecuatoriano de la Construcción CPE-INEN 005-1 (2001) y la Ordenanza Municipal No. 3746 que publica la normativa de arquitectura y urbanismo para el Distrito Metropolitano de Quito (2008) ratificada en el registro oficial No.328 (Sept. 2012).

2.2.5 Modelamiento de tránsito vehicular

Se debe categorizar la información de tránsito de la zona de estudio por tipo de vía. Se analizan los conteos y porcentaje de vehículos pesados, velocidad y dirección en aquellas calles que son de doble circulación. La alineación de una vía se determina graficando el eje principal, la anchura y la distancia de las bandas de emisión se seleccionan en la definición de perfiles. La pendiente se calcula automáticamente a partir del modelo digital del terreno. La elevación de la banda de emisión en el modelo RLS-90 se establece a una altura de 0,5 metros sobre la superficie de rodadura, y la distancia de referencia a 25 metros del centro de la vía. La evaluación de la exposición al ruido se establece a 4 metros de altura sobre el terreno [12]. Se define el perfil de acuerdo al ancho de carril y de la mediana. Se pueden seleccionar valores predeterminados mediante estándares de construcción o realizar una definición propia para estos parámetros.

De acuerdo al tipo de información recolectada sobre la intensidad del tránsito vehicular, se pueden incluir valores promedio diarios (IMD) o escoger distintos tipos de configuraciones de emisión recomendadas para cálculos en calles, carreteras secundarias, autopistas o autovías. Se pueden realizar introducciones adicionales más específicas como el promedio de vehículos por hora y el porcentaje de composición de vehículos en el período nocturno. Para el cálculo de emisión en las vías, se tienen también opciones como el tipo de material de construcción de la superficie de rodadura, adiciones por reflexión, porcentaje de vehículos pesados, velocidad de circulación, distribución del flujo en las franjas horarias.

La adición por señalización de tránsito toma en cuenta el aumento de la molestia producida en las intersecciones señalizadas por semáforos, a pesar de que el efecto físico es poco cuantificable [12], forma parte del modelo RLS-90

Los parqueaderos se consideran como fuentes sonoras de área uniforme que aporta al nivel de emisión de acuerdo al tipo de vehículos que lo conforman y el número de movimientos por hora (rotación por entrada y salida) durante el día o la noche.

2.2.6 Áreas de atenuación, absorción del terreno

Utilizar el factor de absorción del terreno resulta útil en el caso de definir un parque o jardines de densidad media que tenga efectos sobre la propagación de la

Vásconez, R.; Pila, A. / "Evaluación de la contaminación acústica en sectores urbanos turísticos y de entretenimiento. Caso de estudio: Sector La Mariscal, Quito-Ecuador.

energía sonora. Para evaluar el efecto del terreno se considera el área alrededor de la fuente, el área entre la fuente y el receptor y, la que rodea al receptor.

Para diseñar un área de mitigación se utiliza el concepto de absorción por volumen. Esto sirve para simular bosques o áreas impermeables co ngestionadas. La absorción D se representa como el producto entre el factor de absorción f [dB/m] y la distancia SG [m]. La distancia de absorción SG marca un arco de longitud de 5 kilómetros entre la fuente y el receptor. Se introduce una altura útil de absorción del terreno y el factor de absorción en dB(A) por metro.

2.2.7 Receptores y cálculo de niveles sonoros

La ubicación de receptores permite el cálculo de contaminación acústica en un punto específico del modelo. Es posible asignar receptores a l as edificaciones y establecer el cálculo simulando el comportamiento en el interior de un edificio. Al ubicar un receptor en campo libre (no vinculado a un edificio) se debe especificar la altura y elevación del terreno.



Figura 8: Modelado de receptores

Se colocaron receptores en todas las vías del área de estudio. En una primera fase se ubicaron de acuerdo a los requerimientos de validación del modelo en los mismos lugares donde se realizaron mediciones.

Posteriormente para el caso de las mediciones de largo plazo se asociaron los puntos de recepción a l as edificaciones correspondientes, ya que de esta forma es posible obtener resultados en cada piso de los edificios evaluados. El software de predicción entrega resultados mediante el descriptor nivel de ruido equivalente Leq en cualquier punto en donde se ubican los receptores, esta información sirvió para estimar un cálculo aproximado de población expuesta.

La metodología de ubicar receptores de punto único cubriendo todas las caras de cada manzana permitió

tener una aproximación del número de ocupantes afectados por los distintos niveles sonoros resultantes.

2.2.8 Puntos de medición

Las mediciones de ruido de tránsito vehicular se realizaron con un sonómetro integrador clase 1 certificado por la comisión electrotécnica internacional IEC 61672-1:2002. Las mediciones se realizaron en condiciones meteorológicas favorables, en ausencia de lluvia, truenos, etc. Según el modelo RLS-90, el sonómetro se ubicó a 25 metros del centro de la calzada y a 4 metros de altura [14]. Además se establecieron puntos de medición de largo plazo en los que se registró información por periodos de 15 horas.

Debido a l a hipótesis de este trabajo también se realizaron mediciones nocturnas en la zona en la cual se presume que existen otras fuentes de ruido que aportan energía acústica al entorno. Las mediciones realizadas cerca de los recintos de diversión, se siguieron los lineamientos de la T.U.L.S.M.A. Se tomaron estos lugares como fuentes fijas de ruido y se procedió a colocar el sonómetro sobre un trípode a 1,5 metros del suelo con una inclinación de 45 grados sobre el plano horizontal.

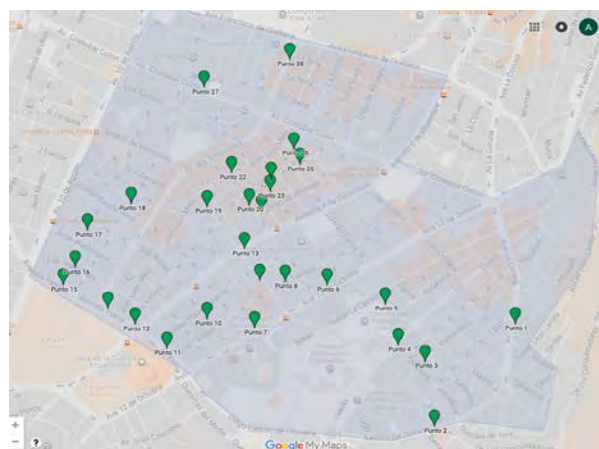


Figura 9: Algunos puntos de medición en la zona de estudio

2.2.8 Validación del modelo

Los receptores en la simulación son puntos de información comparable con el resultado de las mediciones in situ, se realizaron varias correcciones en cuanto al tipo de vehículos y conteos de tráfico de motos, vehículos pesados y buses bajo el criterio de que estas tres clases de vehículos emiten un nivel de energía parecido, además se realizaron varias pruebas de correlación examinando los aportes de parqueaderos, semáforos, áreas de atenuación y absorción. Finalmente no se tienen notables diferencias mayores a 3 dB entre los valores medidos y simulados como se observa a continuación.

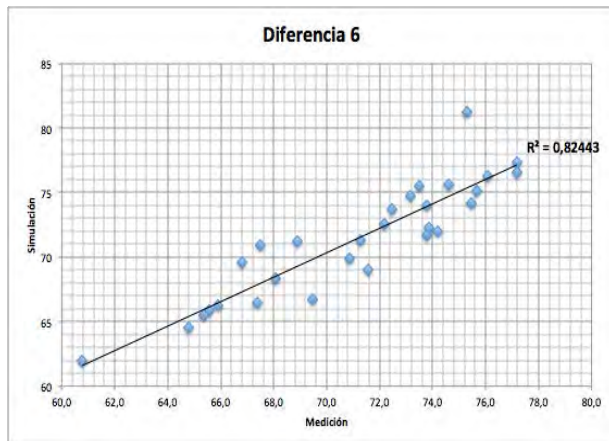


Figura 10: Correlación entre los niveles medidos y simulados.

La validación se realizó con un solo descriptor de ruido, se escogió el Ld, puesto que las mediciones de corto plazo se realizaron en su mayoría en el periodo diurno y los datos registrados y proyectados a una hora y posteriormente a 12 horas dan mejores resultados.

3. RESULTADOS

A continuación se presentan los mapas obtenidos a partir de la simulación, así como también gráficos con los resultados del levantamiento de información acústica.



Figura 11: Mapa de ruido mediante descriptor Lden (Día-tarde-noche)

Se indican las avenidas principales de la zona para facilidad de ubicación. A continuación se extrajeron mapas mediante los descriptores Ld (07-19h), Levening (19-23h) y Ln (23-07h), los cuales muestran la evolución del tránsito vehicular durante estos periodos de tiempo. Se obtuvo el mapa Lden puesto que el modelo de predicción de ruido de tráfico usado para la simulación tiene esos horarios.



Figura 12: Mapa de ruido de periodo diurno mediante descriptor Lday (07-19h)



Figura 13: Mapa de ruido de periodo vespertino mediante descriptor Levening (19-23h)



Figura 14: Mapa de ruido de periodo nocturno mediante descriptor Lnigh (23-07h)

Vásconez, R.; Pila, A. / "Evaluación de la contaminación acústica en sectores urbanos turísticos y de entretenimiento. Caso de estudio: Sector La Mariscal, Quito-Ecuador.

Se realizó un promedio energético de los niveles ponderados LAeq medidos por tipo de vía para conocer las que tiene niveles de presión sonora más altos.

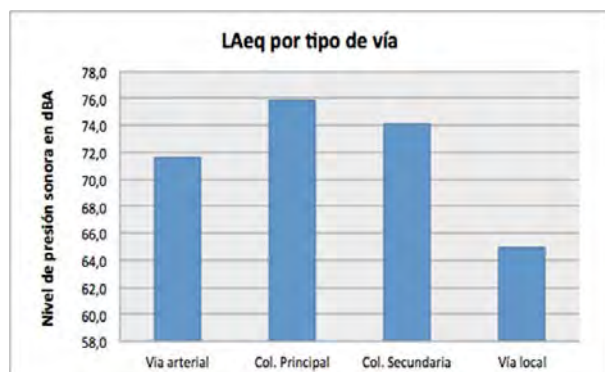


Figura 15: Nivel LAeq en dBA por tipo de vía

Para la evaluación de la molestia causada por el ruido vehicular se usa el descriptor clima de ruido, el cual indica que mientras más elevado es el valor del clima de ruido, mayor es la molestia en la población. El gráfico señala que existe mayor molestia en las vías locales, a pesar de que estas tienen menor densidad de tránsito vehicular. Esto se debe a que la sensación de molestia por parte de la población es mayor. Se evidencia que la molestia no tiene que ver únicamente con el nivel de presión sonora [11].

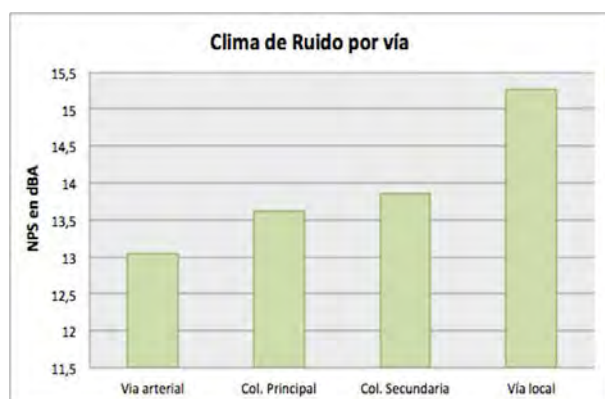


Figura 16: Nivel de clima de ruido por vías

El Índice de Ruido de Tránsito Vehicular es un excelente descriptor para la evaluación de tránsito fluctuante y discontinuo, como ocurre en la noche y madrugada. En este período de tiempo la actividad vehicular disminuye considerablemente pero aun así el nivel de molestia aumenta. Describe una mejor valoración de lo que las personas perciben.

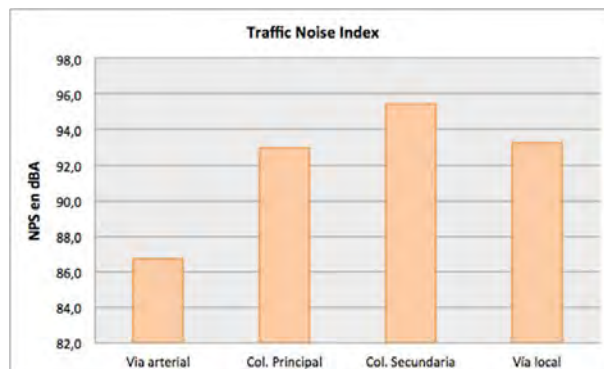


Figura 17: Nivel de clima de ruido por vías

En cuanto a la comparación entre datos medidos y simulados en el periodo nocturno se evidencia efectivamente que los niveles que se obtuvieron en la simulación, (que únicamente analiza valores de nivel de presión generados por el tránsito vehicular) es mucho menor que los niveles que se recogieron en el proceso de mediciones in situ. El nivel medido in situ rebasa en promedio 14 dB A al nivel de ruido vehicular. Cabe destacar que la proyección del Ln se realizó con datos de mediciones de 15 minutos cuando las fuentes de ruido se encontraban abiertas al público.

Tabla 1: Comparación entre datos medidos y simulados en dBA en el periodo nocturno

ZONA	PUNTO	LOCALIZACIÓN	LAeq medición 15 min.	LAeq proyectado a 1 HORA	Ln a partir de medición	Ln Simulado	Diferencia
176	Plaza Foch	Nu Hotel	73,7	78,5	74,7	60,5	14,2
		Calama y J. L. Mera	74,6	79,4	75,6	61,9	13,7
		Calama entre Reina Victoria y D. De Almagro	70,4	75,2	71,4	61,0	10,4
		Plaza Foch diagonal a Nu House	75,6	80,4	76,6	61,0	15,6
		Plaza Foch (alitas del Cadillac)	74,6	79,4	75,6	59,7	15,9

Para obtener una estimación de la población expuesta al ruido se realizó un promedio entre los resultados de los niveles entregados por cada receptor ubicado alrededor de cada una de las manzanas de la parroquia. Por medio del software se puede acceder a la información de niveles en cada uno de los receptores de punto único, e incluso su distribución por horas. Dado que se conoce el número de habitantes por sector de la información obtenida del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, se distribuyó dividiendo este dato para el número de manzanas para obtener una aproximación de población expuesta al nivel resultante.

Examinando los niveles en cada receptor y ampliando este cálculo hacia sectores y zonas se obtuvo que aproximadamente 10.899 de un total de 12.976 habitantes de la población de la parroquia está expuesta durante más de 15 horas a niveles superiores a 55 [dB].

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se verifica la afectación de gran cantidad de receptores sensibles en la parroquia como centros educativos, de salud y oficinas debido al ruido de tráfico. La actividad nocturna en los sitios turísticos y de entretenimiento de la parroquia aporta de manera considerable al ruido ambiental, principalmente por la contribución de fuentes fijas en bares y discotecas. La aportación es de aproximadamente 14 dB por encima del ruido ambiental existente. El ruido ocasionado por las altas concentraciones de personas y vehículos más el emitido por bares y discotecas producen un aumento de aproximadamente 14 dB sobre el nivel de ruido que normalmente existe en el lugar cuando no se desarrollan actividades nocturnas, lo cual se comprobó mediante las mediciones realizadas. El estudio permitió identificar zonas sensibles como hospitales y centros educativos, los cuales se encuentran expuestos a altos niveles de ruido vehicular que pueden afectar las actividades que allí se realizan. Se reconoce la afectación de seis Universidades, más de quince instituciones educativas secundarias y tecnológicas y más de veinte clínicas y hospitales públicos y privados.

La Plaza del Quinde (Plaza Mariscal Foch) la cual está ubicada en una intersección de vías locales de sentido único presenta en la noche niveles de ruido comparables a los de una vía arterial de 6 carriles con alto índice de tránsito vehicular durante el día como es el caso de la Avenida Patria.

Los métodos de cálculo correspondientes a los modelos predictivos ofrecen la posibilidad de diseñar los cambios de flujo y los porcentajes de tipos de vehículos de varias formas. Pero para esto se debe considerar que están diseñados para entornos donde la actividad urbana permanece activa durante las 24 horas de día, y el flujo vehicular durante las noches es mínimo en las ciudades de nuestro país, por lo cual se recomienda ahondar en la investigación y el registro del tránsito durante el periodo nocturno. La divulgación adecuada de los resultados del presente estudio, es una proyección importante, especialmente para los receptores sensibles. La actualización permanente de la información en el software de predicción permite optimizar el modelo obtenido y contribuir al diseño vial y urbanístico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Quiroz - Arcentales, L., Hernandez, L., Corredor, J., Rico, V., Rugeles, C., Medina, K. Efectos auditivos y neuropsicológicos por exposición a ruido ambiental en escolares, en una localidad de Bogotá, Revista Panamericana de salud pública de la organización Mundial de la Salud. Rev. salud pública. 15 (1): 116-128, 2013 (2013) pp. 117
- [2] Pinto, F. A. C., & Mardones, M. D. M. Noise

mapping in densely populated neighborhoods – Example of Copacabana Rio de Janeiro – Brazil. Environmental Monitoring and Assessment, 155, 309–318. (2009)

- [3] Olayinka, O. Effective Noise Control Measures and Sustainable Development in Nigeria. World Journal of Environmental Engineering, 1(1) pp: 5-15. (2013)
- [4] Ausejo, M. Estudio de la validación, errores e incertidumbre en la elaboración de mapas de ruido. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Madrid. (2010)
- [5] Lobos, V. Evaluación del ruido ambiental de la ciudad de Puerto Montt. VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA. (2008).
- [6] Suárez, E., & Barros, J. L. Traffic noise mapping of the city of Santiago de Chile. Sciencedirect. Science of the total environment, 466, 539-546. (2014).
- [7] YEPES, D. L., Gómez, M., Sánchez, L., & JARAMILLO, A. C. Metodología de elaboración de mapas acústicos como herramienta de gestión del ruido urbano-caso Medellín. Dyna, 76(158), 29-40. (2009).
- [8] Quiñones-Bolaños, E. E., Bustillo-Lecompte, C. F., & Mehrvar, M. A traffic noise model for road intersections in the city of Cartagena de Indias, Colombia. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 47, 149-161. doi:10.1016/j.trd.2016.05.007 (2016).
- [9] Marzzano, A. Araos, M. Albornoz, C. Lefin, H. Fuentes, M. Delannoy J. y Meza L. Técnicas de confección de mapas de ruido en zonas de ocio: caso barrio Bellavista Santiago de Chile. Actas del Congreso. VI Congreso Iberoamericano de Acústica FIA. V aldivia, Chile. FIA. Valdivia 2014, part-2-4. (2014)
- [10] Texto Unificado de Legislación Secundaria Medio Ambiental. Ministerio del Ambiente TULSMA. Libro VI - Anexo 5. Quito, Ecuador. Niveles máximos de emisión de ruido y metodología de medición para fuentes fijas y fuentes móviles. Emitido mediante decreto Ejecutivo No. 083, del Registro Oficial “Edición Especial No 387” del 04 de noviembre de 2015. LIBRO VI, Anexo, 5. (2015).
- [11] Barti, D. R. Acústica medioambiental. Universidad de las Américas Vol. I. Alicante, ES: ECU. (2013).
- [12] Braunstein + Berndt GmbH.. SoundPLAN User’s Manual. (2012)
- [13] Steele, C. A critical review of some traffic noise prediction models. Applied acoustics, 62(3), 271-287. (2001).

Vásconez, R.; Pila, A. / “Evaluación de la contaminación acústica en sectores urbanos turísticos y de entretenimiento. Caso de estudio: Sector La Mariscal, Quito-Ecuador.

- [14] Bastián-Monarca, N. A., Suárez, E., & Arenas, J. P. Assessment of methods for simplified traffic noise mapping of small cities: Casework of the city of Valdivia, Chile. Science of The Total Environment, 550, 439-448. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.01.139. (2016).



Remigio Vásconez Barragán.-

. Es Ingeniero en Acústica de la Universidad de las Américas, tiene gran experiencia en producción técnica de sonido en las áreas de grabación, mezcla, audio para imagen y refuerzo sonoro. Especialista en control de ruido y acústica ambiental. Es docente e investigador en proyectos de desarrollo tecnológico, eficiencia energética y gestión ambiental.



Ana Belén Pila Prado.- Nació en Quito-Ecuador en 1992. Recibió su título de Ingeniera en Sonido y Acústica de la Universidad de las Américas en 2017. Actualmente se desempeña como Ingeniera de Soporte en diversos proyectos de ingeniería

de construcción, es especialista en aislamiento y acondicionamiento acústico de locales. Además de realizar investigación en las áreas de acústica arquitectónica y ambiental.



Auspiciantes y cooperantes:



INSTITUTO NACIONAL DE EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES



Dirección: Iñaquito N35-37 y Juan Pablo Sanz
Colegio de Economistas de Pichincha
Código Postal: 170507 / Quito - Ecuador
Teléfono: 593-2 393-1390
www.iner.gob.ec



/INER Ecuador



@INER_EC



@INER_EC



/INER



INER Ecuador