



**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**
FACULTAD DE INGENIERIA

REVISTA Ingeniería

Volumen 21 · Número 1 · ISSN: 0121-750X · E-ISSN: 2344- 8392

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2016

REVISTA Ingeniería

Volumen 21 - Número 1 - Año 2016 - ISSN 0121-750X - E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera 7 No. 40-53
Edificio Administrativo
Piso 4-Facultad de Ingeniería
Bogotá-Colombia
Teléfono: 57 (1) 323 93 00 ext. 2413
Correo: revista.ing@udistrital.edu.co

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving>

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería, con artículos de contenido original e inédito. La revista está dirigida a investigadores, especialistas, docentes, estudiantes de pregrado y posgrado, ingenieros en ejercicio y al sector empresarial.

EDITOR

Sergio A. Rojas, PhD. Universidad Distrital FJDC, Colombia.

COMITÉ EDITORIAL

Jose Marcio Luna, PhD. GRASP Lab, University of Pennsylvania, Estados Unidos
Cristina González Caro, PhD. Universidad Autónoma de Bucaramanga, Colombia
José Luis Villa, PhD. Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia
Víctor Hugo Grisales, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Carlos Eduardo Moreno Mantilla, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Henry Alberto Dios, PhD. Universidad Distrital FJDC, Colombia
Marco Aurelio Alzate, PhD. Universidad Distrital FJDC, Colombia
Juan Carlos Figueroa, PhD. Universidad Distrital FJDC, Colombia
Rodrigo Herrera, Msc. Universidad Distrital FJDC, Colombia
Luz Esperanza Bohórquez, PhD. Universidad Distrital FJDC, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Iván Santelices Mallanti, PhD. Universidad del Bío-Bío, Chile
Germán Jairo Hernández, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Diego Cantor, PhD. University of Western Ontario, Roberts Research Institute
Diego Pardo Ayala, PhD. Agile and Dexterous Robotics Lab-ETHZ (Zurich)
Germán Méndez, PhD. Universidad Distrital FJDC, Colombia
Carlos Andrés Peña, PhD. University of Applied Sciences Western Switzerland
Ana María Peña, PhD. Universidad Distrital FJDC, Colombia
Edwin Rivas, PhD. Universidad Distrital FJDC, Colombia

DIRECTIVAS

Carlos Javier Mosquera S. (E) Nelson Libardo Forero Chacón
Rector Centro de Investigación y Desarrollo Científico
Roberto Ferro Escobar
Decano Facultad Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Gestora Editorial Corrección de estilo
Carolina Suárez, MSc. Jenny Alexandra Jiménez, MSc.
Diagramación Impresión
Julían Hernández - Taller de Diseño Editorial Kimpres

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Juan Múnera, Msc. Universidad EAFTT
Luis Angel Moreno Anselmi, MSc. Universidad Católica de Colombia
William Puche Plaza, PhD (c).Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
María Osorio Angarita, PhD (c).Universidad de Boyacá
María Esperanza Amórtegui Montañez, MSc. Pontificia Universidad Javeriana
Jose Posada Aguilar, PhD (c).University of Pittsburgh
Nelson Alexander Pérez, PhD. Universidad de los Andes, Mérida
Monica Huerta, PhD. Universidad Simón Bolívar
José Luis Abreu, PhD. Universidad Autónoma de Nuevo León
Francisco Javier Moreno Arboleda, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Yohany Andres Jimenez, MSc. Fundación LOGyCA
Alex Johann Zambrano Carbonell, MSc. Universidad Santo Tomas
Carolina Suárez R., Msc. Universidad Cooperativa de Colombia
Milton Herrera Ramírez, Msc. Universidad Piloto de Colombia
Rodrigo Barbosa, PhD. Universidad del Norte
Mery Yolima Uribe Rios, PhD. Pontificia Universidad Javeriana
Alba Graciela Avila Bernal, PhD.Universidad de los Andes
Carlos Eduardo Montoya Casas, PhD. Pontificia Universidad Javeriana
Luis Linares Garcia, Msc. EOST S.A.S.
Andrés Felipe Rojas González, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Carlos Celemin, PhD (c). Universidad de Chile
Jose Hermínsul Mina Hernández, PhD. Universidad del Valle
Adriana Herrera Barros, PhD. Universidad de Cartagena
Silvia Baldiris Navarro, PhD. Universidad de Girona
Edwin Rivas, PhD. Universidad Distrital FJDC
Felix Israel Cabrera Vega, PhD. Pontificia Universidad Católica del Perú
Norma Cristina Solarte Vanegas, Msc. Universidad Pontificia Bolivariana
Jorge Alberto Mejía Mejía, PhD. Consorcio Yacimientos, outsourcing Ecopetrol
Verónica Marín Díaz, PhD.Universidad de Córdoba, España
Monica Arcila Rivera, PhD(c). Servicio Geológico Colombiano
William Castro Garcia, Msc. Universidad Nacional de Colombia
Fabián Castaño, PhD.Universidad Pontificia Bolivariana

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Los textos de los artículos incluidos en esta edición pueden ser utilizados y reproducidos con fines sin ánimo de lucro y dando crédito a los autores.



Este trabajo está bajo una Licencia de Creative Commons

Reconocimiento – No comercial – Sin Obra Derivada 3.0 Unported

Ni la Revista INGENIERÍA, Editor, Comité Editorial, Comité Científico, Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital FJ.C., otorgan ninguna garantía, expresa o implícita, a asumen responsabilidad alguna por la exactitud, completitud o utilidad de cualquier información, aparato, producto o proceso divulgado, o que represente que su uso no infrinja derechos privados. La mención o referencia a algún producto, proceso o servicio comercial en específico, por su marca comercial, marca registrada, fabricante o cualquier otra denominación, no implica ni constituye su endoso, recomendación endoso, recomendación o favorecimiento por parte de la Revista INGENIERÍA. Los juicios y opiniones expresadas por los autores en este medio son de su responsabilidad y no establecen, reflejan o comprometen los de la Revista INGENIERÍA.

INDIZADA EN



La carátula hace alusión a las múltiples perspectivas que asume la ingeniería sobre fenómenos naturales en escalas macro, meso y microscópica. Las imágenes de la carátula son de dominio público liberadas bajo licencia Creative Commons CC0. Idea creativa: Sergio A. Rojas y Carolina Suárez; diseño: Liliana Valencia.

CONTENIDO

EDITORIAL

El Niño y el Platón Sergio A. Rojas, PhD.	4
---	---

ARTÍCULOS REGULARES

Evaluación de las Propiedades Reológicas y Térmicas de un Asfalto Convencional y uno Modificado con un Desecho de PEBD <i>Evaluation of Rheological and Thermic Properties of Neat and Modified Asphalt with a Waste of LDPE</i> William Andrés Castro López, Hugo Alexander Rondón Quintana, Juan Carlos Barrero Calixto	7
--	---

Determinación de la Degradación Térmica de Polímeros por Análisis de Cambio de Color <i>Determination of Polymers Thermal Degradation by Color Change Analysis</i> Andrés Felipe Rojas González, Tim Osswald	19
---	----

Clasificación Automática de Formas Patológicas de Eritrocitos Humanos <i>Automatic Classification of Pathological Shapes in Human Erythrocytes</i> Marcela Mejía F., Marco A. Alzate M	31
---	----

Towards a New Generation of Passive Optical Networks <i>Hacia una Nueva Generación de Redes Ópticas Pasivas</i> Elkin Fabián Aguas Martínez, Gustavo Adolfo Puerto Leguizamón, Carlos Arturo Suárez Fajardo	49
--	----

Construcción y Evaluación de Servicios Interactivos en Entornos de TVDi <i>Construction and Evaluation of Interactive Services in TVDi Environments.</i> Gabriel Elías Chanchí Golondrino, José Luis Arciniegas Herrera, Wilmar Yesid Campo Muñoz ²	63
---	----

Cargador Manual de Baterías: Prototipo Académico <i>Manual Battery Charger: an Academic Prototype</i> John Snecider Vanegas Varon, Marco Antonio Latorre González, José Danilo Rairán Antolines	83
--	----

Implementación de una Carta de Control para Corridas Cortas en la Industria de Autopartes <i>Implementation of a Short Run Chart in the Auto Parts Industry</i> Jesús Barrera Cobos	97
--	----

Instrucciones para los Autores	109
---------------------------------------	-----

El Niño y el Platón

Esta nota, cuyo título podría evocar el de una fábula, no aspira a tan noble propósito; carentes de las virtudes líricas de Esopo, de La Fontaine o de nuestro ilustre poeta nacional Rafael Pombo, recurriremos a la figura de opinión para expresar algunas reflexiones en torno al fenómeno climático del calentamiento del Pacífico ecuatorial -“el Niño”-, y sobre los retos y reacciones que sus efectos nos advierten –que relacionaremos con “el platón”-. Por ello no encontrarán al final una moraleja, aunque sí un colofón.

Comencemos pues por el problema. El Niño es la fase de calentamiento de un patrón climático irregular, caracterizada por un aumento de la temperatura de las aguas del océano Pacífico que bordean las costas de la Sudamérica tropical. Los pescadores han identificado su errante aparición alrededor de los días de Navidad, festividad de donde deriva su nombre. Su manifestación en nuestro país se encuentra asociada a la temporada de sequía, días calurosos y sol inclemente, inclusive en zonas andinas tradicionalmente lluviosas y frías. Lo inquietante del asunto es su palpable tendencia de intensificación en años recientes, encendiendo las alarmas sobre los potenciales impactos funestos que pueda tener en el futuro cercano.

Para la muestra unos botones. En esta temporada se han presentado registros históricos de temperatura en ciudades y municipios (Bogotá, D.C., 26°C; La Dorada, Caldas, 45°C); se ha observado reducción de caudales de grandes ríos a extremos de sequedad casi total (río Cauca de tres metros a menos de 20cm de profundidad en Risaralda); han ocurrido incendios forestales en los cerros de la capital con humaredas que obligan a evacuar habitantes y visitantes vecinos; se ha propagado una epidemia de Zika con brotes en localidades con alturas superiores a los 1800 metros, donde antes ni se asomaba el *aedes egypti*, su mosquito transmisor; y quizás el más ignominioso de los casos: niños de la etnia Wayú muriendo de hambre en la Guajira, mientras sus familias sufren una aridez más adusta que la que están acostumbrados a soportar.

A lo anterior, aunque no directamente atribuible al dichoso Niño pero de cualquier modo relacionado, le podríamos sumar las amenazas a las reservas forestales (Van der Hammen) y a los páramos (San Turbán), por cuenta de agendas políticas que resisten el análisis académico que clama por un equilibrio entre urbanismo y conservación, entre explotación y renovación.



Open access



Citación: Citación: Rojas, S. A. “El Niño y el platón”. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 4 –6
© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2016.1.a00>

Para completar, nuestros campesinos, esquivando tanta adversidad, no reciben compensación justa por sus cosechas, mientras que intermediarios y zares del abastecimiento triplican y hasta cuadruplican los precios de los alimentos en nuestras ciudades, según denuncia un ministro y comprobamos los consumidores.

El panorama es poco alentador. La cábala aciaga sobre el calentamiento global producido por los gases de efecto invernadero, que muchos creíamos improbable para el tiempo en que crecieran nuestros hijos y hasta nuestros nietos, se ha acelerado y amenaza con hacerse realidad, inclusive durante nuestra propia generación. Aún así nuestro clamor no es fatalista, pues más que ver problemas, nuestro optimismo vislumbra retos. Y sabemos que como comunidad ingenieril debemos asumirlos con aplomo y responsabilidad.

En particular sospechamos que la ingeniería ambiental, la energética, la agrícola, la de alimentos y la de materiales, tendrán un papel preponderante en este momento histórico de la humanidad, así como en su momento (y en orden cronológico) lo tuvieron las ingenierías hoy clásicas: naval, militar, civil, eléctrica, sanitaria, minera, mecánica, industrial, electrónica, computacional, geodésica, aeroespacial, de control, de software, de transporte, de petróleos, química, de telecomunicaciones, de nanotecnología y bioinformática. En efecto, el estudio de las energías renovables alternativas, del medio ambiente y la sostenibilidad, del aprovechamiento de residuos y utilización de biocombustibles, del uso eficiente de la energía, de la educación ambiental y energética, de la conservación de fuentes hídricas, entre otros, obtendrán las máximas prioridades en las agendas académicas, gubernamentales y en entidades internacionales de financiación de la investigación.

Por supuesto que las soluciones más efectivas e integrales resultarán de esfuerzos multidisciplinarios, con aportes desde todas las miradas de la ingeniería. Tan solo en algo tan crucial como la reducción de huella de carbono, por mencionar un ejemplo, en sistemas de transporte público masivo, se verán involucrados aspectos de la medición de polución en el aire (i. ambiental); estudios sobre resistencia de pavimentos y asfalto de residuos reciclables (i. civil y de materiales); la eficiencia de motores alimentados con biocombustibles (i. mecánica); monitoreo en línea y planificación de rutas de buses (i. de telecomunicaciones e industrial); predicción de demanda y uso compartido de vehículos (i. de sistemas); etcétera. Las interesantes sinergias que prometen las nuevas tecnologías de *Internet de las Cosas* y *Big Data*, permitirán capturar y analizar flujos de datos a gran escala para monitorear cultivos, estaciones climatológicas, redes de distribución de acueducto y electricidad y en cadenas de abastecimiento de alimentos, con el fin de detectar fallas, anomalías, fugas, picos de ocupación y demás, que en últimas ayudarán a tomar decisiones determinantes encaminadas a mejorar nuestro sistema de subsistencia y su operación. Paralelamente, nuestros gobernantes deberán hacer sus aportes desarrollando regulación y normatividad que promuevan la autosuficiencia y sostenibilidad de nuestras regiones, pues su vacío es notable.

Mientras tales iniciativas académico-gubernamentales prosperan y en sintonía con el sentimiento ecológico que incita al ahorro del agua ante la ocurrencia de los fenómenos mencionados, percibimos válidos en el corto plazo los pequeños gestos individuales que desde nuestra cotidianidad puedan aportar a salvaguardar el líquido preciado. Ya las campañas institucionales de sensibilización lo han advertido: cerrar la llave mientras nos lavamos manos o dientes, no regar jardines ni lavar carros con mangueras, apagar luces y aparatos eléctricos mientras no estén en uso, tomar duchas de tres minutos (preferiblemente individuales pues en pareja podrían resultar contraproducente).



Ilustración. La estrategia de “el platón”. Fuente: el autor.

A ellas añadiremos una medida simple pero efectiva y que hemos de declarar heredada de nuestro hogar materno: la estrategia de “el platón”, que consiste en ubicar un recipiente de lata o plástico de boca ancha en el lavaplatos (ver Ilustración). El agua sucia que se recoge al lavar ollas y vajillas (al menos dos platos se llenan, uno al enjabonar y otro al enjuagar), puede ser reutilizada para descargar inodoros de excrementos líquidos y hasta sólidos, o alternativamente para regar los jardines de plantas interiores o exteriores. En nuestra casa, un gracioso vergel se ha logrado mantener verde y frondoso luego de más de 75 días sin recibir gota de lluvia, gracias a esta estrategia de riego reciclable. Otras argucias que parecen funcionar son la de “el balde” (debajo de la regadera durante la ducha matutina) y la de “la caneca” (en el ducto de expulsión de la lavadora). Aguas grises que admiten un ciclo adicional de uso que por demás se ve gratamente reflejado en la economía de la factura mensual.

Así pues, nuestra reflexión busca ayudar a concientizar sobre la necesidad de escuchar las alarmas que se han encendido. Aduciremos que como ingenieros, léase estudiosos y diseñadores de mecanismos anti-derroche (entendiendo por mecanismos, métodos, aparatos, estructuras, sistemas, dispositivos, planos, artefactos y montajes), debemos enfilas baterías y reaccionar acordemente, con más veras en épocas de vacas flacas (como desfilan hoy día, literalmente, en Ubaté, Cundinamarca). Esto implicará fortalecer diálogos, fomentar colaboraciones mas estrechas, sobrepasar impasses ideológicos, religiosos, territoriales, organizacionales o políticos, y enfocar momentáneamente la atención en los fenómenos climáticos que amenazan nuestra supervivencia como especie. O que perturban al menos nuestra comodidad habitual, como lo ha demostrado este Niño. Y eso sin mencionar los estragos pluviales que promete la Niña que lo sucederá en unos cuantos meses.

Colofón. Continuando con nuestra cadena de buenas noticias en recientes números, nos complace informarles que motivados en la acogida y confianza que la comunidad ha expresado en nuestra *Revista*, hemos tomado la decisión de aumentar nuestra frecuencia de aparición a una periodicidad cuatrimestral. Es decir que, a partir de esta edición comenzaremos a publicar tres números anuales. De esta forma nuestros lectores y especialmente nuestros autores podrán beneficiarse de una vigencia más amplia y actualizada de sus postulaciones. Aprovechamos para expresar nuestra gratitud a los autores, revisores y editores que hicieron posible las contribuciones en este número, entre las que se cuentan estudios sobre asfaltos modificados, degradación térmica de polímeros, clasificación de eritrocitos, redes ópticas pasivas, servicios interactivos de televisión digital, un cargador manual de baterías y cartas de control para autopartes. Como podrán observar, y ya lo habíamos anunciado, a partir de este número todos nuestros artículos incluyen resumen estructurado. Esperamos sean de su agrado.

Sergio A. Rojas, PhD.
Editor General Revista *INGENIERÍA*

Evaluación de las Propiedades Reológicas y Térmicas de un Asfalto Convencional y uno Modificado con un Desecho de PEBD

Evaluation of Rheological and Thermic Properties of Neat and Modified Asphalt with a Waste of LDPE

William Andrés Castro López¹, Hugo Alexander Rondón Quintana¹,
Juan Carlos Barrero Calixto²

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, wacastrol@udistrital.edu.co, harondonq@udistrital.edu.co, ²Universidad Católica de Colombia, Departamento de Ciencias Básicas, jebarrero@ucatolica.edu.co

Received: 25/03/2015. Modified: 30/09/2015. Accepted: 29/10/2015

Resumen

Contexto: La tecnología de los asfaltos y las mezclas asfálticas modificadas ha sido una técnica ampliamente estudiada y utilizada en el mundo. Con la adición de polímeros al asfalto se modifican las propiedades mecánicas, químicas y reológicas de las mezclas asfálticas para intentar mejorar su comportamiento cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga y del medio ambiente. Se reporta el resultado de un estudio de caracterización reológica y térmica ejecutado sobre un cemento asfáltico CA 60-70 convencional y uno modificado con un desecho de polietileno de baja densidad (PEBD).

Método: La modificación del asfalto se realizó por vía húmeda en una proporción de PEBD/CA=5% con respecto a la masa. Para tal fin, ensayos de reología usando un reómetro dinámico de corte (DSR), y técnicas de Termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) fueron ejecutados sobre ambos asfaltos.

Resultados y Conclusiones: El asfalto modificado con PEBD desarrolla un incremento notable en la rigidez y mejoramiento del grado de funcionamiento del asfalto a altas temperaturas. Adicionalmente, el asfalto modificado es más resistente a la oxidación y al envejecimiento por aumento de temperatura. Sin embargo, experimenta disminución de la resistencia al agrietamiento, bajo temperaturas bajas e intermedias de servicio.

Palabras clave: calorimetría diferencial de barrido, cemento asfáltico modificado, envejecimiento, PEBD, temperatura, termogravimetría.

Abstract

Context: The asphalt technology and modified asphalt mixtures has been widely used and studied, worldwide. Adding polymers to asphalt modifies mechanical, chemical and rheological properties, trying to improve behavior of the mixtures subjected to different environmental and load conditions. The paper report results from rheological and thermal characterization on conventional 60-70 asphalt cement and 60-70 asphalt cement modified by introducing a waste of low density polyethylene (LDPE).

Method: Modification of the asphalt was performed by wet way in a proportion of LDPE/CA=5% with respect to the mass. Rheological (using DSR), Thermogravimetry (TGA) and Differential Scanning Calorimetry (DSC) techniques were performed.

Results and Conclusions: The modified asphalt develops a remarkable increase in stiffness and improvement of the performance grade at high temperatures of service. Additionally, the modified asphalt is more resistant to oxidation and aging processes due to heat. However, the asphalt modified showed a decrease in crack resistance at low and intermediate temperatures of service.

Keywords: differential scanning calorimetry, LDPE, modified asphalt, rheology, temperature, thermogravimetry.

Open access



Citación: Castro, W. A., Rondón, H. A. y Barrero, J. C. (2016). Evaluación de las propiedades reológicas y térmicas de un asfalto convencional y uno modificado con un desecho de PEBD. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 7-18
© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a01>

1. Introducción

Con la adición de polímeros u otros aditivos al asfalto, se intentan modificar sus propiedades físico-mecánicas, químicas y reológicas. La idea de emplear asfaltos modificados tiene como propósito mejorar la respuesta que experimentan las mezclas que los utilizan, cuando son sometidas a diferentes condiciones de carga (monotónica y cíclica) y del medio ambiente [1]. El uso de esta tecnología es también frecuente cuando es necesario que la superficie de la carretera posea una vida útil más larga de lo normal, o en aplicaciones especializadas que permiten espesores más delgados de capas asfálticas o disminuir dichos espesores [2].

Los polímeros se pueden clasificar en dos grandes grupos: termoendurecibles y termoplásticos. Los primeros no se utilizan para modificar asfaltos, pues son materiales que a altas temperaturas se descomponen o degradan totalmente sus propiedades. Los termoplásticos, por el contrario, son los utilizados para modificar asfaltos, ya que pueden ser sometidos a altas temperaturas sin que se degraden demasiado sus propiedades. Los termoplásticos a su vez se subdividen en dos clasificaciones: elastómeros y plastómeros. Los tipos de elastómeros más utilizados para modificar asfaltos son los cauchos naturales como el estireno-butadieno-estireno (SBS, por sus siglas en inglés), cauchos sintéticos derivados del petróleo (estireno-butadieno-caucho, SBR) y el grano de llanta reciclado y triturado (GCR). Dentro de la gama de los plastómeros se encuentran, entre otros: el polietileno de alta y baja densidad (PEAD y PEBD, respectivamente), polipropileno (PP), poliestireno (PS) y policloruro de vinilo (PVC). Los elastómeros experimentan bajo carga una recuperación importante en la deformación. Este tipo de polímero al ser agregados al asfalto mejora principalmente el comportamiento resiliente (recuperación elástica) de las mezclas cuando son solicitadas a ciclos de carga y descarga [3-5]. Cuando las mezclas se modifican con aditivos plastoméricos se obtiene un incremento en la resistencia mecánica de las mezclas, debido a que el asfalto se vuelve rígido [6-12]. Otros aditivos recientemente investigados para modificar asfaltos son el almidón y las nanopartículas [13-14] y nanoarcillas [15-18].

En el presente estudio se reportan los resultados de una fase experimental tendiente a evaluar la respuesta reológica y térmica que experimenta un cemento asfáltico CA 60-70 convencional y uno modificado con polietileno de baja densidad (PEBD). Para tal fin, ensayos de caracterización, reología empleando un reómetro dinámico de corte (DSR, por sus siglas en inglés), Termogravimetría (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés) fueron ejecutados. Empleando el DSR se determinó el grado de funcionamiento (PG, por sus siglas en inglés) del asfalto convencional y el modificado con PEBD a altas e intermedias temperaturas de servicio, cuando dichos asfaltos son sometidos a procesos de envejecimiento a corto y largo plazo. A través del TGA se midió la pérdida de masa de los asfaltos en función de la temperatura con atmósfera inerte. A través del DSC se caracterizó el cambio de comportamiento dúctil-frágil que experimentaron los asfaltos a través de la determinación de la temperatura de transición vítrea-T_g. El CA 60-70 fue escogido teniendo en cuenta que es el que más se produce y utiliza en Colombia para la fabricación de mezclas asfálticas. Dicho asfalto se modificó, con el fin de evaluar la respuesta que experimenta el ligante cuando se modifica con un desecho plastomérico, que ha reportado amplios beneficios cuando se utiliza como modificador de asfaltos y mezclas asfálticas [19]. El PEBD se escogió debido principalmente a que: i) es un material de alta resistencia térmica y química; ii) de acuerdo con [20], en Bogotá D.C. diariamente se producen alrededor de 600 toneladas de basuras de

las cuales el 10% aproximadamente son plásticos y el consumo *per capita* de estos materiales en Colombia es de 11.3 kg anuales. De este 10% gran parte proviene de desechos de PEBD, que puede ser utilizado para modificar las propiedades de mezclas asfálticas y así disminuir el impacto ambiental negativo que generan.

El ensayo de reología con DSR es utilizado para evaluar el comportamiento visco-elástico que experimenta el CA a intermedias y altas temperaturas de servicio. El procedimiento de ensayo puede ser consultado en AASHTO T 315-05. En el DSR se miden dos parámetros fundamentales: el módulo complejo de corte (G^*) y el ángulo de fase (δ). G^* puede ser considerado como la resistencia del CA a deformarse por esfuerzos de corte repetidos, mientras que δ es el desfase entre el esfuerzo cortante aplicado y la deformación de corte resultante durante el ensayo. Entre mayor sea δ , el material es más viscoso. Un material que experimente un comportamiento totalmente elástico experimenta un $\delta=0^\circ$, mientras que uno puramente viscoso presenta $\delta=90^\circ$. G^* y δ son utilizados para intentar predecir la resistencia al ahuellamiento y al agrietamiento por fatiga. Con el fin de evitar ahuellamiento en una mezcla asfáltica, el ligante asfáltico debe ser lo suficientemente rígido (bajo corte) y elástico, por lo tanto, la relación $G^*/\sin\delta$ debe ser grande. $G^*/\sin\delta$ debe ser como mínimo 1 kPa y 2.2 kPa para un ligante sin envejecimiento en RTFOT (Rolling Thin Film Oven Test) y con este respectivamente. Para evitar agrietamiento por fatiga, la mezcla debe ser elástica pero no tan rígida hasta que se fragilice (la rigidez debe ser la suficiente para que la mezcla experimente un comportamiento dúctil); por lo tanto, $G^*\sin\delta$ debe ser mínima. Como máximo se admite $G^*\sin\delta=5000$ kPa [1, 21].

La Termogravimetría (TGA) es una técnica que se basa en el registro de la variación en el porcentaje de la masa de una muestra, bien sea como función de la variación en temperatura a lo largo del tiempo, o como función de la variación del tiempo durante el cual la muestra permanece a una temperatura constante (proceso isotérmico). Por medio de esta técnica se pueden medir cambios en la masa de la muestra, asociados a procesos tales como: reacciones de oxidación, reacciones de descomposición, vaporización, sublimación y desorción. La calorimetría diferencial de barrido (DSC) es una técnica experimental dinámica que permite determinar la cantidad de calor que absorbe o libera una sustancia, cuando es mantenida a temperatura constante, durante un tiempo determinado, o cuando es calentada o enfriada a velocidad constante, en un determinado intervalo de temperaturas. Por otra parte, es bien sabido que el conocimiento de la estabilidad térmica de un material, así como la completa caracterización de sus transiciones, es de primordial interés en los materiales con potenciales aplicaciones industriales. Con la utilización de esta técnica se busca estudiar la influencia del historial térmico en la estructura microscópica de los materiales, como herramienta que permita establecer una posible correlación entre el comportamiento a nivel macroscópico y microscópico. En general, las transiciones de fase de primer orden se pueden detectar por medio de la DSC. Esto se puede aprovechar en aplicaciones como: i) medidas de capacidad calorífica aparente (fenómenos de relajación estructural; ii) determinación de temperaturas características de transformación o de transición tales como transición vítrea, transición ferro-paramagnética, cristalización, transformaciones polimórficas, fusión, ebullición, sublimación, descomposición e isomerización; iii) estabilidad térmica de los materiales; y iv) cinética de cristalización de los materiales [22-23].

Por otro lado, los polímeros son macromoléculas constituidas por moléculas más pequeñas llamadas monómeros. A ciertas temperaturas, se comportan como un líquido viscoso, con sus cadenas en constante movimiento, reordenando su posición y tendiendo a deslizarse unas sobre otras. A medida que se enfría, las cadenas pierden movilidad y se atraen más disminuyendo el volumen, lo que limita sus grados de libertad. Aunque sus cadenas están aún vibrando ya no pueden girar para

cambiar su posición y no tienen forma de amortiguar los impactos, adoptando las características de un sólido rígido y frágil. El cambio, entre estos dos comportamientos del material se da a través de un evento térmico, asociado a una transición de fase de segundo orden, conocido como temperatura de transición vítrea T_g , donde hay cambios de su densidad y rigidez [24].

2. Materiales y métodos

2.1. Caracterización del asfalto

Al cemento asfáltico CA 60-70, se le realizaron los ensayos que exige la especificación del Instituto Nacional de Vías INVIAS [25-26] para caracterizarlos, los resultados se presentan en la tabla I. Así, se observa que el asfalto cumple con los requisitos mínimos de calidad para ser utilizado en la fabricación de mezclas asfálticas.

Tabla I. Características generales del CA 60-70.

Ensayo	Método	Unidad	Recomendado INVIAS [25]	Resultado
Ensayos sobre el asfalto original				
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	60-70	65
Índice de penetración	NLT 181/88	-	Entre -1 y +1	-0,8
Viscosidad absoluta (60°C)	ASTM D-4402	Poises	1000 mín.	1800
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	>100	>105
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	-	50
Solubilidad en Tricloroetileno	ASTM D-2042	%	>99	>99
Contenido de agua	ASTM D-95	%	<0,2	<0,2
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	232 mínimo	285
Ensayos sobre el residuo luego del RTFOT				
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	1,0 máximo	0,65
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	% (de la penetración original)	48 mínimo	73

Fuente: elaboración propia.

2.2. Preparación del asfalto modificado

El desecho de polietileno fue obtenido del reciclaje de palillos de coloración blanca que son utilizados para mezclar bebidas calientes en empresas (ver figura 1) y presenta una densidad de 0,92 g/cm³. Los palillos fueron cortados de tal forma que sus dimensiones pasaran el tamiz No. 4 y fuera retenido en el No. 10 de un ensayo de granulometría.

Los palillos de PEBD fueron mezclados por vía húmeda al CA 60-70 en una relación de PEBD/CA=5,0% a una temperatura entre 150 ± 5°C. La temperatura fue escogida debido a que por encima de la misma el CA experimenta envejecimiento por pérdida de componentes químicos por oxidación y, por debajo, el mezclado se dificulta. El tiempo de mezclado fue de 40 minutos. La relación de PEBD/CA=5,0% fue escogida debido a que reportó el mejor comportamiento en una mezcla de concreto asfáltico [19]. Sobre el cemento asfáltico modificado

se realizaron ensayos de caracterización como el de penetración, punto de ablandamiento, ductilidad y envejecimiento en RTFOT.



Figura 1. Palillos reciclados de PEBD.

Fuente: elaboración propia.

2.3. Caracterización reológica y térmica del asfalto convencional y del modificado

Los ensayos de caracterización reológica se ejecutaron empleando un reómetro dinámico de corte (DSR), siguiendo los lineamientos establecidos en la especificación AASHTO T 315-05. Dicha caracterización, se ejecutó a altas e intermedias temperaturas de servicio. La prueba básica DSR utilizó como muestra una lámina delgada colocada entre dos placas circulares. La placa inferior es fija, mientras que la placa superior oscila hacia adelante y hacia atrás, a través de la muestra a 10 rad/s (1.59 Hz para simular el efecto de un vehículo circulando a 90 km/h) para crear una acción de corte.

Para realizar los ensayos de caracterización térmica empleando las técnicas TGA y DSC, se utilizaron muestras del cemento asfáltico CA 60-70 convencional (sin aditivo, PEBD/CA=0%), del PEBD y del asfalto modificado con PEBD (PEBD/CA=5,0%), a su vez, se depositaron en capsulas de aluminio. Las masas oscilaron entre 0,325 mg y 8,222 mg. Para ejecutar los ensayos se empleó un equipo “Universal T.A. Instruments”, en atmósfera controlada de nitrógeno gaseoso. En ambas técnicas se establecieron ratas de barrido de 5° C/minuto. Los rangos de temperaturas utilizados en los ensayos oscilaron entre la ambiente (25° C) y 340° C para la técnica TGA, y entre -20° C y 350° C para la técnica DSC. Los parámetros obtenidos fueron la temperatura de transición vítrea Tg en el DSC y los porcentajes de pérdida de masa en el TGA, los cuales fueron calculados empleando el software “TA Universal Analysis”.

3. Resultados

3.1. Ensayos de caracterización sobre el asfalto modificado

Comparando los resultados presentados en las tablas I (asfalto convencional) y tabla II (asfalto modificado, PEBD/CA=5%), se observa que: i) el aditivo tiende a rigidizar notablemente el asfalto (incrementa el punto de ablandamiento y disminuye la penetración); ii) la ductilidad disminuye de manera lógica, ya que el aditivo se rigidiza cuando ocurre el enfriamiento del asfalto modificado. Adicionalmente el aditivo debe romper, al mezclarse con el asfalto, parte de su microestructura; iii) el asfalto modificado con PEBD incrementa su resistencia a inflammar a altas temperaturas; y iv) el asfalto modificado es más resistente a la pérdida de masa en el ensayo de envejecimiento a corto plazo en RTFOT.

Tabla II. Características generales del CA 60-70 modificado con PEBD.

Ensayo	Método	Unidad	CA 60-70 modificado
Penetración (25°C, 100 g, 5 s)	ASTM D-5	0,1 mm	35
Ductilidad (25°C, 5cm/min)	ASTM D-113	cm	55
Punto de ablandamiento	ASTM D-36-95	°C	61
Pérdida de masa	ASTM D-2872	%	0,4
Punto de inflamación	ASTM D-92	°C	301

Fuente: elaboración propia.

3.2. Ensayos de caracterización reológica

Las tablas III y IV muestran los resultados de caracterización reológica del asfalto de referencia (sin aditivo, PEBD/CA=0%) y modificado con PEBD/CA=5%, respectivamente. El grado de desempeño a altas e intermedias temperaturas de servicio del asfalto de referencia CA 60-70 (sin

Tabla III. Características reológicas del CA 60-70.

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	δ [°]	G^* [Pa]	$IG^*/\sin\delta$ [kPa]	$IG^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70, sin envejecer					
58	10	87	2470	2.473	2.467
64	10	88	1002	1.00	1.00
CA 60-70 envejecido en RTFOT					
58	10	85	4276	4,29	4,26
64	10	87	1701	1.70	1.70
CA 60-70 envejecido en RTFOT + PAV					
19	10	45	10193000	14415,1	7207,6
22	10	47	6659000	9105.0	4870.0

Fuente: elaboración propia.

aditivo, HUSIL/CA=0%) es 58° C ($IG^*/\sin\delta > 1.0$ kPa para asfalto sin envejecer y $IG^*/\sin\delta > 2.2$ kPa para asfalto envejecido en RTFOT) y 22° C ($IG^*/\sin\delta < 5000$ kPa para asfalto envejecido en RTFOT + PAV), respectivamente. G^* , δ , RTFOT y PAV (Pressure Aging Vessel) se refieren a módulo de corte complejo, ángulo de fase, envejecimiento a corto plazo en horno de película delgada rotatorio y envejecimiento a largo plazo en vasijas sometidas a presión, respectivamente. Cuando se modificó el asfalto CA 60-70 con PEBD/CA=5% el grado de desempeño a altas temperaturas de servicio aumentó a 70 °C, lo cual es indicador de un ligante más resistente a fenómenos como el ahuellamiento en climas de alta temperatura. Sin embargo, a temperaturas intermedias, el grado de desempeño desmejoró (aumentó de 22 a 26° C). Lo anterior es indicador de un asfalto menos resistente a fenómenos de agrietamientos cuando es sometido a menores temperaturas de servicio. Con base en los resultados reportados, el asfalto modificado al someterse a temperaturas por debajo de los 26° C puede volverse frágil y quebradizo.

Tabla IV. Características reológicas del CA 60-70 modificado.

Temperatura [°C]	Frecuencia [rad/s]	δ [°]	G^* [Pa]	$IG^*/\sin\delta$ [kPa]	$IG^* \cdot \sin\delta$ [kPa]
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, sin envejecer					
64	10	68	2566,7	2,77	2,38
70	10	69	1294,3	1,39	1,21
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, envejecido en RTFOT					
70	10	70	2233	2,38	2,10
76	10	72	1289	1,36	1,23
CA 60-70 modificado con PEBD/CA=5%, envejecido en RTFOT + PAV					
22	10	43	10.329.130	15.145,4	7.044,4
26	10	44	7.111.600	10.237,6	4.940,1

Fuente: elaboración propia.

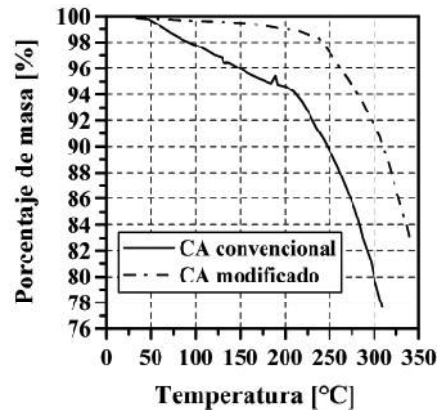


Figura 2. Termograma del CA 60-70 convencional (sin aditivo) y del modificado (PEBD/CA=5%).

Fuente: elaboración propia.

3.3. Ensayos TGA

En las figuras 2 y 3 se muestran los termogramas obtenidos con la técnica TGA para el asfalto CA 60-70, el PEBD y el CA modificado con PEBD. En la figura 2 se observa que el CA 60-70 experimenta, para temperaturas entre 25°C (ambiente promedio) y 165 °C (en planta de asfalto), una pérdida de masa aproximada de 4,89%, mientras para la región entre 165°C y 305 °C, hay una pérdida aproximada de 17,98%. En el caso del PEBD (figura 3) se observa una pérdida despreciable de su masa para temperaturas inferiores a 220°C. Entre 220°C y 340°C se observa una pérdida de masa de tan solo 1,56%. Para el caso del CA modificado con PEBD (figura 2), entre 30°C y 165 °C, se observa una pérdida de masa de 0,53%, mientras que para la región entre 165°C y 340°C experimenta una pérdida del 16,56%. En el rango de temperatura al cual está expuesto el CA en una planta de asfalto, durante el proceso de fabricación de mezclas asfálticas (140 a 165°C), el CA 60-70 con y sin modificación con PEBD experimentan una pérdida de masa aproximada de 0,95% y 4,7%, respectivamente. Lo anterior evidencia que el cemento asfáltico modificado es más estable en todo el rango de temperaturas y podría experimentar menor oxidación y por ende envejecimiento.

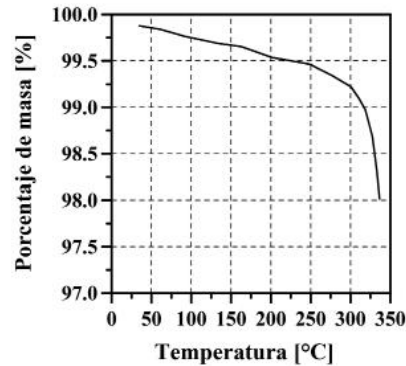


Figura 3. Termograma del PEBD.

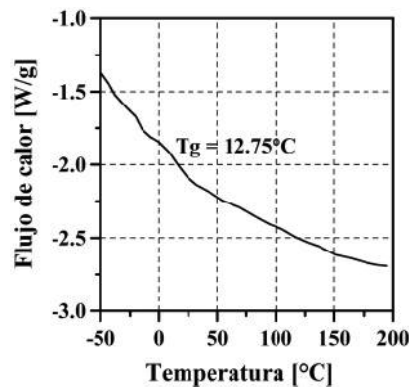


Figura 4. Resultado DSC del CA 60-70.

Fuente: elaboración propia.

3.4. Ensayos DSC

En las figuras 4, 5 y 6, se muestran los resultados obtenidos con la técnica DSC. En la figura 4 se observa que el CA 60-70 experimenta una temperatura de transición vítrea $T_g=12,75^\circ\text{C}$, mientras que el PEBD no presenta temperatura de transición vítrea (figura 5), mostrando solamente un pico asociado al proceso de fusión a los $152,46^\circ\text{C}$ con una energía de fusión de $92,61\text{ J/g}$. El CA modificado con PEBD experimenta una temperatura de transición vítrea $T_g=37,63^\circ\text{C}$ y un pico de fusión a los $154,24^\circ\text{C}$, con una energía asociada al calor latente de $16,03\text{ J/g}$. Estos resultados muestran que, al agregar PEBD al CA 60-70, la temperatura T_g experimenta un desplazamiento de $12,75^\circ\text{C}$ a $37,63^\circ\text{C}$. En otras palabras, se ha inducido un cambio en el comportamiento dúctil-frágil del asfalto hacia mayores temperaturas. Lo anterior significa que el asfalto modificado experimentará un comportamiento frágil cuando la temperatura del mismo dentro de la mezcla asfáltica esté por debajo de $37,63^\circ\text{C}$. Para el caso del asfalto CA 60-70 sin aditivo, este comportamiento frágil se adquiere cuando la temperatura del asfalto dentro de la mezcla sea inferior a $12,75^\circ\text{C}$.

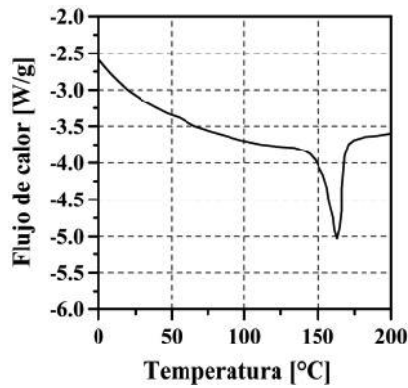


Figura 5. Resultado DSC del PEBD.

Fuente: elaboración propia.

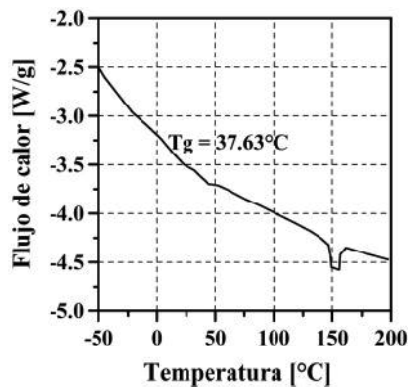


Figura 6. Resultado DSC del CA modificado.

Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

Aunque el contenido de PEBD agregado al asfalto es bajo (5% con respecto a su masa), se reportan cambios significativos en las propiedades del ligante modificado: i) incremento de la rigidez y mejoramiento del grado de funcionamiento del asfalto a altas temperaturas; y ii) disminución de la resistencia al agrietamiento a temperaturas bajas e intermedias de servicio. Lo anterior induce a pensar en la utilización del asfalto modificado en la fabricación de mezclas asfálticas, que vayan a ser utilizadas en climas de alta temperatura (para resistir fenómenos como el ahuellamiento) y capas asfálticas gruesas.

Según los termogramas TGA, la pérdida de masa que experimenta el CA 60-70 es de 22,87% en el rango de temperatura entre 30°C a 300°C, mientras el PEBD pierde el 1,56%. Al modificar el CA 60-70 con el PEBD se obtiene un material que pierde un total de 17,09%. En el rango de temperatura al cual está expuesto el CA en una planta de asfalto (140°C a 165°C), el CA 60-70 con y sin modificación con PEBD experimenta una pérdida de masa aproximada de 0,95% y 4,7%, respectivamente. El asfalto modificado es evidentemente más resistente a la pérdida de masa. Lo anterior lleva a concluir que el asfalto modificado podría llegar a ser más resistente a la oxidación y al envejecimiento por aumento de temperatura, en comparación con el asfalto CA 60-70 sin modificar.

A partir de los resultados DSC, se evidencia que el cemento asfáltico CA 60-70 es un material amorfo (pues no hay un pico asociado a procesos de fusión) que presenta una temperatura de transición vítrea alrededor de los 12,75°C. Por otro lado, el PEBD muestra ser un polímero predominantemente cristalino, ya que no se evidencia la presencia de una temperatura de transición vítrea. Finalmente, el material que se obtiene, al modificar el CA 60-70 con PEBD, presenta las propiedades de los materiales precursores, es decir muestra una temperatura de transición vítrea y un pico asociado a un proceso de fusión. Al comparar estas temperaturas se encuentra que han experimentado, correspondientemente, un desplazamiento con respecto a las temperaturas que se observan en el CA 60-70 y el PEBD, así: la Tg para el CA 60-70 es 12,75°C y para el CA 60-70 modificado es 37,63°C. El pico de fusión para el PEBD se ubica en los 152,46°C, mientras que para el caso del CA 60-70 modificado se ubica en los 154,24°C. Lo anterior indica que el asfalto modificado experimenta un cambio de comportamiento dúctil a frágil a mayores temperaturas de servicio que aquel sin modificar, pudiendo experimentar *in situ*, menor resistencia a fenómenos como agrietamientos a bajas temperaturas de servicio y fatiga. Lo anterior es debido principalmente a que el PEBD por ser un polímero termoplástico rigidiza el asfalto. Estos resultados son coherentes con los reportados en los ensayos de caracterización reológica. Sin embargo, no existe una correlación directa entre la mínima temperatura de servicio reportada en el ensayo de reología (26° C) y aquella reportada en el ensayo DSC (37.63° C).

Al contrastar el comportamiento del asfalto CA 60-70 con el modificado, se observa una respuesta diferente, la cual se manifiesta como un fenómeno colectivo producido a nivel micro-estructural, es decir, la diferencia en las respuestas a los estímulos térmicos solo se pueden explicar por una alteración de dicha estructura.

Referencias

- [1] H. A. Rondón y F. A. Reyes, “Pavimentos—Materiales, Construcción y Diseño”. Bogotá D.C.: Ed. ECOE, 2015, 573 p.
- [2] D. Casey, C. McNally, A. Gibneya and M. Gilchrist, “Development of a recycled polymer modified binder for use in stone mastic asphalt”. *Journal of Resources, Conservation and Recycling*, Volume 52, Number 10, 2008, pp. 1167-1174.
- [3] M. Rahi, E. Fini, P. Hajikarimi, and F. Nejad, “Rutting characteristics of styrene-ethylene/propylene-styrene polymer modified asphalt”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 27, Number 4, 2015, 04014154.
- [4] X. Yan, X. Jin, W. Li, F. Xiao and Y. Zhang, “The effect of modifying technologies on asphalt pavement performance”. CICTP 2014, ASCE, 2014, pp. 1101-1109.
- [5] S. Wang, Q. Wang, X. Wu and Y. Zhang, “Asphalt modified by thermoplastic elastomer based on recycled rubber”. *Construction and Building Materials*, Volume 93, 2015, pp. 678–684.
- [6] M. Domingos, and A. Faxina, “Susceptibility of asphalt binders to rutting: literature review”. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2015, 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001364, 04015134.
- [7] K. Yan, H. Xu, and L. You, “Rheological properties of asphalts modified by waste tire rubber and reclaimed low density polyethylene”. *Construction and Building Materials*, Volume 83, 2015, pp. 143-149.
- [8] F. M. Nejad, A. Azarhoosh, and G. H. Hamed, “Effect of high density polyethylene on the fatigue and rutting performance of hot mix asphalt – a laboratory study”. *Road Materials and Pavement Design*, Volume 15, Number 3, 2014, pp. 746-756.
- [9] M. Arabani, S. M. Mirabdolazimi and A. R. Sasani, “The effect of waste tire thread mesh on the dynamic behaviour of asphalt mixtures”. *Construction and Building Materials*, Volume 24, Number 6, 2010, pp. 1060-1068.
- [10] E. Ahmadinia, M. Zargar, M. R. Karim, M. Abdelaziz and P. Shafiqh, “Using waste plastic bottles as additive for stone mastic asphalt”. *Materials and Design*, Volume 32, Number 10, 2011, pp. 4844-4849.
- [11] K. Alshamsi, M. Baawain, K. Aljabri, R. Taha and Z. Al-kamyani, “Utilizing waste spent catalyst in asphalt mixtures”. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, Volume 53, 2012, pp. 326-334.
- [12] L. Widodojoko and P. E. Purnamasari, “Study the use of cement and plastic bottle waste as ingredient added to the asphaltic concrete wearing course”. *Procedia—Social and Behavioral Sciences*, Volume 43, 2012, pp. 832-841.
- [13] A. Jamshidi, M. R. M. Hasan, H. Yao, Z. You, and M. O. Hamzah, “Characterization of the rate of change of rheological properties of nano-modified asphalt”. *Construction and Building Materials*, Volume 98, 2015, pp. 437-446.
- [14] G. Polacco, S. Filippi, F. Merusi, and G. Stastna, “A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility”. *Advances in Colloid and Interface Science*, Volume 224, 2015, pp. 72-112.
- [15] F. Hussain, S. Roy, K. Narasimhan, K. Vengadassalam and H. Lu, “E-Glass—Polypropylene pultruded nanocomposite: manufacture, characterization, thermal and mechanical properties”. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Volume 20, Number 4, 2007, pp. 411-434.
- [16] J. Yu, L. Wang, X. Zeng, S. Wu, and B. Li, “Effect of montmorillonite on properties of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumen”. *Polymer Engineering & Science*, Volume 47, Number 9, 2007, pp. 1289-1295.

- [17] J. Yu, X. Zeng, S. Wu, L. Wang, and G. Liu, "Preparation and properties of montmorillonite modified asphalts". *Materials Science and Engineering*, Volume 447, Number 1–2, 2007, pp. 233-238.
- [18] Z. You, J. Mills-Beale, J. M. Foley, S. Roy, G. M. Odegard, Q. Dai and S. W. Goh, "Nanoclay-Modified asphalt materials: preparation and characterization". *Construction and Building Materials*, Volume 25, Number 2, 2011, pp. 1072-1078.
- [19] H. A. Rondón, W. Fernández, and W. Castro, "Mechanical properties evaluation of a dense hot asphalt mixture modified with a residue of Low Density Polyethylene (LDPE)". *Ingeniería de Construcción*, Volume 25, Number 1, 2010, pp. 83-94.
- [20] F. A. Reyes y A. F. Figueroa, "Uso de desechos plásticos en mezclas asfálticas – Síntesis de la investigación colombiana". Bogotá D.C.: Editorial Pontificia Universidad Javeriana, 2008, 103 p.
- [21] A. Motamed, and H. Bahia, "Influence of test geometry, temperature, stress level, and loading duration on binder properties measured using DSR". *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 23, Number 10, 2011, pp. 1422-1432.
- [22] J. Puello, "Evolución del comportamiento viscoelástico lineal de fracciones pesadas del petróleo crudo sometidas a envejecimiento acelerado". Tesis de doctorado en Ingeniería Química, Universidad Industrial de Santander, Colombia, 2012.
- [23] M. G. Volonté y P. Quiroga, *Análisis farmacéutico*. La Plata: Ed. La Plata, Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Exactas, 2013, 347 p.
- [24] J. J. Sánchez, "Comportamiento térmico y mecánico del poli(etilén tereftalato) (PET) modificado con resinas poliméricas basadas en bisfenol-A". Tesis de doctorado, Universitat Politècnica de Catalunya. Departament de Ciència dels Materials i Enginyeria Metallúrgica, 2003.
- [25] INVIAS–Instituto Nacional de Vías, *Especificaciones Generales para Construcción de Carreteras*. Bogotá D.C.: Autor, 2013.
- [26] INVIAS–Instituto Nacional de Vías, *Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras*. Bogotá D.C.: Autor, 2013a.

William Andrés Castro López

Físico egresado de la Universidad del Valle; magíster en Física de la Universidad del Valle -Cali, doctor de la Universidad del Valle sede Cali -Colombia; Profesor asistente en el área de Ciencias Básicas en la Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; adscrito al grupo de investigación "Centro de Estudios de Pavimentos", donde realiza estudios sobre materiales para carreteras. Contacto: wacastrol@udistrital.edu.co

Hugo Alexander Rondón Quintana

Ingeniero Civil de la Universidad Francisco de Paula Santander ; magíster en ingeniería, Universidad de Los Andes; doctor de la Universidad de Los Andes; profesor asociado en el área de los pavimentos de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá; adscrito al grupo de investigación "Centro de Estudios de Pavimentos", donde realiza estudios sobre materiales para carreteras. Contacto: hondonq@udistrital.edu.co

Juan Carlos Barrero Calixto

Físico de la Universidad de los Andes de Bogotá; especialista en filosofía de la Ciencia de la universidad del Bosque; máster (c) en Sistemas integrados de Gestión; universidad Camilo José Cela; maestrando en investigación operativa y estadística, universidad tecnológica de Pereira; Docente de la Universidad Católica de Colombia y consultor en áreas de ingeniería a empresas de transporte y petroleras. Contacto: jcbarrero@ucatolica.edu.co

Determinación de la Degradación Térmica de Polímeros por Análisis de Cambio de Color

Determination of Polymers Thermal Degradation by Color Change Analysis

Andrés Felipe Rojas González,^{1*} Tim Osswald²

¹ Grupo de Investigación Aprovechamiento de Residuos, Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, ² Professor Polymer Engineering Center Mechanical Engineering University of Wisconsin-Madison, Madison, USA.

* correspondence email: anfrojasgo@unal.edu.co

Received: 14/09/2015. Modified: 14/11/2015. Accepted: 24/11/2015

Resumen

Contexto: Se ha observado que la degradación térmica de polímeros termoplásticos, cuando son reprocesados por inyección, extrusión y extrusión/inyección, causa cambios de color en el producto, aunque no se ha establecido en qué medida produce este efecto.

Método: Se analizó el efecto sobre la degradación térmica del tipo de polímero, tipo de procesamiento, grado del polímero, velocidad de giro del husillo en extrusión y el número de reprocesamientos, cuantificada a través del cambio de color mediante una ecuación empírica, empleando datos experimentales obtenidos por análisis en un colorímetro microcolor.

Resultados: Se encontró que el análisis de cambio de color proporciona información del avance de la degradación y de la estabilidad térmica de polímeros termoplásticos al ser procesados en múltiples ciclos y procesos.

Conclusiones: Se estableció que esta técnica se puede implementar como una medida simple y eficiente de control de calidad de productos termoplásticos, según su variación del color.

Palabras clave: análisis de cambio de color, degradación térmica, extrusión, inyección, polímeros termoplásticos.

Abstract

Context: It has been observed that thermal degradation of thermoplastic polymers, when they are reprocessed by injection, extrusion and extrusion / injection, undergo color changes in the product, although it not has been established as this change occurs.

Method: It analyzed the effect on thermal degradation caused by polymer type, processing type, polymer grade, rotation speed of the extrusion screw and number of reprocessing, which is quantified by the color change using an empirical equation, with experimental data obtained by analysis through a microcolor colorimeter.

Results: It was found that the color change analysis provides information about progress of the thermal degradation and stability of thermoplastic polymers, which are undergoing to multiple reprocessing events and processes.

Conclusions: It was established that this technique can be implemented as a simple and efficient measure of thermoplastic products quality control, according to their color change.

Keywords: color change analysis, extrusion, injection, thermal degradation, thermoplastic polymers.

Language: Spanish.

Open access



Citación: Rojas, A. F. y Osswald, T. (2016). Determinación de la degradación térmica de polímeros por análisis de cambio de color. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 19–30
© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a02>

1. Introducción

En los últimos veinticinco años se ha puesto de manifiesto la necesidad de estudiar y desarrollar materiales poliméricos que permitan su reutilización y reciclaje, volviendo a ser parte del ciclo económico. Para ello es necesario considerar aspectos importantes como el proceso de degradación que sufren estos materiales durante su síntesis, procesamiento, uso y reprocesamiento [1]. De estos procesos, el reprocesamiento es el de mayor cuidado, dado que puede dar lugar a la degradación térmica, degradación termo-oxidativa o degradación mecánica, que afecta la estructura de los polímeros y las propiedades de los materiales con los que se mezclan, dando como consecuencia una reducción en la vida útil del producto terminado [2] [3]. En adición, este proceso trae consigo algunos beneficios como: suplir en parte la necesidad de materia prima, disminuir la disposición de residuos y beneficios económicos, cuando las piezas rechazadas en la producción son retornadas al proceso.

El reprocesamiento es una operación en la cual un polímero experimenta ciclos repetidos de procesamiento, ocasionando variación o degradación significativa de sus propiedades [4]. Este reprocesamiento puede efectuarse mediante operaciones como la extrusión, inyección, termoformado, moldeo por compresión, moldeo por soplado, moldeo por rotación o moldeo rotacional, soplado de películas, calandrado, espumado, soldado, revestimiento y elaboración de fibras. De estos procesos, la extrusión y el moldeo por inyección son comúnmente utilizados en la industria y especialmente para el reprocesamiento de polímeros [5]. Durante la extrusión e inyección, los polímeros experimentan cizalla y altas temperaturas que causan degradación térmica, mecánica y química, los cuales pueden provocar significativos cambios, no solo en las propiedades reológicas de la masa fundida, sino también en las propiedades ópticas y mecánicas del producto final [6]. Para monitorear la evolución de las propiedades de materiales poliméricos durante su procesamiento, se han empleado algunas técnicas, las cuales pueden ser cualitativas o cuantitativas, como la reología, espectroscopia de absorción, atenuación ultrasónica, microscopia de imagen, dispersión de luz y colorimetría (análisis de cambio de color) [6] [7].

Varios estudios han demostrado que la colorimetría es una valiosa herramienta para evaluar las condiciones de procesamiento o los cambios en la estructura del material. El análisis de cambio de color se ha utilizado para evaluar la influencia de la adición de bases de estabilización sobre la reciclabilidad del polipropileno por reprocesamiento en extrusión [8] y la degradación a la intemperie de materiales compuestos de madera con polietileno de alta densidad y polipropileno [9]. Reis *et al.* observaron un aumento en la intensidad del color amarillo de polipropileno/nanocompuestos montmorillonita después de múltiples extrusiones [10]. También se han analizado los cambios experimentados por nanocompuestos de poliamida 6 en el reprocesamiento por moldeo por inyección [11], la degradación por reprocesamiento en extrusión de nanocompuestos de ABS/MMT [12] y PP/MMT [1] y la degradación por inyección de polietileno durante el reprocesamiento [4]. Remili *et al.* estudiaron el efecto del reprocesamiento sobre el cambio de color en poliestireno y nanocompuestos de poliestireno/cloisita 15A, encontrando que el nivel de color es más pronunciado cuando el número de ciclos aumenta, indicando que hay degradación térmica [7]. Sánchez *et al.* evaluaron la reciclabilidad en múltiples extrusiones de embaces de PE, PP y PET que son reforzados con nanomateriales [13]; y Hamester *et al.* estudiaron la degradación termomecánica en múltiples extrusiones de un homopolímero de polipropileno [6]. En todas estas investigaciones se encontró que es posible determinar la degradación de polímeros por el análisis de color y que los materiales se degradan con el aumento en el número de reprocesamientos sufridos por ellos.

El objetivo de este trabajo es validar el análisis de cambio de color, como una herramienta confiable y rápida, para establecer cuantitativamente la degradación térmica de polímeros. Para ello se determina la degradación térmica de 7 siete polímeros reprocesados cinco veces en extrusión, inyección y extrusión/inyección, y se evalúa el efecto del número de reprocesamientos (o ciclos de procesamiento), la velocidad de giro del husillo en extrusión, el grado del polímero, el tipo de procesamiento (extrusión, inyección y extrusión/inyección) y el tipo de polímero, en el cambio de calor con la ecuación empírica de Hunter-Scotfield.

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

Se emplearon siete polímeros termoplásticos para este estudio, así: dos tipos de Polietileno de Alta Densidad (HDPE), uno de grado inyección (GI) y el otro de grado extrusión (GE), Polietileno de Baja Densidad (LDPE), Poliestireno (PS), Polimetil Metacrilato (PMMA), Polipropileno (PP) y Poliacido Láctico (PLA). Estos polímeros fueron suministrados por las empresas americanas IDES y Nature Works–USA.

2.2. Reprocesamiento de polímeros

Los siete polímeros se sometieron a cinco ciclos de procesamiento en tres procesos diferentes, descritos a continuación: el polietileno de alta densidad grado extrusión se sometió a extrusión a dos diferentes velocidades de giro del husillo (20 y 80 rpm); el polietileno de alta densidad grado inyección experimentó el reprocesamiento por extrusión, extrusión/inyección e inyección; mientras que los polímeros restantes (polietileno de baja densidad, poliestireno, polimetil metacrilato, polipropileno y poliacido láctico), se reprocesaron por extrusión.

Para el proceso de extrusión se empleó una extrusora monohusillo marca EXTRUDEX ED-N 45-30D, con un diámetro de husillo de 45 mm y una relación longitud / diámetro L/D de 30. Se operó con una restricción de salida del polímero en el dosificador de 10 (0 máxima y 56

Tabla I. Condiciones de operación en el proceso de extrusión para cada polímero.

Parámetro	HDPE-IG	HDPE-EG	LDPE	PLA	PS	PMMA	PP
T. cilindro 1, °C	180	180	180	180	180	180	200
T. cilindro 2, °C	190	190	190	190	190	190	205
T. cilindro 3, °C	200	200	200	200	200	200	210
T. cilindro 4, °C	210	210	210	205	210	210	215
T. brida, °C	220	220	220	210	220	220	220
T. homogenización 1, °C	220	220	220	210	220	210	220
T. homogenización 2, °C	220	220	210	210	210	210	220
T. homogenización 3, °C	220	220	210	210	210	210	220
T. alimentación, °C	28	28	29	29	27	28	27
Vel. del tornillo, rpm	20	20 y 80	30	30	30	30	30
Restricción	10	10	10	10	10	10	10

mínima restricción), la velocidad de rotación del husillo y el perfil de temperatura en las ocho zonas de calentamiento de la extrusora varía para cada polímero, como se muestra en la tabla I. En este proceso el material se transporta por un tornillo giratorio mientras se funde, para ser posteriormente impulsado a través de una abertura. Los polímeros sometidos a extrusión experimentaron las mismas operaciones: un primer secado, extrusión, enfriamiento, reducción de tamaño (aproximadamente 2mm de diámetro y 3 mm de altura) y un segundo secado. El secado se realizó en un horno a 90°C por un tiempo de 1 hora.

El proceso de inyección se realizó en una inyectora monohusillo marca Boy XS, con diámetro del husillo de 12mm, una relación L/D de 19.6, una velocidad máxima de inyección de 24 cm³/s y una presión máxima de 3130 bar (45.4 psi). En este equipo la muestra se somete a calentamiento y posterior fundición, para que mediante un movimiento similar al de un pistón el polímero es inyectado al molde, manteniendo la presión sobre el material alimentado hasta que solidifique [14]. Las muestras para análisis de este proceso experimentaron las mismas operaciones en sus cinco ciclos de reprocesamiento: un primer secado (90°C por 1 h), inyección, reducción de tamaño y un segundo secado (90°C por 1 h).

El proceso de extrusión/inyección consiste en pasar el polímero por la extrusora y después por la inyectora, y se toma la muestra al final del proceso de inyección. Cada muestra se somete a cada una de las siguientes etapas: un primer secado, extrusión, reducción de tamaño, segundo secado, inyección, reducción de tamaño y un tercer secado.

2.3. Caracterización general

Los polímeros vírgenes o polímeros sin procesar, se caracterizaron térmicamente por Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC) respecto a su temperatura de transición vítrea, temperatura de fusión y temperatura de cristalización, en un calorímetro marca Netzsch DCS 200-PC, siguiendo la norma ASTM D 3418-08. También se determinó el índice de fluidez (IF) por medio de un plastómetro marca Dynisco Polymer Test, modelo D4003, en el que se establece la masa de polímero que fluye por un capilar en un tiempo de diez minutos, de acuerdo a la norma ASTM D1238.

2.4. Análisis de color

El análisis de color se llevó a cabo en un colorímetro microcolor de tres estímulos, marca X-Rite Color Master modelo 8200, que utiliza el programa CM2, de acuerdo a la ASTM D 2244-11. Los tres estímulos de color evaluados fueron: el factor de luminancia L , el cual mide el carácter de luminosidad y oscuro; y las coordenadas de cromaticidad, que son el índice de saturación al rojo a , que mide el carácter rojo-verde; y el índice de saturación al amarillo b , que cuantifica el carácter amarillo-azul de la luz. El equipo mide estos tres parámetros para la muestra estándar, la cual es el polímero virgen o polímero sin procesar, y después se miden para la muestra reprocesadas. Con esta información, el programa calcula los cambios en estos parámetros obteniendo ΔL , Δa y Δb respecto a la muestra de referencia. A partir de estos parámetros se cuantifica el cambio de color (ΔE) de las muestras por medio de la siguiente ecuación [7] [13]:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L)^2 + (\Delta a)^2 + (\Delta b)^2} \quad (1)$$

Donde ΔL es el cambio en el índice de luminancia, Δa es el cambio en a , y Δb es el cambio en b , respecto a la muestra de referencia. Esta ecuación es conocida como ecuación empírica de Hunter-Scotfield, la cual es considerada como una ecuación de distancia euclidiana [15]. Para el análisis de resultados se considera que un incremento en L , la muestra ha aumentado su luminosidad (varía desde cero para el negro y 100 para el blanco), un valor positivo de Δa significa que el color de la muestra experimentó un cambio hacia el rojo y un valor negativo, hacia el verde (varía desde -80 a +100). Mientras que un valor positivo de Δb significa que el color de la muestra experimentó un cambio hacia el amarillo y un valor negativo, un cambio hacia el azul (varía desde -50 a +70) [15].

Con la determinación del cambio de color se busca validar el análisis de cambio de color, como herramienta confiable y rápida, para establecer cuantitativamente la degradación térmica de polímeros. Para ellos se analiza el efecto del número de reprocesamientos (para todos los polímeros), el efecto de la velocidad de giro del husillo en extrusión (HDPE a 20 y 80 rpm), el efecto del grado del polímero (HDPE grado inyección y grado extrusión procesados en la extrusora), el efecto del tipo de procesamiento (HDPE-GI en inyección, extrusión y extrusión/inyección sucesivos), y el efecto del tipo de polímero (para todos los polímeros en extrusión).

3. Resultados y discusión de resultados

La técnica de análisis de cambio de color fue evaluada para establecer semi-cuantitativamente la degradación térmica de polímeros termoplásticos. Esta evaluación se realizó mediante el análisis del efecto del número de reprocesamientos (de cero a cinco ciclos), la velocidad de giro del husillo en extrusión (20 y 80 rpm), el grado del polímero (grados inyección y extrusión), el tipo de procesamiento (extrusión, inyección y extrusión/inyección) y el tipo de polímero (LDPE, PMMA, PP, PS y PLA).

3.1. Caracterización de los polímeros

Las características de temperatura de transición vítrea, de fusión, de cristalización, grado y estructura molecular y el índice de fluidez (IF) del polímero se presentan en la tabla II para los siete polímeros estudiados. En esta tabla se observa que el PC, PS y PMMA son polímeros amorfos (A), por lo tanto, no reportan la temperatura de cristalización, mientras que los otros materiales son semicristalinos (SC). Además, los polímeros HDPE, PC, PS y PP, son grado inyección (GI), el HDPE y PLA son grado extrusión (GE), mientras que el LDPE y el PMMA

Tabla II. Caracterización general de los polímeros.

Parámetro	HDPE	HDPE	LDPE	PLA	PS	PMMA	PP
Temp. de transición vítrea, °C	-113	-111	-105	63	98	100	-25
Temp. de ablandamiento, °C	129	131	112	210	—	102	172
Temp. de cristalización, °C	113	118	98.3	—	—	—	118
Grado del polímero	GI	GE	IE	GE	GI	EI	GI
Grado de Cristalinidad	SC	SC	SC	SC	A	A	SC
Índice de Fluidez, g/10 min	37	0.38	2	6	6	16	2.5

son grado extrusión/inyección (EI). También se aprecia que el HDPE grado I y el PC reportan el menor y mayor valor de la temperatura de transición vítrea, respectivamente. En cuanto a la temperatura de fusión, el PMMA tiene en menor valor y el PC el mayor valor de este parámetro. Mientras que el IF es mayor en el HDPE-GI y menor en el HDPE – GE. Los resultados presentados en la tabla II son similares a los reportados por otros autores [16] [17] [18].

3.2. Efecto del número de reprocesamientos

La figura 1 muestra el cambio de color que sufre el PLA al ser reprocesado por inyección. Aquí se observa que la muestra pasa de un color blanco transparente a un color amarillo opaco, indicando visualmente que el polímero sufre degradación térmica debido al proceso de inyección. Similares resultados de cambio de color se encontraron para el PLA, el cual experimentó varios procesos de transformación consecutivos [17]. Los resultados de la figura 1 se confirman con los datos presentados en la tabla III, donde se muestran los valores del análisis de cambio de color obtenido por medio de la ecuación empírica de Hunter-Scotfield. En esta tabla se puede ver que el cambio en el factor de luminancia L disminuye, mientras que en el índice de saturación al rojo Δa , en el índice de saturación al amarillo Δb y en el cambio de color ΔE , aumentan con el número de reprocesamientos.

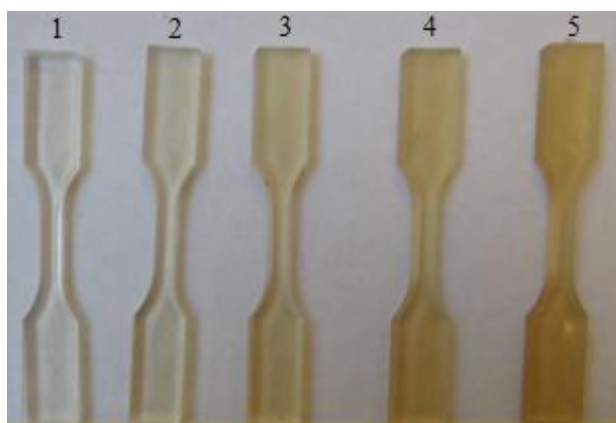


Figura 1. Cambio de color en muestras de PLA obtenidas en el proceso de inyección.

Tabla III. Cambio del calor durante el reprocesamiento de PLA en inyección.

Ciclo	ΔL	Δa	Δb	ΔE
0	0	0	0	0
1	-2.1	0.23	1.46	2.57
2	-3.01	0.34	3.01	4.27
3	-3.56	0.53	4.35	5.65
4	-3.96	0.86	5.21	6.60
5	-4.57	0.98	4.93	6.79

La reducción del factor de luminancia indica que la muestra al ser reprocesada reduce su luminosidad y aumenta su opacidad, mientras que el aumento con valores positivos en el índice de saturación Δb indica que la muestras cada vez tiende a tomar una tonalidad amarilla, lo cual es comprobado con los resultados visuales que se presentan en la figura 1. También se observa que la variación del índice de saturación al rojo es mínima, por lo que no se aprecian cambios hacia tonalidades del rojo, debido a los valores positivos registrados por la muestra. Este resultado indica que efectivamente la muestra experimenta degradación térmica, la cual es cuantificable mediante la técnica colorimétrica de análisis de cambio de color. Similares resultados se encontraron en los otros polímeros evaluados, cuando se reprocesaron en cualquiera de los tres procesos aquí analizados. Además, concuerdan con información disponible en la literatura de cambio de color para el PP [1], HDPE y LDPE [4], PS [7] y PLA [17], en la que el cambio de color ocurre a medida que aumentan los reprocesamientos de los polímeros.

3.3. Efecto de la velocidad de giro del husillo en extrusión

Para evaluar el efecto de la velocidad de giro del husillo en extrusión se empleó el HDPE-GE. En la figura 2 se aprecia la variación del cambio de color al procesar por extrusión el HDPE-GE a velocidades del husillo de 20 y 80 rpm. En la figura se observa que hay mayor variación en el color al procesar HDPE-GE a una velocidad 20 rpm. Esto es de esperarse porque a 20 rpm el polímero tiene un mayor tiempo de residencia en la extrusora, por lo tanto, va a experimentar una mayor degradación que cuando el polímero se procesa a 80 rpm. Esto está de acuerdo con lo reportado por Wilichowski en su trabajo de maestría [16]. También se aprecia que la variación en el color entre estas dos velocidades, se incrementa cuando la muestra experimenta un mayor número de reprocesamientos. Con el propósito de comparar resultados entre los polímeros, entre los procesos y que se tenga una apreciable variación en la degradación, se optó por evaluar los demás efectos a una velocidad del husillo en la extrusora de 30 rpm, y se estableció que esta velocidad sea equivalente a la velocidad del husillo de la inyectora.

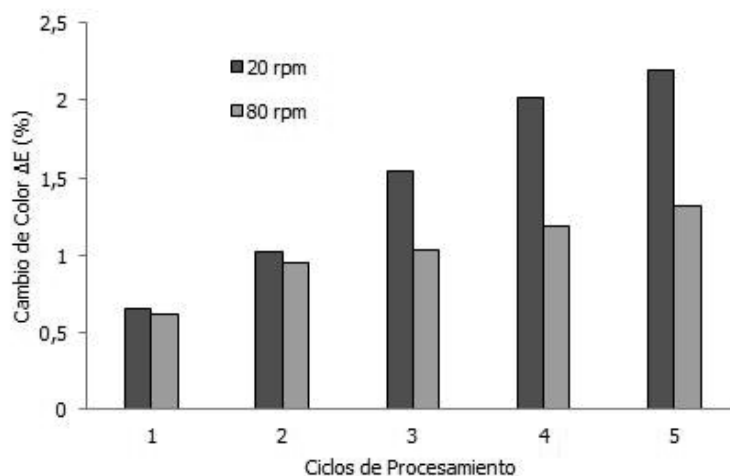


Figura 2. Comparación del cambio de color al procesar polietileno de alta densidad grado extrusión en extrusión a 20 y 80 rpm.

3.4. Efecto del grado del polímero

El efecto del grado del polímero se estudió empleando el HDPE grado extrusión y grado inyección. La figura 3 presenta la variación del cambio de color del HDPE grado extrusión y grado inyección procesado en una extrusora monohusillo a 30 rpm. Al comparar estos dos polímeros se observa que, a pesar de tener grandes diferencias en el IF, lo cual tiene que ver con la distribución de pesos moleculares, no hay variaciones apreciables en la degradación térmica determinada por el cambio de color de las muestras. Es importante anotar que este comportamiento solo se analizó para el HDPE, por lo cual no se generaliza para los demás polímeros, debido a las diferencias en los valores del IF, el cual se encuentra relacionado con la estructura química de los polímeros, que podrían afectar la degradación térmica [16].

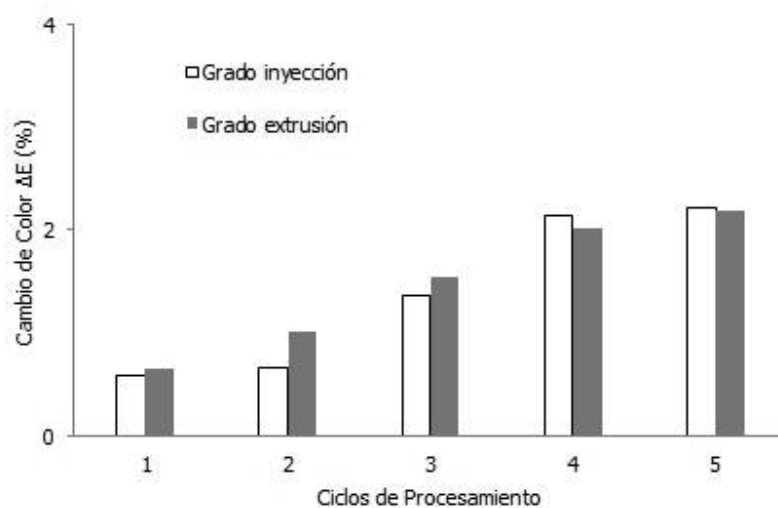


Figura 3. Polietileno de alta densidad grado inyección y grado extrusión procesado por extrusión a 30 rpm.

3.5. Efecto del tipo de procesamiento

En la figura 4 se muestra el cambio de color al procesar HDPE-GI en extrusión, inyección y extrusión/inyección. En esta figura se observa que la variación del color aumenta con el número de ciclos de procesamiento, lo cual indica que el polímero sufre degradación térmica sin importar el proceso al que se someta. Similares resultados han sido reportados por Remili *et al.* para el polietileno [7]. Al comparar la variación de color en los tres procesos evaluados, se observa que hay una mayor variación en las muestras inyectadas. Esto indica que en el proceso de inyección el polímero sufre una mayor degradación térmica comparada con la degradación sufrida en los otros dos procesos. Lo cual concuerda con resultados reportados en la literatura para el PLA [17].

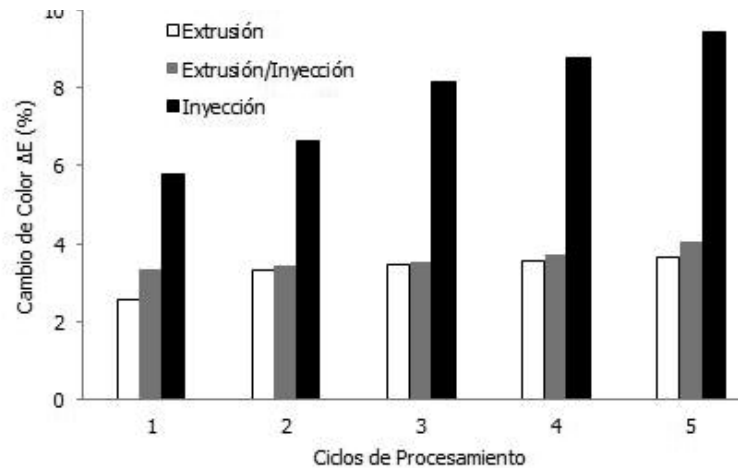


Figura 4. Comparación del cambio de color al procesar HDPE - GI en extrusión, extrusión/inyección e inyección.

Sin embargo, la conclusión reportada por Carrasco *et al.*, donde se expresa que el valor del cambio de color en una muestra extruida y posteriormente inyectada (extrusión/inyección) debería ser cercano a la suma del efecto de la degradación experimentada por el polímero en extrusión e inyección por separado, no se debe tomar a la ligera [17]. Dado que esto no se cumple para el HDPE-GI, por el contrario los valores del cambio de color en el proceso de extrusión/inyección, son similares a los encontrados cuando el polímero experimenta solamente el proceso de extrusión. Por lo tanto, se puede concluir que si un polímero experimenta un proceso de extrusión seguido por un proceso de inyección, la degradación causada en el primer proceso puede reducir el efecto de la degradación provocado por el segundo proceso, o este último puede revertir el efecto de degradación causado por el primer proceso. Este comportamiento también se puede explicar considerando que cada polímero puede experimentar diferentes mecanismos de degradación de acuerdo al proceso al que es sometido.

3.6. Efecto del tipo de polímero

Para evaluar el efecto del tipo de polímero se reprocesaron cinco veces por extrusión a 30 rpm, los polímeros LDPE, PMMA, PP, PS y PLA. Los resultados del cambio de color para estos polímeros se muestran en la figura 5. En esta figura se confirma lo que anteriormente se había mencionada, respecto a que la degradación térmica aumenta con el número de reprocesamiento. También se observa que cada polímero experimenta una magnitud de degradación diferente, lo cual se debe al tipo de mecanismo de degradación y a la naturaleza química de cada polímero. El orden de menor a mayor degradación térmica experimentada en extrusión es: LDPE < PMMA < PP < PS < PLA, lo cual establece que de estos cinco polímeros, el LDPE es el polímero de mayor estabilidad térmica y el PLA el de menor estabilidad térmica al ser sometidos al proceso de extrusión. Esto confirma los resultados obtenidos con los mismos polímeros, pero en un estudio diferente en el que se utiliza el Índice de Degradación en Proceso (IDP), el cual es función de la variación del índice de fluidez en cada reprocesamiento, como parámetro de medida de la degradación o estabilidad térmicas de polímeros [19].

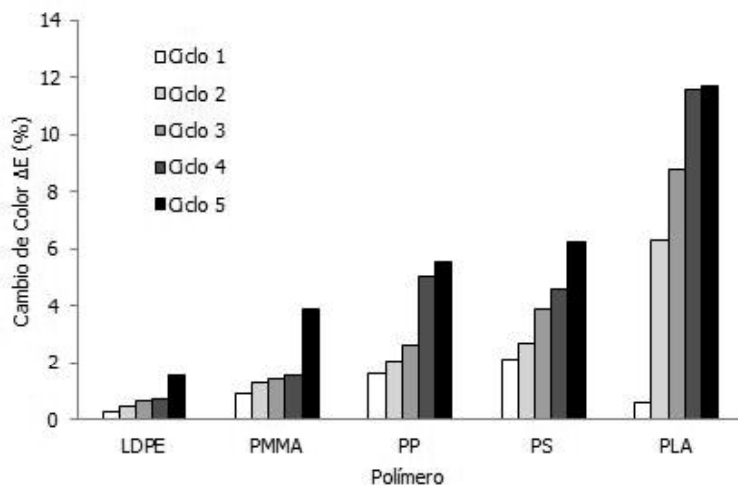


Figura 5. Cambio de color para cinco polímeros reprocesados por extrusión.

4. Conclusiones

Se encontró que el cambio de color establecido por medio de la ecuación empírica de Hunter-Scotfield, aunque no es un parámetro cuantitativo del avance de la degradación térmica en muestras reprocesadas, proporciona una idea semi-cuantitativa del desarrollo de la degradación térmica de un polímero al ser procesado en múltiples ciclos y procesos.

De igual manera, el análisis de cambio de color también puede ser empleado como parámetro semi-cuantitativo para determinar la estabilidad térmica de polímeros en cualquier proceso al que se someta. En el proceso de extrusión que experimentaron los polímeros aquí estudiados, se encontró que el orden de menor a mayor estabilidad térmica es: LDPE > PMMA > PP > PS > PLA.

Por otra parte, el número de ciclos de procesamiento, la velocidad de giro del husillo en extrusión, el grado y tipo de polímero y el tipo de reprocesamiento, son parámetros que afectan directamente la degradación térmica, la cual se puede establecer por un simple análisis de cambio de color como técnica de control de calidad del producto.

Sin embargo, los resultados aquí obtenidos se deben apoyar y correlacionar en la variación de las propiedades térmicas de dichos materiales. Esto con el propósito de tener una mejor referencia de cuan efectivo es el análisis de color para establecer la degradación o estabilidad térmica de un polímero reprocesado.

Finalmente, el uso de un colorímetro en línea, acoplado a un sistema automático que se alimente de los resultados del análisis óptico, se recomienda como una herramienta promisoría en diferentes procesos a nivel industrial, para establecer la degradación o estabilidad térmica de materiales poliméricos que experimentan repetidos reprocesamientos.

Referencias

- [1] Josiane da R. Silvano, Sabrina A. Rodrigues, Juliano Marini, Rosario E. S. Bretas, Sebastiao V. Canevarolo, Benjamim de M. Carvalho y Luís A. Pinheiro, "Effect of reprocessing and clay concentration on the degradation of polypropylene/montmorillonite nanocomposites during twin screw extrusion", *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 98, Número 3, 2013, pp. 801-808.
- [2] K. Jitendra Pondey, K. Ragunatha Reddy, A. Pratheep Kumar A y R. P. Singh, "An overview on the degradability of polymer nanocomposites", *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 85, Número 2, 2005, pp. 234-250.
- [3] Naima Touati, Mustapha Kaci, Stéphane Bruzard y Yves Grohens, "The effects of reprocessing cycles on the structure and properties of isotactic polypropylene/cloisite 15A nanocomposites", *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 96, Número 6, 2011, pp. 1064-1073.
- [4] A. Mendes, A. M. Cunha y C. A. Bernardo, "Study of the degradation mechanisms of polyethylene during reprocessing", *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 96, Número 6, 2011, pp. 1125-1133.
- [5] Tim Osswald, *Understanding Polymer Processing: Processes and Governing Equations*. Herser Editorial, Alemania, 2011, pp. 71-163.
- [6] Letícia Sausen Hamester, Pablo Andrés Riveros y Sebastiao Vicente Canevarolo, "A new device for in-line colorimetric quantification of polypropylene degradation under multiple extrusions", *Polymer Testing*, Volumen 41, 2015, pp. 117-123.
- [7] Chéfira Remili, Mustapha Kaci, Aida Benhamidam, Stéphane Bruzard y Yves Grohens, "The effects of reprocessing cycles on the structure and properties of polystyrene/Coisite15A nanocomposites", *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 96, Número 8, 2011, pp. 1489-1496.
- [8] M. Hamskog, M. Klugel, D. Forsstrom, B. Terselius y P. Gijsman. "The effect of base stabilization on the recyclability of polypropylene as studied by multicell imaging chemiluminescence and microcalorimetry", *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 86, Número 3, 2004, pp. 557-566.
- [9] James S. Fabiyi y Armando G. McDonald, "Effect of wood species on property and weathering performance of wood plastic composites", *Composites: Part A*, Volumen 41, Número 10, 2010, pp. 1434-1440.
- [10] K. C. Reis y S. V. Canevarolo, "Evaluation of the structure of polypropylene/montmorillonite nanocomposite by in-line light extinction and color measurements during multiple extrusions", *Polymer Engineering & Science*, Volumen 52, Número 8, 2012, pp. 1784-1794.
- [11] Izaro Goitisoló, José I. Eguiazábal y Jon Nazábal, "Effect of reprocessing on the structure and properties of polyamide 6 nanocomposites", *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 93, Número 10, 2008, pp. 1747-1752.
- [12] E. K. Karahaliou y P. A. Tarantili, "Preparation of Poly(Acrylonitrile-Butadiene-Styrene)/Montmorillonite nanocomposites and degradation studies during extrusion reprocessing", *Journal of Applied Polymer Science*, Volumen 113, Número 4, 2009, pp. 2271-2281.
- [13] C. Sánchez, M. Hortal, C. Aliaga, A. Devis y V.A. Cloquell-Ballester, "Recyclability assessment of nano-reinforced plastic packaging", *Waste Management*, Volumen 34, Número 12, 2014, pp. 2647-2655.
- [14] William F. Smith y Javad Hashemi, *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales*. McGraw Hill, cuarta edición, México, 2006.
- [15] James S. Fabiyi, Armando G. McDonald, Michael P. Wolcott y Peter R. Griffiths, "Wood plastic composites weathering: Visual appearance and chemical changes", *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 93, Número 8, 2008, pp. 1405-1414.
- [16] Paul A. Wilichowski, "Comparison of the effect of smooth and grooved feed extrusion on HDPE recyclability", disertación tesis de maestría – Master of Science – en Ingeniería Mecánica, Universidad de Wisconsin, USA, 2004.
- [17] F. Carrasco, P. Pagés, J. Gámez-Pérez, O. O. Santana, y M. L. Maspoch, "Processing of poly (lactic acid): Characterization of chemical structure, thermal stability and mechanical properties", *Polymer Degradation and stability*, Volumen 95, Número 2, 2010, pp. 116-125.

- [18] Tim Osswald, G. Menges, J. Flórez, y L. Flórez, *Ciencia de polímeros para ingenieros*. Editorial Guaduales, Colombia, 2010, pp. 586-596.
- [19] A.F. Rojas, y L.M. Aranzazu, “Estabilidad de procesamiento de polímeros: índice de degradación en proceso”, *Revista Mutis*, Volumen 5, Número 1, enero-junio 2015, pp. 37-45.

Andrés Felipe Rojas González

Ingeniero, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia; magíster en Ingeniería Química en la Universidad del Valle; doctor en Ingeniería, énfasis Ingeniería Química, en la Universidad del Valle.

Se desempeñó como Profesor Ocasional en la Universidad del Valle durante 1 año. El proyecto fue ejecutado en la Universidad de Wisconsin, Madison, USA, durante una pasantía de investigación de 6 meses en el grupo de polímeros Polymer Engineering Center de la Universidad de Wisconsin-Madison-USA.

profesor asociado en dedicación exclusiva en el área de térmicas en la Universidad Nacional de Colombia; hace parte de los grupos de investigación de Ciencia y Tecnología del Carbón de la Universidad del Valle, del Grupo de Investigación en Aprovechamiento de Residuos de la Universidad Nacional sede Manizales y del Grupo de Investigación en Prospectiva Ambiental de la Universidad Nacional de la Sede Palmira; director del Grupo de Investigación en Aprovechamiento de Residuos-GIAR, donde realiza estudios sobre Valorización de Residuos. Este artículo surge como iniciativa de poder establecer una técnica fácil y rápida, como el análisis de cambio de color, para establecer la degradación térmica de polímeros reciclados en proceso.

Contacto: anfrojasgo@unal.edu.co

Tim Osswald

Profesor de Ingeniería Mecánica y director del Polymer Engineering Center de la Universidad de Wisconsin-Madison, USA; B.S. y M.S. en Ingeniería Mecánica de la Escuela de Minas y Tecnología de South Dakota; Ph.D. en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign en el área de procesamiento de polímeros; pasó dos años y medio en el Instituto para el Procesamiento de Polímeros de la Universidad Técnica de Aachen en Alemania como académico de la Sociedad Alexander Von Humboldt.

Actualmente se desempeña como Assistant Professor en la Universidad de Wisconsin. Recibió el Premio Presidencial de Investigadores Jóvenes de la Fundación Nacional de Ciencias de los Estados Unidos (año de 1991) y fue el primer académico en recibir el Premio Dr. Richard Escales de la Organización de Ingenieros Alemanes – Sección Polímeros, por sus esfuerzos y contribuciones en globalizar y modernizar la educación en el área de tecnología de plásticos (año de 2001).

En el 2006 fue nombrado Profesor Honorífico de la Universidad de Erlangen-Nuremberg, y en el 2011 fue nombrado Profesor Honorífico de la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá. El profesor Osswald enseña cursos e investiga en el área de procesamiento de polímeros y diseño con polímeros. Ha publicado más de 200 artículos científicos, y los libros *Materials Science of Polymers for Engineers* (Hanser, 1996, 2003), *Polymer Processing Fundamentals* (Hanser 1998), *Injection Molding Handbook* (Hanser, 2001) *Compression Molding* (Hanser, 2003), *Polymer Processing Modeling and Simulation* (Hanser 2006), *International Plastics Handbook* (Hanser 2006) y *Understanding Polymer Processing* (Hanser 2010) y *Polymer Rheology* (Hanser 2015).

El Profesor Osswald también es el editor de la serie *Plastics Pocket Power* (Hanser, 2001) y co-fundador del Madison Group, una compañía consultora en el área de plásticos. En adición, se ha desempeñado como consultor de docenas de compañías multinacionales, y es el Director de la Junta Técnica de varias compañías.

Contacto: tosswald@wisc.edu

Clasificación Automática de Formas Patológicas de Eritrocitos Humanos

Automatic Classification of Pathological Shapes in Human Erythrocytes

Marcela Mejía F.¹, Marco A. Alzate M.²

¹ Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Angela.mejia@unimilitar.edu.co

² Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, malzate@udistrital.edu.co

Received: 27/05/2015. Modified: 31/08/2015. Accepted: 16/10/2015

Resumen

Contexto: La clasificación de variaciones morfológicas de eritrocitos suele hacerse mediante la observación directa desde el microscopio por parte de un experto, con base en criterios cualitativos, lo cual conduce a diagnósticos subjetivos. Las propuestas para automatizar este proceso suelen clasificar los eritrocitos en normales o anormales, sin especificar el tipo de anomalía que indique la presencia de alguna enfermedad. Desarrollamos una herramienta para apoyo diagnóstico que determina distintas formas patológicas de eritrocitos mediante características medidas desde la imagen microscópica.

Método: Detectamos los eritrocitos aislados usando procesos de segmentación por color y medimos algunas características discriminantes en cada célula detectada, incluyendo una medida novedosa de palidez central. Estas características se usan como entrada a una red neuronal que etiqueta la célula de acuerdo con siete tipos de anomalía.

Resultados: El sistema resultante alcanza una alta tasa de aciertos (97,3%) en comparación con los resultados de clasificación binaria encontrados en la literatura. La medida de palidez central es altamente discriminante, pues permite distinguir perfectamente los esferocitos de los normocitos, cuando otras características morfológicas son muy semejantes entre ellos.

Conclusiones: Nuestra contribución incluye la clasificación de múltiples clases de eritrocitos y la propuesta de una medida de palidez central altamente discriminante. Se verificó la utilidad de combinar técnicas de pre-procesamiento para extracción de características con redes neuronales para clasificación en el espacio de características. Para el trabajo futuro sería deseable disponer de un mayor número de imágenes con muestras estadísticamente significativas de otros tipos de eritrocitos para verificar las bondades de la metodología propuesta para un mayor número de tipos de células. Así mismo, con un mayor número de muestras clasificadas se podrían estudiar otras técnicas de clasificación de patrones para evaluar, comparar y seleccionar la más adecuada.

Palabras clave: glóbulos rojos, frotis de sangre periférica, procesamiento de imágenes médicas.

Open access



Citación: Mejía, M. y Alzate, M. A. (2016). Clasificación automática de formas patológicas de eritrocitos humanos. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 31-48

© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a03>

Abstract

Context: Classification of erythrocyte morphological changes is usually done by an expert through direct observation from the microscope based on qualitative criteria, leading to subjective diagnosis. Proposals to automate this process usually classified erythrocytes in normal or abnormal, without specifying the type of abnormality that indicates the presence of some disease. We develop a tool for diagnostic support that determines different pathological forms of erythrocytes using characteristics measured from the microscopic image.

Method: We detect isolated erythrocytes using a segmentation processes based on color. Then we measure some differentiating features in each cell, including a new measure of central pallor. These features are presented to a neural network that labels the cell according to seven types of abnormality.

Results: The resulting system achieves a high success rate (97.3%) compared to binary classifications found in the literature. The measure of central pallor is highly discriminant because it allows a perfect distinction between normocytes and spherocytes, when other morphological characteristics are very similar between them.

Conclusions: Our contribution includes the classification of multiple types of erythrocytes and the proposal of a highly discriminating measure of the central pallor. We verified the usefulness of combining pre-processing techniques for extracting features and neural networks for classification in feature space. For future work, it would be desirable to have a greater number of images with statistically significant samples of other types of erythrocytes to verify the goodness of the proposed methodology to classify more cell types. Also, with a greater number of classified samples, different pattern classification techniques could be studied in order to evaluate, compare and select the most appropriate technique.

Keywords: medical image processing, peripheral blood smear, red blood cells.

1. Introducción

El frotis de sangre periférica es un examen para el diagnóstico hematológico que conduce a imágenes microscópicas, en las que se encuentran tres tipos de células en un individuo normal: leucocitos, eritrocitos y plaquetas. Los eritrocitos representan alrededor del 45% del volumen de la sangre y la variación en su forma, tamaño y textura puede estar asociada a la presencia de diversas enfermedades [1]. Bajo el microscopio, los eritrocitos normales (normocitos) se pueden observar como estructuras altamente circulares cuyo diámetro oscila entre 7 y 9 μm , con una palidez central que refleja su forma de disco bicóncavo. Cualquier variación en estas características debe considerarse anormal, pues podría indicar la existencia de algún tipo de patología, que puede ir desde úlcera péptica y deficiencias patológicas y renales, hasta diferentes tipos de cáncer, entre muchas otras [2]. Por esta razón, los expertos basan el diagnóstico hematológico en distintos aspectos morfológicos de los eritrocitos [3].

Normalmente, la clasificación de las variaciones morfológicas de los eritrocitos se hace de manera rutinaria mediante la evaluación del experto a través de la observación directa desde el microscopio, con base en criterios puramente cualitativos, lo cual implica altos grados de dificultad y subjetividad y, en consecuencia, variaciones en el diagnóstico [3][4][5]. Por esta razón, cobra gran importancia el desarrollo de herramientas de software para clasificación automática de eritrocitos que agilicen el proceso y hagan más objetivos los diagnósticos del experto, pues podrían convertirse en una ayuda diagnóstica que disminuya las dificultades mencionadas. La motivación y la justificación para el presente trabajo se enmarcan dentro de esta sentida necesidad de herramientas automatizadas de clasificación de variaciones morfológicas de eritrocitos para ayuda diagnóstica.

Se han propuesto diferentes algoritmos para la separación de los leucocitos y los eritrocitos, así como su respectiva clasificación en normales o anormales, dependiendo de algunas características morfológicas de las células, incluyendo el análisis del núcleo para el caso de los leucocitos. En [6] se presenta un sistema automático para la clasificación de eritrocitos de acuerdo con su estado de infección con el parásito de la malaria, llegando a identificar el estado

de evolución del parásito en los glóbulos rojos infectados. El sistema utiliza la técnica de Otsu para segmentar los eritrocitos a partir de las imágenes preprocesadas. Posteriormente usa un clasificador binario basado en una máquina de soporte vectorial (SVM por *Support Vector Machine*) para identificar los eritrocitos infectados de acuerdo con las características de color y forma. El clasificador binario alcanzó una sensibilidad del 96.26% y una especificidad del 99.09%. Finalmente, un multclasificador SVM determina el estado de evolución del parásito en las células infectadas, logrando una precisión del 96.42%. En [7] se propone la clasificación de los eritrocitos en normales o anormales utilizando una red neuronal híbrida que utiliza la información visual extraída de las imágenes del frotis de sangre. Para la clasificación utilizan las propiedades características de forma y textura de los eritrocitos. La red neuronal propuesta clasificó como anormales los glóbulos rojos con una precisión del 88,25%. En [8] se muestra un sistema para automatizar el proceso de detección e identificación de los glóbulos rojos. El método propuesto clasifica los glóbulos rojos como normales o anormales con una precisión del 83%. Para esto, los eritrocitos se extraen de la imagen utilizando el método de umbral global sobre el canal verde de la imagen, posteriormente se aplica un filtro morfológico y, finalmente, basados en propiedades geométricas, se clasifican los eritrocitos utilizando una red neuronal artificial. En [9] se clasifican los eritrocitos en tres clases: (1) normales, (2) elongados y (3) otras deformaciones. Los autores usan una función de conjuntos de nivel para la segmentación de cada imagen, el método de los dos vecinos más cercanos para la clasificación supervisada y la distancia euclidiana para determinar la semejanza de los objetos, alcanzando una efectividad del 95,08%. En [5] utilizan unas métricas obtenidas mediante un programa estándar de procesamiento de imágenes microscópicas celulares (NIH Scion Image) para ajustar los parámetros de un discriminador lineal de siete tipos de eritrocitos; sorprendentemente alcanzan hasta un 70% de aciertos con este método simple. En [10] se presenta una revisión muy detallada de las diferentes propuestas reportadas en la literatura sobre los métodos de segmentación, extracción de características y clasificación de glóbulos blancos o leucocitos.

En este trabajo proponemos el análisis de imágenes microscópicas de frotis de sangre periférica humana para identificar características morfológicas de los eritrocitos contenidos en la imagen, de manera que se puedan clasificar dentro de alguna de las anormalidades más comunes. Dado que dichas anormalidades están relacionadas con la presencia de diversas enfermedades, obtuvimos una herramienta de clasificación que ofrece al médico elementos de juicio y criterios objetivos para reducir la naturaleza subjetiva del diagnóstico. Como plataforma de computación científica para el desarrollo de la herramienta, usamos Matlab® [11]. De acuerdo con la justificación y la motivación que se mencionaron antes, la importancia de este trabajo radica precisamente en la combinación de herramientas de procesamiento de imágenes y técnicas de inteligencia computacional, para determinar métricas discriminantes y usarlas en la clasificación de algunos tipos de células que pueden ser indicadores de diferentes enfermedades.

2. Clases de eritrocitos

El eritrocito o glóbulo rojo es una célula altamente especializada del cuerpo humano, cuya función principal es el transporte de oxígeno a todas las células del cuerpo y la remoción del dióxido de carbono producto de la oxidación celular. El eritrocito normal, o normocito, es un disco ovalado y bicóncavo que carece de núcleo y de la mayoría de organelos, tiene un diámetro entre 7 y 9 μm con una región pálida central de no más de 3 μm de diámetro, y tiene una apariencia rojo-naranja bajo el tinte de Wright [2][3]. Esta forma básica se ve alterada bajo

algunas condiciones patológicas particulares, como se muestra en la figura 1. La detección de tales alteraciones morfológicas es de gran importancia en aplicaciones clínicas, pues pueden indicar presencia de patologías que incluyen trastornos hereditarios, deficiencias hepáticas o renales, diferentes tipos de anemias y hasta distintas formas de cáncer, por ejemplo [1][2].

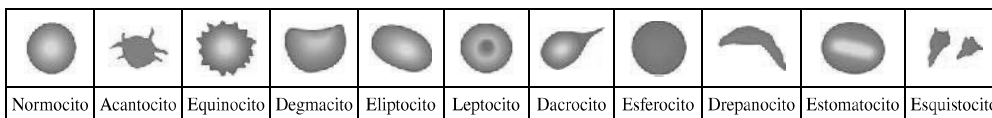


Figura 1. Tipos de Eritrocitos [12].

El acantocito, por ejemplo, presenta proyecciones gruesas espaciadas de manera irregular, mientras el equinocito presenta proyecciones más pequeñas y espaciadas regularmente. En el degmacito se pierde una porción semicircular del borde de la célula. El eliptocito es un óvalo más alargado, por lo que también se conoce como ovalocito o célula cigarro. El leptocito (o codocito) tiene un área central de tinte intenso rodeada por un anillo pálido y, posteriormente, por otro anillo intenso en el borde de la célula, de donde surgen los nombres sugestivos de sombrero mejicano o célula de tiro al blanco. El dacrocito tiene una elongación puntada, por lo que se conoce también como célula lágrima. El esferocito es excesivamente redondo y carece de la región pálida central. El drepanocito (o célula hoz) tiene forma de cuarto-creciente. El estomatocito tiene una palidez central ovalada o rectangular (en forma de boca) debido a la pérdida de concavidad en uno de sus lados. El esquistocito tiene una forma irregular fragmentada y dentada con dos puntos extremos y sin la región central pálida. También pueden existir aglomeraciones de eritrocitos indistinguibles y rollos (*rouleaux* –grupos de eritrocitos superpuestos, como pilas de monedas) [1] [2]. Cada una de estas modificaciones en la morfología del eritrocito es indicación de diferentes tipos de patologías y, por esta razón, su detección es de gran importancia clínica [12].

En una imagen de frotis de sangre periférica también hay leucocitos y trombocitos además de eritrocitos. Los leucocitos (neutrófilos, linfocitos T ó B, monocitos macrófagos, eosinófilos y basófilos) son células nucleadas que varían entre 8 y 14 μm de diámetro y son mucho menos comunes en la sangre (cerca de un leucocito por cada 600 eritrocitos). Por otro lado, los trombocitos o plaquetas son fragmentos de citoplasma de 2 a 3 μm de diámetro, con cerca de un trombocito por cada 20 eritrocitos [2] [3]. En este trabajo solo contemplamos los eritrocitos y sus diferentes alteraciones.

3. Tratamiento de las imágenes

Pasamos las imágenes disponibles por un proceso de segmentación, en el que se detectan eritrocitos aislados, y por un proceso de extracción de características, en el que se toman medidas discriminantes. A continuación describimos estos dos procesos.

3.1. Segmentación

Para esta investigación dispusimos de 23 imágenes en las que se pueden distinguir 351 eritrocitos aislados, 265 de los cuales fueron clasificados por expertos hematólogos (los 86 restantes fueron clasificados dubitativamente y no se usaron en el proceso de entrenamiento). Entre las 265 células clasificadas hay tres tipos que no ocurren (acantocitos, degmacitos y

drepanocitos) y tres tipos que ocurren una sola vez (un leptocito, un reticulosito y un estomatocito). Por esta razón solo usamos 262 células, como muestra la tabla 1.

La mayoría de rollos y aglutinaciones se pueden eliminar mediante el criterio del tamaño. Sin embargo, cuando los rollos están compuestos por dos eritrocitos superpuestos, pueden tener tamaños semejantes a un eritrocito grande, razón por lo cual en la tabla 1 se incluyó el rollo como otro tipo de eritrocito para detectar esta condición.

Tabla 1. Número de cada tipo de células clasificadas en las imágenes disponibles.

Dacrocitos	Eliptocitos	Equinocitos	Esferocitos	Esquistocitos	Normocitos	Rollos
7	36	42	37	20	100	20

Las imágenes, que fueron facilitadas por el doctor Javier Rodríguez [13], se obtuvieron mediante frotis de sangre periférica con coloración de Wright y fotografía microscópica de 2700x3600 píxeles. La figura 2 muestra dos ejemplos de cada tipo de célula en la base de datos.

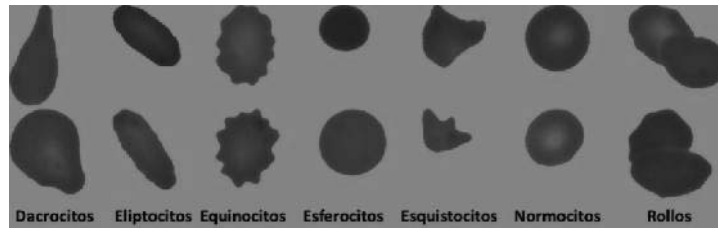


Figura 2. Algunos tipos de eritrocitos en nuestra base de datos.

Para detectar los eritrocitos en la imagen intensificamos el contraste mediante el ajuste del histograma de los niveles de luminancia y, después, hicimos un filtrado tipo mediana para reducir el ruido sin afectar los bordes de los objetos de interés. Para no alterar el color de cada pixel, descompusimos la imagen RGB en sus componentes YIQ, donde Y se refiere a la luminancia de la imagen (una forma de intensidad de gris) mientras I y Q se refieren a la crominancia, con componentes en fase (I) y en cuadratura de fase (Q) [14]. El ajuste del histograma mediante ecualización y filtrado mediana se hizo en la capa Y para obtener una versión ajustada, Y', en la que se mantiene intacta la crominancia IQ. Así pudimos retornar de Y'IQ a R'G'B', obteniendo una versión ecualizada y filtrada de la imagen completa en la que se conserva el color original de cada pixel.

El siguiente paso es la segmentación para distinguir entre las células y el fondo de la imagen. Escogimos el método de Otsu[14] ya que este logra minimizar la varianza dentro de las regiones correspondientes a “célula” y dentro de las regiones correspondientes a “fondo”, al tiempo que maximiza la varianza entre estos dos tipos de regiones. Sin embargo, para aprovechar mejor la información de color, aplicamos el método de Otsu a cada uno de los canales R, G y B, encontrando los niveles de comparación óptimos en cada canal. Posteriormente, integramos nuevamente los tres canales ya segmentados obteniendo una nueva imagen RGB. Los colores blanco y negro corresponden a regiones en la que los tres colores coinciden, las regiones rojas, verdes y azules corresponden a regiones en las que un solo color se activa, y las regiones amarillas, magenta y cian son aquellas en las que dos colores se activan. Sobre la

imagen integrada aplicamos otro filtro mediana antes de hacer la binarización de la imagen, la cual condujo a una primera aproximación a las regiones de célula y de fondo. Para aislar las células individuales, rellenamos los huecos en las regiones conectadas y aplicamos algoritmos morfológicos de apertura y cierre. Así, se separaron las células de objetos vecinos que podrían afectar sus propiedades morfológicas (en especial de trombocitos superpuestos, lo cuales podrían afectar significativamente la clasificación de cada célula). Al calcular el área y el perímetro de las regiones así detectadas, pudimos determinar cuáles de ellas podrían corresponder a eritrocitos y, de esta manera, logramos eliminar la mayoría de trombocitos, leucocitos y formas inmaduras de eritrocitos, así como aglomeraciones o rollos de células.

La figura 3 muestra el resultado de los procesos anteriores en una imagen típica en la que se detectaron 22 eritrocitos aislados. En la parte superior izquierda se observa la imagen original; en la parte superior derecha aparece el resultado del proceso de filtrado y ecualización que, como se puede apreciar, enfatiza significativamente el borde de las células y su estructura interna sin afectar la información de color. En la parte inferior izquierda se observa la salida del proceso de segmentación sobre cada banda R, G y B, después de integrar las tres segmentaciones. En la parte inferior derecha se aprecia el resultado final de la segmentación, en el que las máscaras de las 22 células aisladas que se detectaron se superponen en la imagen original. Los elementos que tocan el borde han sido eliminados por considerarse incompletos.

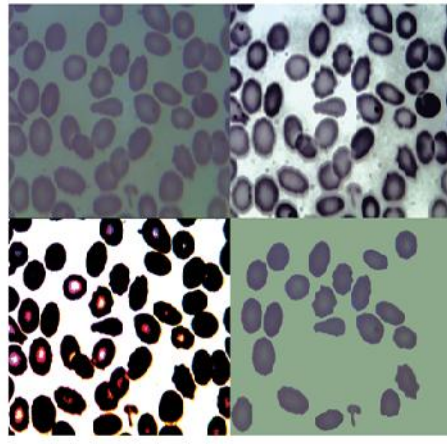


Figura 3. (a) Imagen original con 22 eritrocitos aislados (b) Filtrado, (c) ecualización y (d) segmentación.

3.2. Extracción de características

Después de haber detectado los eritrocitos aislados y completos en la imagen, se extraen algunas características que podrían usarse como discriminantes para la clasificación de los distintos tipos de eritrocito presentes en la imagen. En particular consideramos siete medidas que, en principio, ayudarían a discriminar entre las diferentes anomalías de los eritrocitos. Las primeras cinco medidas son el perímetro, el área, la excentricidad, la solidez y la circularidad, las cuales se refieren a la forma de la célula. Las siguientes dos medidas, que se refieren a la textura de la célula, son la palidez central y la dimensión *box-counting* de la superficie de la célula. Se tuvieron en cuenta otras medidas como la media y la varianza de los niveles de gris,

no obstante, de acuerdo con el procedimiento de análisis descrito en la sección 4.1, resultaron irrelevantes para el proceso de clasificación. A continuación describimos las medidas seleccionadas.

El perímetro es el número de píxeles en el borde de la célula, mientras que el área incluye también los píxeles dentro de ella [14]. Estos dos números, por sí mismos, hablan del tamaño de la célula, mientras que las relaciones entre ellos hablan de la forma de la célula. El criterio del tamaño es muy útil para distinguir los eritrocitos de los linfocitos y los trombocitos, así como para detectar la mayoría de rollos y aglutinaciones. Sin embargo, como mencionamos antes, cuando los rollos están compuestos por dos eritrocitos superpuestos pueden tener tamaños semejantes a un eritrocito grande, por lo cual incluimos el eritrocito tipo rollo para detectar esta condición. Una vez detectados los eritrocitos, se puede identificar el tipo particular al que pertenece cada uno, de acuerdo con las medidas descritas a continuación.

La excentricidad se obtiene construyendo una elipse que tenga los mismos segundos momentos de la célula y calculando la razón entre la distancia inter-focal de la elipse y la longitud de su eje mayor, como muestra la figura 4 [14]. La excentricidad de un círculo es cero y la excentricidad de un segmento de línea recta es uno, de manera que entre mayor sea la elongación de la célula, mayor será su excentricidad.

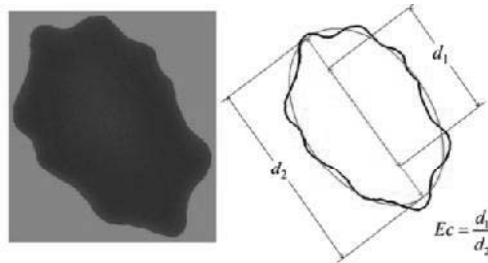


Figura 4. Cálculo de la excentricidad.

La solidez es la razón entre el área de la célula y el área de su casco convexo, donde el casco convexo de una célula es el polígono convexo de área mínima que la contiene [14]. Cuando la solidez toma el valor uno es porque la célula es convexa, mientras que si la solidez toma un valor cercano a cero se trata de una célula compuesta por una curva en el plano. La figura 5 muestra el concepto de solidez y su cálculo.

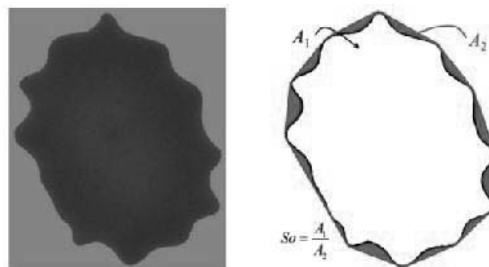


Figura 5. Cálculo de la solidez.

La circularidad es la relación entre el área de la célula y el cuadrado de su perímetro normalizada con respecto a $1/4\pi$, de manera que la circularidad de un círculo es 1 [14]. La figura 6 muestra la comparación entre dos células y los correspondientes círculos que tienen el mismo centroide y la misma área. El normocito de la izquierda tiene un perímetro pequeño en comparación con su área y por eso su circularidad es alta. El equinocito de la derecha, en cambio, tiene un perímetro grande en comparación con su área, por lo que su circularidad es baja. Aunque pareciera que la solidez y la circularidad son altamente redundantes para la clasificación de eritrocitos, nótese que una figura cuadrada tiene solidez igual a 1, pero una circularidad de solo $\pi/4$, de manera que sí hay algunos atributos representados de manera diferente en cada medida.

Para caracterizar la textura usamos la dimensión *box counting* de la superficie de la célula [15] y una medida de la palidez central. Para calcular la dimensión *box counting* consideramos la imagen como una superficie en un espacio euclidiano tri-dimensional, donde el nivel de gris corresponde a la tercera dimensión euclidiana. Esto es, si el nivel de gris del pixel con coordenadas (x,y) es z , se dice que la superficie se encuentra a una altura z en el punto (x,y) , como muestra la figura 7. Al dividir el espacio tridimensional (x,y,z) en bloques no superpuestos de tamaño $s_x \cdot s_y \cdot s_z$, con $s_x = \epsilon X$, $s_y = \epsilon Y$ y $s_z = \epsilon Z$, para algún $0 < \epsilon < 1/2$, contamos el número de bloques que son atravesados por la superficie, $N(\epsilon)$. La dimensión *box counting* se estima mediante la pendiente de la recta que se obtiene al hacer un ajuste lineal de mínimos cuadrados para la curva de $\log(N(\epsilon))$ en función de $\log(1/\epsilon)$ [15]. Una superficie suave siempre arrojará una dimensión 2, pero la variabilidad debida a la textura conduce a dimensiones superiores a 2.

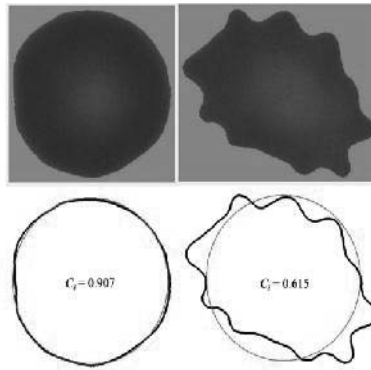


Figura 6. Significado de la circularidad.

La última característica medida tiene que ver con la palidez central y se refiere a la relación entre el promedio del tono de gris de la zona clara del centro y el promedio del tono de gris en el borde de la célula. Primero calculamos el promedio del nivel de gris de la célula entera (nivel cero). Luego, mediante un proceso de erosión, eliminamos los bordes de la célula y calculamos nuevamente el promedio del nivel de gris en la figura resultante (nivel uno). Así seguimos calculando el promedio sobre versiones más y más erosionadas de la célula (niveles superiores), con lo cual se va concentrando la medida en el centro del eritrocito, donde podría estar la palidez, como muestra la figura 8. La curva del nivel promedio de gris en función de la escala representa los cambios que se producen en el valor promedio del tono de gris de la célula a medida que se restringe el área de observación a regiones centrales cada vez más pequeñas. La medida de palidez se obtiene mediante la pendiente promedio de la curva correspondiente de nivel promedio de gris *versus* nivel de erosión.

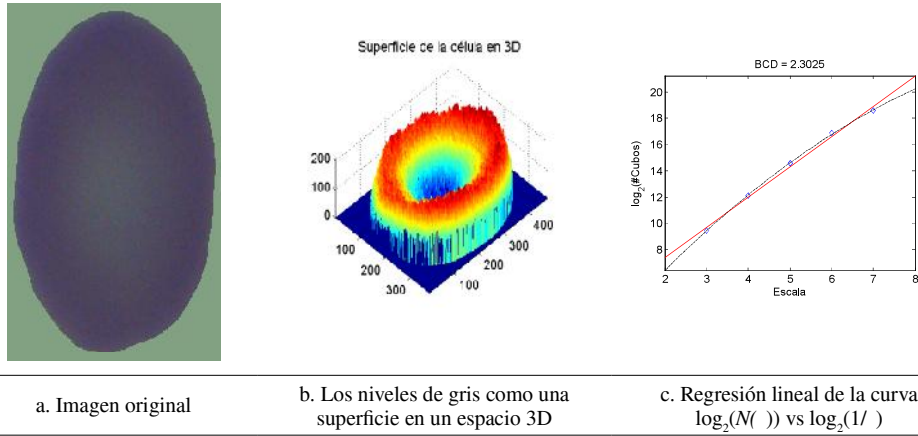


Figura 7. Cálculo de la dimensión *box-counting* 3D.

Esta medida de la palidez central es una de las características más discriminantes, pues permite distinguir perfectamente los esferocitos de los normocitos, cuando las otras características morfológicas son muy semejantes entre ellos. De hecho, la palidez permitiría identificar con facilidad otras células como los leptocitos, pues ellos muestran una variación característica en la pendiente de la curva, como muestra la figura 9. En efecto, la zona más clara es un anillo alrededor del centro de la célula, lo cual se refleja como un máximo en la curva de intensidad promedio. Sin embargo, como se mencionó, no disponemos de un número adecuado de leptocitos en la base de datos para aprovechar esta capacidad discriminante de la medida de la palidez central.

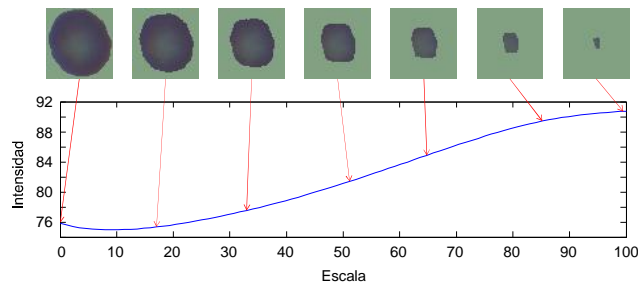


Figura 8. Cálculo de la palidez central.

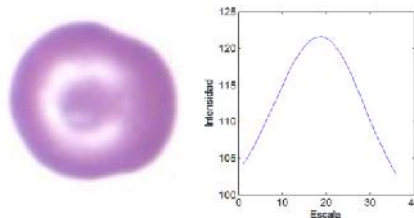


Figura 9. Uso de la palidez para detección de leptocitos.

4. Clasificación de los eritrocitos

A continuación verificamos la utilidad de las características seleccionadas para discriminar entre diferentes tipos de células y, posteriormente, describimos el clasificador neuronal que se utilizó para determinar el tipo de cada célula.

4.1. Capacidad discriminante de las características medidas

Las siete medidas seleccionadas se escogieron *a priori* observando cómo, en principio, cada una de ellas tiene algo que decir sobre las células. La figura 10 muestra, por ejemplo, cómo los rolos están entre las células con mayor área, los esferocitos están entre las células con mayor circularidad, los eliptocitos están entre las células con mayor excentricidad y los normocitos están entre las células con mayor palidez central.

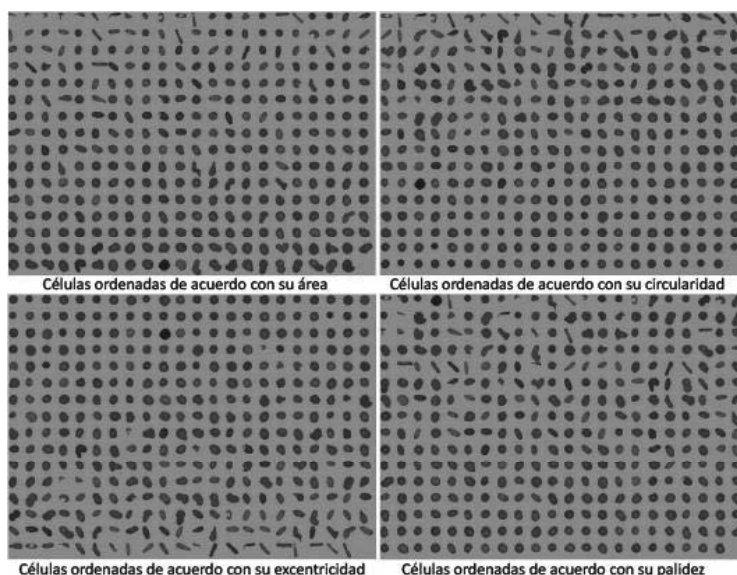


Figura 10. Células ordenadas de acuerdo con cuatro características.

De manera semejante, la figura 11 y la figura 12 muestran algunas células separadas según su palidez y su dimensión *box-counting* en el rango dinámico de cada medida. La figura 11 muestra que la medida de palidez central (la pendiente creciente) forma un espectro continuo que captura con exactitud la convexidad de los esferocitos en el extremo izquierdo y la concavidad de los normocitos en el extremo derecho. La figura 12 muestra cómo las células de baja dimensión *box-counting* corresponden a esferocitos, que son uniformes en su textura, mientras que las de alta dimensión son esquistocitos con una rugosidad aleatoria en su superficie. Las dimensiones intermedias corresponden a células rugosas pero con estructuras claramente definidas, como la presencia de la palidez central que se acaba de mencionar, debida a la biconcavidad de los eritrocitos sanos.

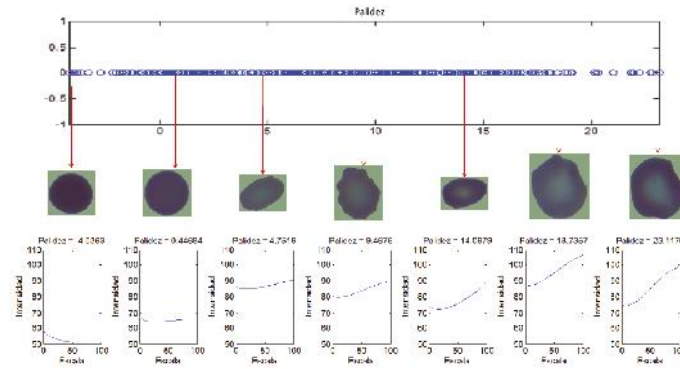


Figura 11. Tipos de célula que ocupan el rango de mediciones de palidez.

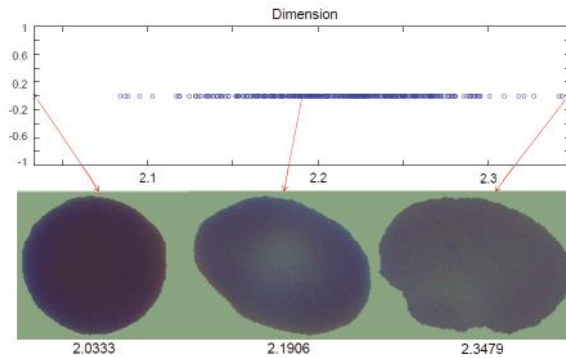


Figura 12. Tipos de células que ocupan el rango de mediciones de la dimensión *box counting*.

En la figura 13 se observa el rango de seis de las características extraídas de las imágenes, separadas para cuatro tipos de eritrocitos (normocitos, esferocitos, equinocitos y eliptocitos), con estimaciones funcionales de la distribución de densidad de probabilidad (*pdf*). Basta observar los intervalos de dominio de cada *pdf* para notar cómo la circularidad es suficiente para distinguir a los esferocitos de los eliptocitos e inclusive, de los equinocitos, aunque la solidez hace un mejor trabajo distinguiendo entre esferocitos y equinocitos. A pesar de que ninguna de estas medidas permitiría distinguir esferocitos de normocitos, la palidez resulta una característica claramente discriminadora entre estos dos tipos de células. La excentricidad, a su vez, permite distinguir a los eliptocitos entre los demás tipos de células. Las otras características no resultan tan discriminantes por sí mismas, aunque es notorio que, por ejemplo, el área tiende a ser menor en los eliptocitos que en otras células mientras el perímetro tiende a ser mayor en los equinocitos. Es este tipo de información la que captaremos mediante una red neuronal para la clasificación de las distintas formas en los eritrocitos, como explicaremos a continuación.

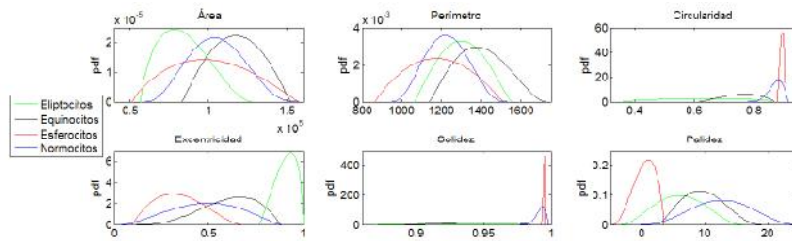


Figura 13. Funciones estimadas de densidad de probabilidad (*pdf*) para las características seleccionadas.

4.2. Proceso de clasificación

Los siete parámetros extraídos de las imágenes mediante técnicas de procesamiento de imágenes se convierten en las características seleccionadas para clasificar las células en uno de los siete tipos presentes en la base de datos, para lo cual escogimos usar una red neuronal.

Las siete características de entrada y los siete tipos de células por detectar corresponden al número de neuronas en la capa de entrada y en la capa de salida, respectivamente. Como los datos no son linealmente separables en el espacio de las características de entrada, añadimos una capa intermedia cuyo tamaño se diseñó cuidadosamente para que la red tenga suficiente capacidad de aprendizaje para el problema en cuestión, pero no demasiada capacidad de aprendizaje para que se sobreentrene con la información de entrada [16]. A fin de lograr este diseño, dividimos aleatoriamente las 262 células clasificadas por un hematólogo experto en 180 datos de entrenamiento, 41 datos de validación y 41 datos de prueba. Los datos de entrenamiento se usan para calcular los gradientes y ajustar los pesos de las sinapsis; los datos de validación se monitorean durante el entrenamiento para minimizar el sobre-ajuste; los datos de prueba se usan para verificar los resultados de la red ya entrenada con datos que no hayan sido vistos durante el entrenamiento. La figura 14 muestra el desempeño con los datos de prueba para redes con diferentes complejidades estructurales entrenadas como experimentos piloto para determinar la complejidad estructural adecuada de la red. Se puede apreciar que, con menos

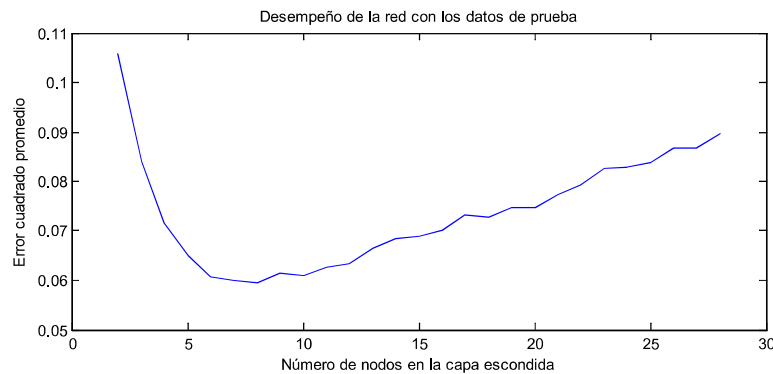


Figura 14. Error cuadrado promedio en los datos de prueba como función de la complejidad estructural de la red.

de siete neuronas en la capa oculta, la red no es capaz de aprender satisfactoriamente la tarea de clasificación; pero con más de siete neuronas en la capa oculta, la red tiene capacidad de sobre-ajustarse a los datos de entrenamiento, al punto que se le dificulta generalizar la información aprendida cuando se le presentan datos que no hubiese visto antes. En consecuencia, la estructura óptima para este problema es la de una red (7, 7, 7): siete neuronas en la capa de entrada, siete en la capa oculta y siete en la capa de salida.

La estructura (7, 7, 7) requiere un conjunto de 112 pesos sinápticos por seleccionar, los cuales se encuentran mediante el algoritmo clásico de *Back Propagation Learning* [17]. Cada división aleatoria de las muestras de entrenamiento, validación y prueba y cada inicialización aleatoria de los pesos sinápticos conducen a una red diferente. Al entrenar así un gran número de redes, escogimos la red que obtuvo mejores resultados de clasificación con los datos de prueba.

Para terminar esta sección, la figura 15 muestra un resumen general del proceso llevado a cabo en la herramienta de software para la clasificación automática de eritrocitos. Incluye los pasos para la segmentación de la imagen, las medidas observadas en cada célula y la estructura de la red neuronal.

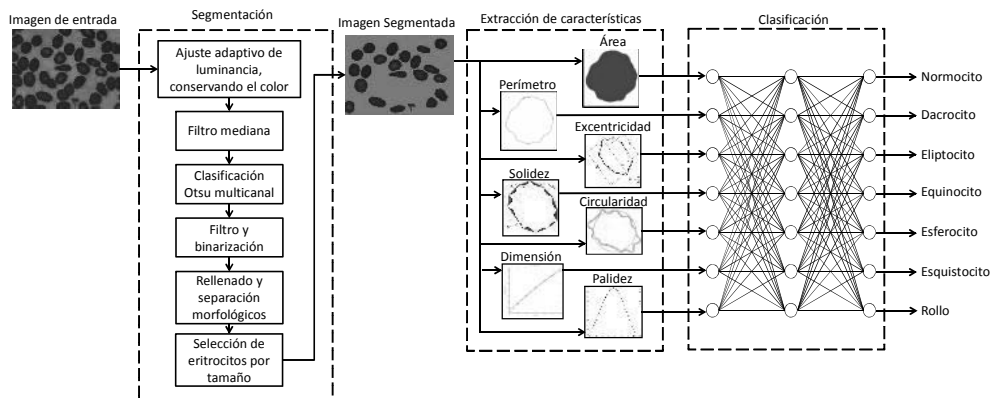


Figura 15. Esquema general de la herramienta desarrollada.

4.3. Análisis de resultados

Los resultados de clasificación con la red seleccionada se muestran en la tabla 2. Las filas representan los tipos de células clasificadas por el experto hematólogo y las columnas representan las clasificaciones hechas por la red neuronal. Por ejemplo, la primera fila indica que, de los siete dacrocitos presentes en la base de datos, cinco se clasificaron correctamente, uno fue confundido con un equinocito y otro fue confundido con un normocito. Por eso las matrices como las de la tabla 2 se conocen como “matrices de confusión” [18]. La última columna indica el número total de cada tipo de célula en la base de datos y la última fila indica el número total de cada tipo de célula clasificada por la red neuronal.

Sumando los elementos de la diagonal se observa un total de 255 aciertos entre las 262 células, para una tasa del 97,3%. Esta es una alta tasa de aciertos en comparación con los resultados de clasificación binaria encontrados en la literatura y reportados en la sección 1. Sin embargo, como el número de muestras varía mucho de un tipo de célula a otro (hay cien normocitos y solo siete dacrocitos, por ejemplo), esta tasa de aciertos no es una medida definitiva

del desempeño del clasificador. Así, otro clasificador que acertara en todas las células distintas a los dacrocitos pero no pudiera identificar un solo dacrocito, alcanzaría la misma tasa del 97,3% de aciertos. Por eso en la tabla 2 también reportamos los aciertos y errores obtenidos con cada tipo de célula, de manera que podemos calcular la fracción de células de cada tipo que clasificó correctamente. Por ejemplo, el clasificador identificó correctamente cinco de los siete dacrocitos, para una sensibilidad de 71,4%. Igualmente, clasificó correctamente el 100% de los eliptocitos, el 97,6% de los equinocitos, el 97,3% de los esferocitos, el 95% de los esquistocitos, el 99% de los normocitos y el 95% de los rollos. Estas sensibilidades indican que no hay ninguna tendencia de confusión entre pares de tipos de células, de manera que la red realmente aprendió las características de cada una de ellas, no solo de las mayoritarias.

Sin embargo, es interesante notar que de los siete errores cometidos por el clasificador automático, cuatro se deben a haber clasificado equivocadamente como equinocitos, algunas células que no lo eran (un dacrocito, un esquistocito, un normocito y un rullo). Este tipo de fenómenos se captura mejor en las matrices de confusión individuales para cada tipo de célula, pues en ellas se considera a la red neuronal como un clasificador binario y se muestran el número correspondiente de verdaderos positivos, falsos negativos, falsos positivos y verdaderos negativos para cada tipo de célula (Tabla 3) [18]. De esta manera podemos calcular la sensibilidad (qué fracción de las muestras positivas clasificó como positivas), la especificidad (qué fracción de las muestras negativas clasificó como negativas), la precisión (qué fracción de las muestras que clasificó como positivas eran realmente positivas), la predecibilidad de negativos (qué fracción de las muestras que clasificó como negativas eran realmente negativas) y la exactitud (qué fracción de muestras clasificó correctamente, ya sea como positivas o negativas). Estas estadísticas también se aprecian en la tabla 3 y, como se puede observar, ratifican el buen desempeño del clasificador propuesto, pues no solo las estadísticas generales sino las individuales para cada tipo de célula son altas en comparación con los resultados de trabajos anteriores.

Tabla 2. Resultados del Clasificador con el conjunto completo de 262 células en la base de datos.

		Clasificación automática							
		Dacrocito	Eliptocito	Equinocito	Esferocito	Esquistocito	Normocito	Rollo	
Clasificación por el experto	Dacrocito	5	0	1	0	0	1	0	7
	Eliptocito	0	36	0	0	0	0	0	36
	Equinocito	1	0	41	0	0	0	0	42
	Esferocito	0	0	0	36	0	1	0	37
	Esquistocito	0	0	1	0	19	0	0	20
	Normocito	0	0	1	0	0	99	0	100
	Rollo	0	0	1	0	0	0	19	20
		6	36	45	36	19	101	19	262

Tabla 3. Verdaderos positivos, falsos negativos, falsos positivos y verdaderos negativos para cada tipo de célula.

		Clasificación automática		Precisión = 83,3% Sensibilidad = 71,4% Especificidad = 99,6% Exactitud = 98,9% P.Negativos = 99,2%	
		Dacrocito	Otro		
Clasificación por el experto	Dacrocito	Vp=5	Fn=2		
	Otro	Fp=1	Vn=254		
		Clasificación automática			Precisión = 100% Sensibilidad = 100% Especificidad = 100% Exactitud = 100% P.Negativos = 100%
		Eliptocito	Otro		
Clasificación por el experto	Eliptocito	Vp=36	Fn=0		
	Otro	Fp=0	Vn=226		
		Clasificación automática		Precisión = 91,1% Sensibilidad = 97,6% Especificidad = 98,2% Exactitud = 98,1% P.Negativos = 99,5%	
		Equinocito	Otro		
Clasificación por el experto	Equinocito	Vp=41	Fn=1		
	Otro	Fp=4	Vn=216		
		Clasificación automática			Precisión = 100% Sensibilidad = 97,3% Especificidad = 100% Exactitud = 99,6% P.Negativos = 99,6%
		Esfereocito	Otro		
Clasificación por el experto	Esfereocito	Vp=36	Fn=1		
	Otro	Fp=0	Vn=225		
		Clasificación automática		Precisión = 100% Sensibilidad = 95% Especificidad = 100% Exactitud = 99,6% P.Negativos = 99,6%	
		Esquistocito	Otro		
Clasificación por el experto	Esquistocito	Vp=19	Fn=1		
	Otro	Fp=0	Vn=242		
		Clasificación automática			Precisión = 98% Sensibilidad = 99% Especificidad = 98,8% Exactitud = 98,9% P.Negativos = 99,4%
		Normocito	Otro		
Clasificación por el experto	Normocito	Vp=99	Fn=1		
	Otro	Fp=2	Vn=160		
		Clasificación automática		Precisión = 100% Sensibilidad = 95% Especificidad = 100% Exactitud = 99,6% P.Negativos = 99,6%	
		Rollo	Otro		
Clasificación por el experto	Rollo	Vp=19	Fn=1		
	Otro	Fp=0	Vn=242		

5. Conclusiones

En este artículo presentamos una herramienta de software para clasificación de formas patológicas de glóbulos rojos en muestra microscópicas de frotis de sangre periférica. La herramienta descrita hace uso de técnicas de procesamiento de imágenes y de clasificación mediante red neuronal. La clasificación automática coincide en más del 97% con la realizada por hematólogos expertos, lo cual supera los resultados encontrados en la literatura, aún para

simples clasificadores binarios que distinguen entre eritrocitos normales y anormales. Estos resultados sugieren la posibilidad de usar la herramienta en aplicaciones de apoyo diagnóstico.

Después de un proceso de ecualización y filtrado de la imagen que conserva el color de cada pixel, adelantamos un proceso de segmentación multicanal complementada con procesos morfológicos para identificar las células aisladas. Posteriormente medimos siete características en cada célula, la cuales resultaron discriminantes para distinguir diferentes anomalías de los eritrocitos: perímetro, área, excentricidad, solidez, circularidad, palidez central y dimensión *box-counting*. Para la clasificación usamos una red neuronal adecuadamente dimensionada para el problema de aprendizaje, la cual arrojó los resultados mencionados.

Las contribuciones de este artículo incluyen la clasificación en múltiples tipos de células, lo cual contrasta con las clasificaciones binarias que se encuentran en la mayoría de la literatura, y la introducción de la medida de palidez central, que resultó definitiva para la detección correcta de normocitos.

Estas contribuciones permiten concluir la utilidad de las técnicas de procesamiento digital de imágenes en el desarrollo de herramientas para ayuda diagnóstica, en particular para el caso de la detección de variaciones morfológicas de eritrocitos, de gran importancia clínica en la identificación de diferentes patologías. La combinación de técnicas de pre-procesamiento para extracción de características simples pero altamente discriminantes (como la palidez central) con técnicas de inteligencia artificial para clasificar los tipos de células en el espacio vectorial de las características extraídas, arroja resultados promisorios para la elaboración de ayudas diagnósticas, como se evidenció en este artículo.

Existen diferentes rutas para el trabajo futuro en esta línea de investigación. En primer lugar, sería deseable disponer de un mayor número de imágenes en las que se encuentren muestras de cada uno de los tipos de eritrocitos, en cantidades suficientes para obtener resultados estadísticamente significativos. En efecto, con las imágenes disponibles no fue posible trabajar en la detección de acantocitos, degmácitos, leptocitos, drepanocitos y estomatocitos. La hipótesis a verificar sería que la metodología propuesta conduciría a resultados de clasificación igualmente confiables, pero con un mayor número de tipos de células clasificadas. De otro lado, midiendo otras características sobre estos otros tipos de células con una base de datos más representativa, podría llegarse a encontrar nuevos parámetros simples y discriminantes que hagan más objetivos los procesos de diagnóstico, como hicimos aquí con la palidez central.

En segundo lugar, al detectar únicamente las células aisladas se pierde una gran cantidad de muestras de células superpuestas que podrían usarse para aumentar la significancia estadística de los resultados. Otro frente interesante de trabajo es, entonces, utilizar procedimientos de alto nivel para aislar las células superpuestas (segmentación) simultáneamente con técnicas de clasificación avanzadas como ajuste de formas estándar (transformada generalizada de Hough), contornos activos (algoritmos de serpientes) o modelos probabilísticos.

Por último, con un mayor número de muestras clasificadas y con más características discriminantes, sería de interés estudiar otras técnicas de clasificación basadas en inteligencia computacional o en otros métodos estadísticos para evaluar, comparar y seleccionar la más adecuada para este tipo de propósitos.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por la Universidad Militar Nueva Granada a través del proyecto de investigación ING1532. Agradecemos al grupo de investigación “Insight” por la contribución en el desarrollo de este proyecto, en particular al líder del grupo, el Doctor Javier Rodríguez, y al personal científico y administrativo del Hospital Militar Central y del Centro de Investigaciones de la Clínica del Country. Finalmente, agradecemos a los revisores anónimos, pues sus sugerencias se volvieron importantes contribuciones a la versión original del artículo. Marcela Mejía participó como investigadora del grupo TIGUM de la Universidad Militar y Marco Alzate participó como investigador de los grupos IDEAS y GITUD de la Universidad Distrital.

Referencias

- [1] C. Naranjo, “Atlas de hematología células sanguíneas”. Segunda edición. Manizalez: Centro de publicaciones Universidad Católica de Manizales, 2008.
- [2] J. Carr y B. Rodak, *Atlas de hematología Clínica*. Tercera edición, Buenos Aires: Editorial Médica Panamericana, Buenos Aires, 2010.
- [3] G. Campuzano, “Utilidad clínica del extendido de sangre periférica: los eritrocitos”. *Medicina & Laboratorio*, Volumen 14, Número 7, 2008, pp. 311-357.
- [4] N. Hamasaki and M. Yamamoto, “Red Blood Cell Function and Blood Storage”. *Vox Sanguinis*, Volume 79, 2000, pp. 191-197.
- [5] M. C. Albertini, L. Teodori, E. Piatti, M. P. Piacentini, A. Accorsi and M. B. L. Rocchi, “Automated Analysis of Morphometric Parameters for Accurate Definition of Erythrocyte Cell Shape”. *Cytometry Part A*, Volume 52A, Number 1, 2003. pp. 12–18.
- [6] S. Savkare and S. Narote, “Automatic System for Classification of Erythrocytes Infected with Malaria and Identification of Parasite’s Life Stage”. *Procedia Technology*, Volume 6, 2012, pp. 405-410.
- [7] L. Howard and C. Yi-Ping, “Cell morphology based classification for red cells in blood smear images”. *Pattern Recognition Letters*, Volume 49, 2014, pp. 155-161.
- [8] R. Tomari, W. Nurshazwani, W. Zakaria, M. Mahadi Abdul Jamil, F. Mohd Nor, N. Farhan and N. Fuad, “Computer Aided System for Red Blood Cell Classification in Blood Smear Image”. *Procedia Computer Science*, Volume 42, 2014, pp. 206-213.
- [9] E. Domínguez, S. García, P. Marrero Fernández y K. Fernández Arias, “Clasificación automatizada de eritrocitos en imágenes de muestras de sangre periféricas”. *IX Congreso Internacional de Informática en la Salud*, La Habana, Cuba, marzo de 2013.
- [10] Mohammed EA, Mohamed MMA, Far BH y Naugler C, “Peripheral blood smear image analysis: A comprehensive review”. *Journal of Pathology Informatics*, Volume 5, Number 9, 2014.
- [11] MATLAB Release 2012b, The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States. (<https://www.mathworks.com>).
- [12] D. Harmening, editor. “Clinical hematology and fundamentals of hemostasis”, F.A. Davis Co., Philadelphia, PA, 2009.
- [13] M. Mejía, M. Alzate y J. Rodríguez, “Clasificación automática de glóbulos rojos en frotis de sangre periférica”. Sometido a revisión en mayo de 2015.
- [14] R. González and R. Woods, *Digital Image Processing*. 3rd edition, Prentice Hall, 2008.

- [15] Jian Lia, Qian Dub and Caixin Suna, "An improved box-counting method for image fractal dimension estimation". *Pattern Recognition*, Volume 42, Number 11, 2009, pp. 2460-2469.
- [16] C. Bishop, *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer, 2006.
- [17] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. Segunda Edición, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1999.
- [18] Tom Fawcett, "An introduction to ROC analysis". *Pattern Recognition Letters*, Volume 27, 2006, pp. 861–874.

Marcela Mejia Fajardo

Ingeniera Electrónica de la Universidad Santo Tomas, Bogotá, Colombia. Magíster en Teleinformática de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Doctora en Ingeniería de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Doctora en Telemática de la Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Se desempeñó como Jefe de comunicaciones de la Corporación de Ahorro y Vivienda CONCASA. Actualmente se desempeña como profesora Asociada en el área de Redes en la Universidad Militar Nueva Granada de Bogotá, Colombia. Perteneció al grupo de investigación TIGUM. Sus áreas de interés son las redes inalámbricas Ad Hoc y procesamiento de imágenes.

e-mail: angela.mejia@unimilitar.edu.co

Marco Alzate Monroy

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Magíster en Ingeniería Eléctrica de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Doctor en Ingeniería de la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.

Ha sido investigador del Instituto Tecnológico de Electrónica y Comunicaciones (ITEC – Telecom), asistente de investigación en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadores de la Universidad de Maryland y científico investigador en el Laboratorio de Sistemas de Información de la Universidad del Sur de la Florida. Actualmente es profesor titular de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital. Perteneció a los grupos de investigación GITUD e IDEAS de la Universidad Distrital. Es miembro senior de IEEE y de sus sociedades de comunicaciones y de procesamiento de señales. Sus áreas de interés son el procesamiento de señales, el control de sistemas dinámicos, la teoría de la información y la teoría de sistemas complejos, tanto en sus aspectos teóricos como en su aplicación al modelado de redes modernas de comunicaciones.

e-mail: malzate@udistrital.edu.co



Towards a New Generation of Passive Optical Networks

Hacia una Nueva Generación de Redes Ópticas Pasivas

Elkin Fabián Aguas Martínez¹, Gustavo Adolfo Puerto Leguizamón^{2,*},
Carlos Arturo Suárez Fajardo³

^{1,2,3} Faculty of Engineering, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

* correspondence email: gapuerto@udistrital.edu.co

Received: 01/06/2015. Modified: 24/08/2015. Accepted: 16/09/2015

Abstract

Context: Growth in bandwidth demand has boosted the development of new techniques for the transmission of information in telecommunication networks. Passive Optical Networks (PON) are presented as an alternative to conventional networks based on copper. This paper proposes and assesses the performance of an optical access network with TDM-WDM and wired-wireless convergence.

Method: A teletraffic study was performed using a discrete event simulator. A simulation scenario was set up in order to obtain the packet loss and throughput of an optical access network under different load values, percentage of ONUs demanded bandwidth and number of wavelengths.

Results: As the number of wavelengths used to cope with the exceeding traffic demanded by users, the results show that packet loss tends to decrease and throughput tends to increase in the network.

Conclusions: The behavior of the variables analyzed in the results shows that when dimensioning a channel wavelength, which is required to determine the amount of resources needed to meet the bandwidth demand of the users, the proposed model positively influences the network behavior.

Keywords: optical fiber, optical access network, radio over fiber, wired-wireless convergence.

Resumen

Contexto: El crecimiento en la demanda de ancho de banda ha impulsado el desarrollo de nuevas técnicas para la transmisión de información en redes de telecomunicaciones. Las redes ópticas pasivas se presentan como una alternativa a las redes de acceso basadas en cobre. Este artículo propone y evalúa el desempeño de un modelo de red óptica de acceso que tiene en cuenta TDM-WDM y la convergencia fija-inalámbrica.

Método: A través de un estudio de teletráfico realizado haciendo uso de un simulador de eventos discretos, fue configurado un escenario de simulación con el fin de obtener la pérdida de paquetes y el volumen de tráfico de la red para diferentes valores de carga, porcentaje de ONUs con exceso de demanda de ancho de banda y el número de longitudes de onda.

Resultados: A medida que se usa un mayor número de longitudes de onda para hacer frente al tráfico en exceso demandado por los usuarios, los resultados muestran que la pérdida de paquetes tiende a disminuir y el volumen de tráfico en la red tiende a aumentar en la red.

Conclusiones: El comportamiento de las variables analizadas en los resultados muestra que al dimensionar los canales de longitud de onda, aspecto requerido para determinar la cantidad de recursos necesarios para hacer frente a las demandas de ancho de banda de los usuarios, el modelo propuesto influye positivamente en el comportamiento de la red.

Palabras clave: convergencia fija-inalámbrica, fibra óptica, red óptica de acceso, radio sobre fibra.

Open access



Citation: Aguas, E. F., Puerto, G. A. y Suárez, C. A. (2016). Towards a New Generation of Passive Optical Networks. In: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 49 –62

© the authors; reproduction rights holder: Universidad Distrital Francisco José de Caldas

En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a04>



1. Introduction

PON systems allow the distribution of fiber optics to multiple users without the requirement of using active devices that need external power sources, a PON makes use of one wavelength for downstream and one for upstream to distribute different services [1]. Due to the existing bandwidth demands and the forecasted for future years, deployment of PON has been increasing in the last decade, moreover a rethinking of this type of networks has been necessary in order to develop more capable and flexible access networks. This has opened the path to Gigabit Passive Optical Networks (G-PON) standardization. As its name implies, G-PON is able to reach data rates in the order of Gigabits per second (Gb/s). One of the most popular approaches of this technology is Fiber-to-the-Home (FTTH). FTTH was thought to deliver triple-play services (television, voice and data) to end users. The evolution of passive optical networks is still in progress. Many researches on PON have made possible to propose different approaches based on using more wavelengths and hybrids systems combining Time Division Multiplexing (TDM) and Wavelength Division Multiplexing (WDM) [2]. In addition to FTTH, Radio-over-Fiber (RoF) technology has been an important research topic due to the increasing demand of wireless access points demanding more bandwidth and range; RoF is a good option for the combined transport of wired and wireless services to a central station [3].

First trials with FTTH were made in 1997 in Higashi-Ikoma. These first fiber deployments had educational and community orientation purposes [4]. Although tests were successful back then, networks could not be mass deployed due to problems related to fiber maintenance costs and the service demand. The Full Services Access Networks (FSAN) group led the first steps toward a standardization of PON. This organization, consisting of service and system suppliers concluded that a global broadband access system should be created and standardized by ITU-T. This system was named A-PON (ATM PON), and then changed to B-PON (Broadband PON) [5]. B-PON is specified in ITU-T recommendations G.983.1, G.983.2 and G.983.3, it was standardized in the 2000-2002 period and its deployment took place between 2003 and 2007 [6].

The next generation optical access networks were known as G-PON, the G-PON standardization was made in 2001-2004 over ITU-T recommendation G.984.x (G.984.1-G.984.7) and worldwide deployments started in 2010. IEEE also standardizes G-PON, which is included in the IEEE 802.3ah standard called 1 Gb/s Ethernet Passive Optical Networks (1G-EPON) [6]. IEEE standardized 1G-PON in the period of 2001-2004 and the deployment process started in 2003 and took place until 2012. The last standardization made by ITU-T for PON related technologies is 10G-GPON over G.987.x (G.987.1-G.987.4), and took place in 2007-2011, its deployment started on 2012 and is expected to go until 2015. IEEE standardized 10G-EPON as P802.3av in the 2007-2009 period; its deployment started in 2008 and is expected to go until 2015 [6].

FSAN and ITU-T kept working in a new generation PON (NG-PON) after finishing with G-PON recommendations. NG-PON is divided into NG-PON1 and NG-PON2. NG-PON1 is a short-term upgrade and is compatible with G-PON Optical Distribution Network (ODN), i.e. is a classic passive distribution optical network based on splitters. NG-PON2 is a long-term state of the PON evolution and it can be deployed over new ODNs, being independent of the G-PON standard. The ITU-T (G.987.x) standard is considered as a NG-PON1 system due to its characteristics such as architecture, bandwidth and splitting ratio. NG-PON1 was defined as an asymmetric 10G system with 10G downstream and 2.5G upstream rates. This system is essentially an enhanced TDM PON from G-PON.

On the other hand, there are several prospective technologies for NG-PON2 system, a suggested baseline is to improve 10 Gb/s rate to 40 Gb/s following the TDM technology, a second method considers the use of WDM to achieve 40G access. Opportunistic and Dynamic Spectrum Management (ODSM) PON technology, based on TDMA and WDMA to dynamically manage user spectrum with no change on the ODN and user side was also suggested [7]. NG-PON2 in general focuses on upgrading the capacity offered to end users over longer spans of fiber; these networks, unlike NG-PON1 systems, are considered disruptive of PON because they do not have requirements for coexisting with GPON in the same optical distribution network [6].

This paper presents the key features for future optical access networks; these aspects are derived from the current standardization process of PON systems and worldwide deployments of such approach, along with an analysis on the data traffic forecasted for the forthcoming years. A reference network model for future PON systems is proposed and validated by means of simulation and a roadmap envisaging the evolution path for PON systems is presented.

2. Background and justification for new generation networks

As it was already mentioned, the telecommunication scenario is tending to consider the high bandwidth utilization to propose new network generations. To be able to understand these new methods and technology is important to understand first the fundamentals and reasons why new proposals are a must for the upcoming years.

2.1. PON fundamentals

The physical topology of an optical access network in the downstream link is point to multipoint (P2MP) and uses passive power splitters for distributing content to multiple users. Regardless the multiplexing technique used, Figure 1 represents a PON basic topology. PON systems include an Optical Line Termination (OLT), which is also known as optical line terminal. Some of the most important functions of the OLT are the traffic scheduling, bandwidth allocation and buffer control. The ODN based on splitters is responsible for dividing the power

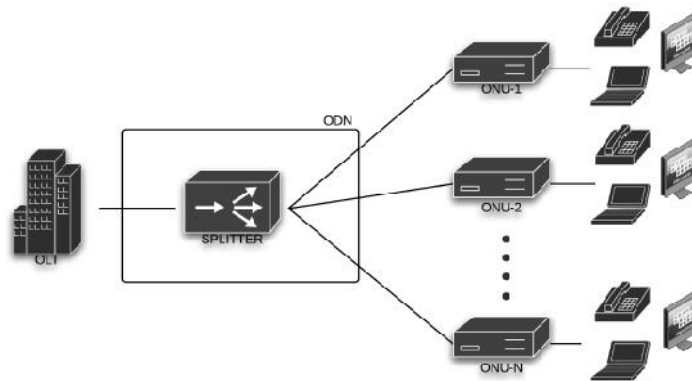


Figure 1. Basic PON topology.

Source: authors

of the signal generated by the service provider, this signal will be delivered to multiple users. Finally, an Optical Network Unit (ONU) transforms the received optical signals into electrical signals that will be sent to end user devices, e.g. phone, PC or setup box [8]. In a PON architecture the information transmitted from the OLT is considered as a broadcast signal. The signal reaches all the ONUs after the power splitting process; this is the reason why PON standards describe security mechanisms to ensure that users are allowed to access only the data intended for them [9].

Nowadays, the most deployed PON standard is based on the G-PON framework, which is known as G-PON Service Requirements (GSR) and summarizes the operational characteristics that service providers expect of the network [9]. Table 1 shows the main characteristics of GPON established on GSR.

Table I: G-PON GSR specifications.

Parameter	GSR specifications
Access data rate	Downstream: 1.244 and 2.488 Gb/s
	Upstream: 155 Mb/s, 622 Mb/s, 1.244 Gb/s, 2.488 Gb/s
Wavelengths	Downstream voice/data: 1480 to 1550 nm
	Upstream voice/data: 1260 to 1360 nm
	Downstream video distribution: 1550 to 1560 nm
Distance	10 or 20 km maximum
Splitting number	Maximum of 64

2.2. Traffic behavior

A way to foresee what type of technology will be used or implemented in the future relies on making an analysis of the demanded services supported by that technology or the demand of the technology itself. In this context, both fixed and mobile traffic are important for the PON study. A reliable source of service demand statistics related to PON networks is provided by the Cisco forecast traffic analysis [10] [11]. Cisco expects a Compound Annual Growth Rate (CAGR) of 57% in mobile traffic between 2014 and 2019, reaching 24.3 exabytes per month in 2019. This traffic is expected to be generated by more than 1 billion connected mobile devices, including machine-to-machine (M2M) modules. Incursion of M2M and smart devices such as smartphones and tablets will be the main cause of traffic growth in networks due to the high amount of data that these devices generate compared with non-smart devices. In this context it is estimated that by 2019 the smart traffic will be 97% of the total traffic generated by mobile devices. Fixed terminal broadband speed is directly influenced by the deployment of FTTH, rising broadband rate results in an increment of high bandwidth consuming applications. Figure 2 shows the global IP traffic for mobile terminals. The average IP traffic in 2014 was 60 exabytes per month and is expected to reach 168 exabytes per month by 2019 and 414 terabytes per second in a global scale.

The impact caused by the increment in services demand and high bandwidth is also reflected in the broadband speed. Global average broadband speed is expected to increase from 20.3 Mb/s in 2014 up to 42.5 Mb/s in 2019. High speed broadband will be essential for cloud storage

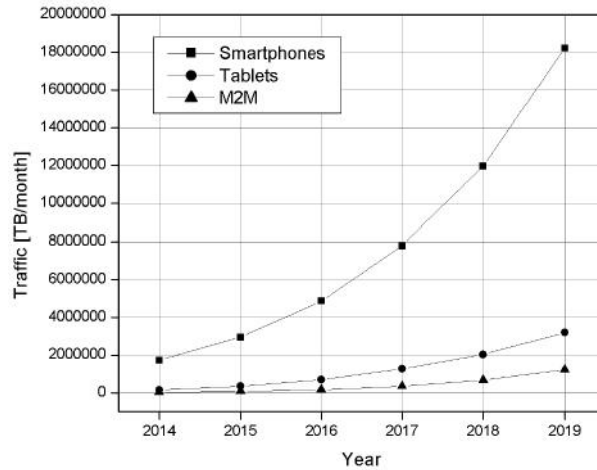


Figure 2. Global mobile data traffic by device type.

Source [10].

services and multimedia files downloading. IP traffic will present an increasing behavior not only for mobile data; this traffic includes also fixed Internet, managed IP. By fixed Internet is meant any IP connection from homes, campus, companies, premises and government, and it will go from 39.9 exabytes in 2014 to 111.8 exabytes in 2019. Managed IP is related to data traffic from corporative networks, IP television and on-demand video; it will go from 17.4 exabytes in 2014 to 31.8 exabytes in 2019. Mobile data covers all the data traffic from smartphones, tablets and M2M devices. Some factors that influenced the speed forecast are the deployment and adoption of FTTH and High-speed Digital Subscriber Line (HDSL), cable broadband adoption and overall broadband penetration.

The Cisco forecast traffic analysis presents an increasing behavior of broadband traffic and speed through years. Exponential growth of mobile traffic shows that this type of technology will have a big impact in generating and sending traffic in the forthcoming years. However, mobile traffic does not exceed IP traffic generated by fixed Internet, which also has an exponential behavior. Broadband speed growth presents a more lineal behavior but still increasing over the years. Thus, as the network traffic is generated in terminal devices, it is reasonable to think about implementing access networks with more capabilities and higher bandwidth to support the future traffic demands. PON networks are a possible solution to manage big amounts of traffic in the access segment. Much research on the subject has been done and is still in progress with the objective of improving the PON capabilities.

3. Key features of future access networks

As mentioned above, the increasing bandwidth demand will continue to grow over the next years. The average data rate will reach 150 Mb/s-300 Mb/s per subscriber; this data rate will depend on the splitting ratio (1:64 or 1:32) of the PON network [7]. Consequently, a more capable technology than TDMA xPON will be needed to supply traffic requirements. Current research in this area is focused on finding improvements for networks that belong to NG-

PON1. The IEEE standard 10G-EPON and the ITU-T standard XG-PON are both based in TDM-PON, and use one wavelength for downstream and one wavelength for upstream, wasting the available bandwidth in a single fiber [2]. Due that using pure WDM is not as possible nowadays as using TDM, combining TDM and WDM raises as a solution to a better bandwidth use. Also, exploitation of one wavelength for a group of users is a possible solution in the TDM-WDM PON paradigm. For the sake of increasing the network capabilities, current development trends use several wavelengths for downstream and several for upstream purposes, the network architecture is shown in Figure 3. Note that unlike the standardized architecture shown in Figure 1, the architectural trends lead to share a wavelength in time domain, this fact gives more flexibility when it comes to allocate wavelength channels according to a given demand, i.e. a user can be assigned with the less congested wavelength in order to cope with its current demand for a given period of time. Hybrid TDM-WDM is then a good option not only for NG-PON1 but for NG-PON2 as well, since the distribution of chromatic dispersion is performed over the n wavelengths used instead of only one. These features allow increasing the network capacity to reach the expected 40 Gb/s targeted for NG-PON2. Flexibility provided by splitting the total users into different smaller groups and managing resources based on this is also an important characteristic that has been discussed for next generation networks. The most important problem of using WDM in PON networks is the need of using wavelength selective devices at the ONU side, the cost of these devices is high comparing it with the cost of devices used for operating with TDM-PON; this makes preferable TDM nowadays due to the cost-effective relation.

On the other hand, wired and wireless services convergence is an important aspect in access networks. Growth of wireless devices such as smartphones and tablets demands higher bandwidth, and the high cost of having wired and wireless access networks working separately makes a necessity to integrate these technologies in the same infrastructure [12]. Wired and wireless convergence is possible thanks to RoF techniques, which main goal is the transport of broadband signals to distributed base stations for wireless access using an

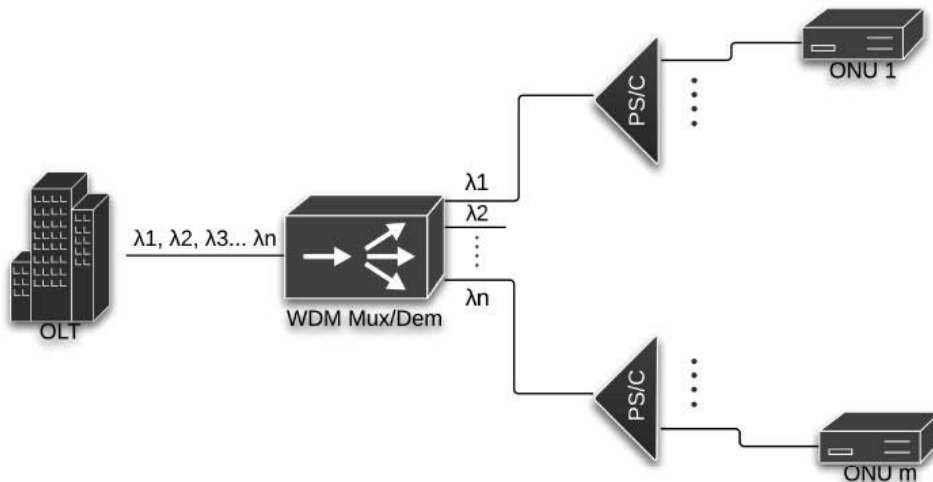


Figure 3. Architecture of a hybrid TDM-WDM system.

Source: [2]

optical access network [13]. Simultaneous modulation of Base Band (BB) signals and Radio Frequency (RF) signals is a proposed model for RoF systems [14] [15]. However, this process might impose signal-fading problems due to dispersion in the fiber optics so that careful treatment of the signal using optical filtering in the reception process is a must. In general, the signal generation for RoF systems relies on the right configuration of the external modulator as both BB and RF signals compete for using the dynamic range of the modulator. Also, sensitivity of receptors depends on the modulation index (MI) of RF signal, the reason for this relationship is that the MI directly influence on the non-linearity of MZM. Just as the case for RF, there is a relation between the BB-MI and the sensitivity of the BB receptor. On the other hand, dynamic resource allocation in PON networks is a promising feature for wired and wireless service integration. Each user can request fixed or mobile services at any time by letting the system to readjust the resource allocation. This feature leads a higher efficiency of the used bandwidth [16].

Devices in RoF networks have a big responsibility, shrinking the cell size aiming at improving the capabilities in the coverage area by means of frequency reuse at each cell, makes that the system must pay more attention to inter-cell handover. Managing handover and dynamic resources allocation from the Central Station (CS) leads to not economically feasible RoF networks, because of this, establishing a Remote Access Node (RAN) between the CS and the terminal devices to supply additional features can be a solution to the problem. The functionalities mentioned before make use of active devices such as Optical Cross-Connect (OXC), thus, networks with handover management and dynamic resources allocation differ from the passive network concept. When active devices take part in the transmission process the network is considered an Active Optical Network (AON). One advantage of AON over PON is the possibility to add additional features and processes to the transmission taking benefit from its point-to-point (P2P) behavior. Active networks allow features such as handover management, dynamic routing and dynamic resources allocation. AON also allows the use of terminal devices with less complexity that needs less computational power. This is based on the fact that these devices do not have to discriminate data sent to them from data sent to other ONUs using security mechanisms for WDM or TDM technologies [9].

The disadvantages of AON are mainly related to the costs of maintenance and deployment, this last one for urban cases where PON is more competitive [17]. Even though passive networks have disadvantages related to computational tasks during the transmission process; this is also a research topic in which the flaws and disadvantages of PON are trying to be strengthened. Several studies present solutions to problems related to handover and dynamic resources allocation in GPON [7] [18]. More computationally complex topics such as tuning techniques for efficiently control network resources and parameters [19] have been discussed as solutions for problems in PON systems opening a large range of possible capabilities for passive optical networks.

4. Results and discussions

4.1. Network model proposal

We have proposed a network model in order to assess the performance of an optical access network featuring the characteristics defined in the previous section. In the network model, unlike current GPON in which each ONU receives one data wavelength from the OLT as seen

in Figure 1, several wavelengths are broadcasted to link the OLT to different ONUs using an optical passive device as shown in Figure 4. Each wavelength is shared among several ONUs rather than being dedicated to a single ONU and the wavelength assignment can be static or dynamically changed during the communication depending on whether a tunable or fixed filter is used for wavelength selection at the ONU. This proposal aims at providing the functionalities based on the requirements identified in the previous section, namely: capacity upgrade, dynamic bandwidth allocation and converged transport of wired and wireless signals provided by a TDM-WDM PON system. For the sake of modeling such paradigm, let us denote N as the number of the available wavelengths with capacity C_k among a total bandwidth B_w and being K the number of services or classes of service transported by the wavelength channel at each PON. As we are dealing with time domain conditions, we define λ_k as the arrival rate and v_k^{-1} the exponential distribution of the service time. Then, the total arrival rate to a given ONU is given by (1) as long as the OLT has an available wavelength channel to provide connectivity with the ONU.

$$\lambda = \sum_{k=1}^K \lambda_k \quad (1)$$

It means that the rate of setting up a connection [state (w)] depends on the M number of ONUs that does not have an active connection [state ($w-1$)]. Thus, this transition occurs per unit time at a rate of $(M-(w-1))\lambda$. Therefore the transition of [state (w)] to [state ($w-1$)] identifies the rate at which a wavelength is released in the network, this rate is given by wR where R is the service rate of a wavelength channel. Then according to [20] R can be determined by:

$$R = \sum_{k=1}^K v_k i_k(C_k) \hat{p}(C_k) \quad (2)$$

Where $i_k(j)$ is the mean number of classes of service within a given wavelength and $\hat{p}(C_k)$ is the conditional probability that a portion of the bandwidth provided by a wavelength is occupied when that wavelength is being used. However, the expression defined in (2) is valid only for the case when the capacity requested by each service or class of service is fixed, i.e., the bandwidth requested by a connection is lower than the available bandwidth of a wavelength. In our study we assume that the traffic is dynamic, it means that the portions of bandwidth requested by the end users change according to their demand. To this aim, bandwidth thresholds must be defined. In this context, a connection with K the number of services has $T(k)$ number of bandwidth thresholds ($B_{w_{k,1}}, B_{w_{k,2}}, \dots, B_{w_{k,T(k)}}$) and each one of these bandwidths has a corresponding service time distribution $v_{k,s}^{-1}$. Then, the service rate of a wavelength channel under the consideration of dynamic traffic can be expressed as:

$$R = \sum_{k=1}^K (v_k i_k(C_k) \hat{p}(C_k)) + \sum_{k=1}^K \left(\sum_{T=1}^{T(K)} (v_{k,s} i_{k,s}(C_{k,s}) \hat{p}(C_{k,s})) \right) \quad (3)$$

In this case $i_{k,s}(j)$ is the mean number of services or classes of service with bandwidth requirement $C_{k,s}$, when j portions of bandwidth are occupied in the wavelength channel. Then, the

probability that n wavelengths are used in the PON $P(N)$, can be derived from the rate balance equations as described in [21] as follows:

$$P(n) = \left(\frac{\lambda}{R}\right)^n \frac{\prod_{j=1}^n [M - (w-1)]}{n!} P(0), \quad n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

Where $P(0)$ represents the probability that none of the wavelengths are occupied in the network.

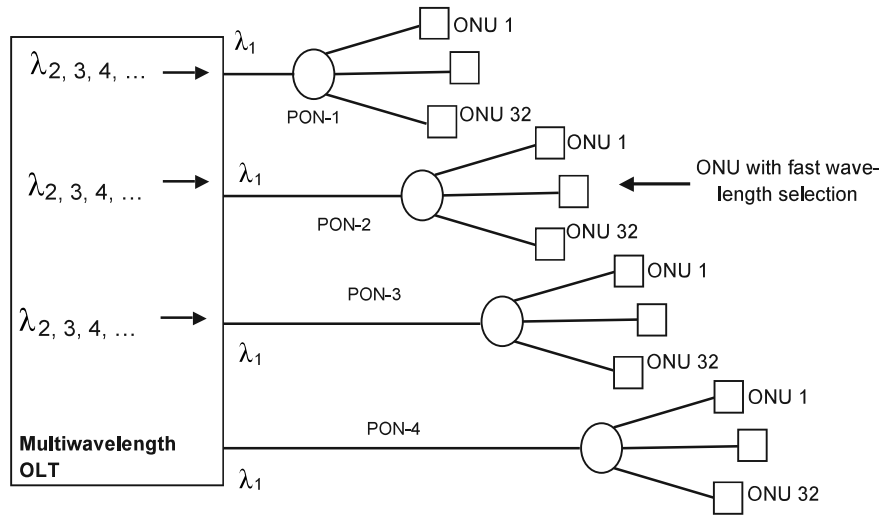


Figure 4. Approach for an upgraded GPON network model featuring multiple-dynamic wavelength distribution.

The novelty and contribution of this work to TDM-WDM PON rely on the wavelength channel dimensioning required to know how much resources are needed in order to cope with the bandwidth demands. To this aim, a teletraffic study based on the above-described model was carried out using Network Simulator 2 (NS2). The traffic pattern used in the simulations was exponential which in NS2 is represented as an ON-OFF traffic, wherein the period in which packets are sent is equivalent to the average transmitted traffic. Finally the network is simulated as multiple unicast transmission, where each user receives a particular traffic within the boundaries of the allowed bandwidth per ONU. For the sake of the evaluation a relevant scenario has been configured in which a percentage of out-of-profile ONUs and the amount of traffic in excess requested by them was defined, i.e. the bandwidth threshold $B_{w_{k,T(k)}}$ for M number of ONUs. The simulations aim at assessing the performance of a TDM-WDM PON system under different traffic loads and user behavior. For this purpose, 20% and 80% of out-of-profile ONUs were evaluated. An out-of-profile ONU means that the aggregated bandwidth (in excess) requested by the users belonging to that ONU is higher than the provided in the steady state. In this scenario the base bandwidth is 79 Mb/s per ONU, which means that 2.5 Gb/s were transmitted from the OLT and broadcasted to 32 ONUs. Figure 5 shows the packet

loss as a function of the traffic load for the base scenario, i.e. all the ONUs are in-profile. The traffic load is defined as the ratio between the number of bits transmitted per time unit and the link data rate. The figure includes the results for a TDM-WDM operation featuring 20% and 80% of ONUs out-of-profile with an exceeding traffic of 40% above the steady state. As seen, for a traffic load of 1 when only one wavelength is used in the network and 20% of ONUs are out-of-profile, the packet loss percentage is around 5%, whereas for 80% of ONUs out-of-profile the packet loss is roughly 26%. However, when an extra-wavelength with its associated bandwidth is used, the packet loss drops to 4.6% and 17.3% for 20% and 80% of ONUs out-of-profile respectively. For medium and low traffic load values, the contribution of having extra wavelengths for 20% of ONUs out-of-profile is nearly negligible while more significant when the amount of ONUs misbehaving is higher e.g. 80%. The improvement at low traffic loads is negligible; this shows that a TDM-WDM PON becomes cost-effective as long as the transported traffic is high. Also, it is shown that a TDM-WDM PON system is able to cope with increasing bandwidth demands even at high traffic loads, e.g. the higher the number of available wavelength channels the lower the packet drop percentage in the network.

The contribution of extra-wavelengths to the throughput for the above-described scenario is shown in Figure 6. In general, the throughput in all wavelengths behaves linear for all the traffic loads except for the configuration with one wavelength, which at a high load (>0.8) due to the packet loss as seen in Figure 5, produces a reduction of the system throughput. For 2, 3 and 4 wavelengths, as the packet loss is reduced, the throughput is incremented reaching a net value of approximately 2.85 Gbps for the case of three extra-wavelengths in a network with the 80% of ONUs out-of-profile and nearly 2.67 Gbps for 20% of ONUs out-of-profile. It represents roughly a 6% and a 14% of additional bandwidth for 20% and 80% of ONUs out-of-profile respectively. This is a measure of how much bandwidth in excess a TDM-WDM PON system is able to provide in the event of high bandwidth requests from the ONUs.

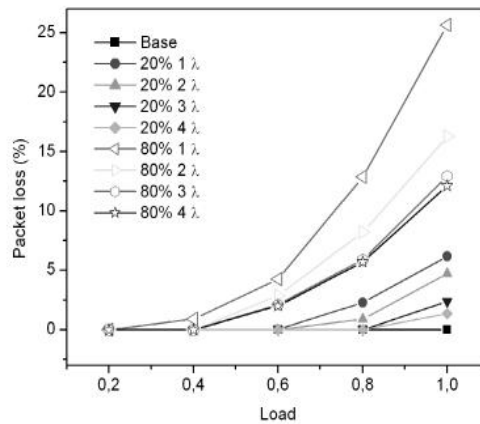


Figure 5. Packet loss as a function of the traffic load for 20% and 80% of ONUs out-of-profile featuring 40% of requested bandwidth in excess.

Source: Authors.

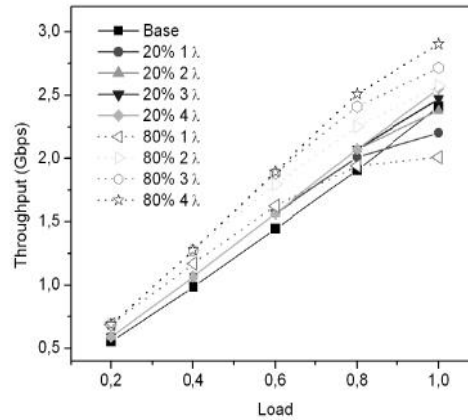


Figure 6. Throughput as a function of the traffic load for 20% and 80% of ONUs out-of-profile featuring 40% of requested bandwidth in excess.

Source: Authors.

4.2. Technology roadmap for passive optical networks

As discussed above, passive optical networks broadcast a channel wavelength among a number of end users following a passive splitting mechanism. Regardless of the splitting ratio, which may vary from 16 to 128, the PON system follows a TDM or a WDM operation. In this context, both EPON and GPON are based on TDM, and while WDM PON has not been standardized yet, a first deployment experience was already accomplished [22]. Based on the current state of PON deployments and main directions found in the literature, in this section we propose an evolution path or technology roadmap for passive optical networks. Figure 7 shows the proposed roadmap that describes the potential passive access technologies in a short, medium and long-term time scale. As seen, today the access segment based on optical technologies is dominated by GPON and EPON featuring bit rates of up to 2.5 Gb/s in the downlink and 1.25 Gb/s in the uplink. The expected evolution of these systems will have to face the upgrade capacity requirement, thus in a short-term time a significant deployment of XG-PON and 10G EPON systems is foreseen. Next, in a medium term scale the WDM PON system is expected to see the first deployments once its standardization has been released. Also, the first step towards a convergence of mobile services transported directly onto the optical fiber without down conversion to baseband, i.e. pure RoF transmission. The critical condition for this stage to success relies on mature optical filtering techniques in order to be able to separate the combined radiofrequency signal, as low as a few Gigahertz, from the optical carrier. Finally, dynamic and flexible optical access networks will be available in a long-term time.

This stage will see optical access networks offering ultrahigh bit rates to the end user; data rates of up to 1 Gb/s in average per user are expected. The network will have the capacity of delivering the less congested wavelength to different fixed end users and also will make a flexible management of the wavelength channels in order to cope with the high bandwidth requested by mobile systems beyond fourth generation.

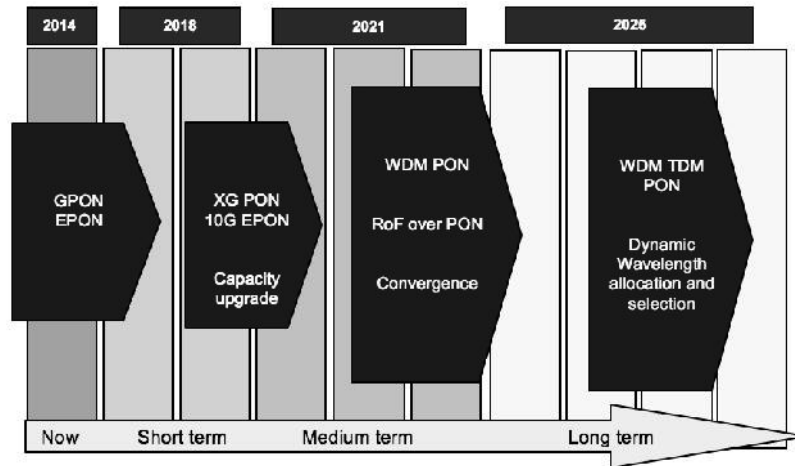


Figure 7. Technology roadmap for passive optical networks.

Source: Authors.

Again, the optical filtering process will take an important role at this stage; accurate and fast tunability is needed in order to enable truly wavelength selection at the user side. It should be pointed out that the proposed roadmap only takes into account pure passive optical networks, i.e. the distribution relies on the use of couplers and passive demultiplexers. A different picture can be envisaged if active devices such as optical switches based on Microelectromechanical (MEM) technology or advanced processing based on Semiconductor Optical Amplifiers (SOA) are taken into account.

5. Conclusions

This paper discussed the justification for the development of future passive optical networks. Traffic forecast analysis shows that the bandwidth demand is increasing exponentially and it is expected to follow this trend in the forthcoming years. This demand is considered the main reason for the interest in developing a new generation of access optical networks. Key features of future access networks were stated, namely: capacity upgrade, convergence of wired and wireless transmission, and dynamic wavelength allocation. These key features are the basis of the TDM-WDM PON reference architecture presented. The simulations take into account the number of ONUs requesting bandwidth in-profile and out-of-profile, this fact allows identifying the way the network behaves as a function of the traffic load. Results show that using multiple wavelengths improves the network performance by reducing the packet loss and incrementing the throughput. This results in a better bandwidth usage under the presence of high traffic load. Finally a technology roadmap for passive optical networks was presented. The roadmap envisages the technology and the evolution path considering the three key features mentioned above; this roadmap presented an evolution proposal of PON in a short, medium and long-term time scale. In accordance with the user service requirements considerations and the technological maturity to deploy the future PON, it has been stated that the evolution path for optical access networks in a short-term scale will include capacity upgrade, convergence in a medium-term and dynamic wavelength allocation in a long-term scale. The optical filtering

was identified as the key element to enable the deployment of the future access networks since today there are no feasible photonic filters that perform neither fast wavelength selection nor selective filtering process. This fact opens the door to future works related to the design or optimization of current filtering technologies to fulfill the high demanding performance required by TDM-WDM networks. It is also of interest the design of a novel MAC layer to manage the dynamic behavior of the bandwidth requests in mobile and fixed networks. In addition, advanced transmission methods such as that base on Optical Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OOFDM) may bring interesting solutions to the optical access layer, mainly those related to the capacity upgrade and dynamic bandwidth allocation.

References

- [1] Rayesh Yadav, "Passive-optical-network- (PON-) based converged access network [invited]", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Volume 4, Issue 11, November, 2012, pp. B124-B130.
- [2] M.E. Abdalla, S.M. Idrus and A.B. Mohammad, "Hybrid TDM-WDM 10G-PON for high scalability next generation PON", *8th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2013, pp. 1448-1450.
- [3] Way Ji, Xiao Li, Zhaoyuan Kang and Xuwei Xue, "Design of WDM-RoF-PON Based on Improved OFDM Mechanism and Optical Coherent Technology", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, Volume 7, Issue 2, February, 2015, pp. 74-82.
- [4] Paul W. Shumate, "Fiber-to-the-Home: 1977-2007", *Journal of Lightwave Technology*, Volume 26, Issue 9, May, 2008, pp. 1093-1103.
- [5] Yoichi Maeda, Kenji Okada and Dave Faulkner, "FSAN OAN-WG and Future issues for broadband optical access networks", *IEEE Communications Magazine*, Volume 39, Issue 12, December, 2001, pp. 126-132.
- [6] Marek Hajduczenia and Henrique J.A. da Silva, "Next generation PON systems – Current status", *11th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July, 2009, pp. 1-8.
- [7] Hao Feng, Chang-Joon Chae and A. Nirmalathas, "Seamless handover scheme in energy-efficient long reach WDM/TDM PON systems", *17th Opto-Electronics and Communications Conference (OECC)*, July, 2012, pp.711-712.
- [8] Saikrishna Reddy K, Deepa Venkitesh, Colm Browning and Liam P Barry, "Demonstration of a 30 Gbps Intensity Modulation Direct Detection OFDM-based Passive Optical Network", *2015 Twenty First National Conference on Communications (NCC)*, February-March, 2015, pp. 1-4.
- [9] Gerd Keiser, *FTTX Concepts and Applications*, Wiley-IEEE Press, Hoboken, New Jersey, 2006, pp. 155-169.
- [10] CISCO, *The Zettabyte Era: Trends and Analysis*, May, 2015, Available at http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/VNI_Hyperconnectivity_WP.pdf
- [11] CISCO, *Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2014-2019*, February 15, 2014, Available at http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white_paper_c11-520862.pdf
- [12] Ming Zhu, Liang Zhang, Cheng Liu, Shu-Hao Fan and Gee-Kung Chang, "Delivery of Wireless and Wired Services Using a Single-drive Mach-Zehnder Modulator for Bidirectional Radio-over-Fiber Systems", *2012 IEEE Photonics Society Summer Topical Meeting Series*, July, 2012, pp. 90-91.
- [13] Priya Dane and Hemani Kaushal, "Characterization of RoF GPON performance for different modulation schemes", *Tenth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN)*, July, 2013, pp. 1-6.
- [14] V. Polo, A. Martinez, J. Marti, F. Ramos, A. Griol and R. Llorente, "Simultaneous baseband and RF modulations scheme in Gbit/s millimetre-wave Wireless-fibre networks", *International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP)*, September, 2000, pp. 168-171.

- [15] Tomotada Kamisaka, Toshiaki Kuri and Ken-ichi Kitayama, "Simultaneous modulation and fiber-optic transmission of 10-Gb/s baseband and 60-GHz-band radio signals on a single wavelength", *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Volume 49, Issue 10, October, 2001 pp. 2013-2017.
- [16] Norashidah Md Din, Nurul Asyikin MdRadzi, Sajaa Kh Sadon and Mohammed Hayder Al-Mansoori, "Approaches in Dynamic Bandwidth Allocation in Passive Optical Network Systems", *2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP)*, October, 2013, pp. 10-14.
- [17] Kun Wang, Claus Popp Larsen, Anders Gavler, Bart Lannoo, Dominique Chiaroni and Mikhail Popov, "A Comparative Model and Techno-Economic Analysis of Next Generation AON Ethernet and TDM PON", *Asia Communication and Photonics Conference and Exhibition (ACP)*, December, 2010, pp. 716-717.
- [18] Huawei, *Next-Generation PON Evolution*, 2010, Available at <http://www.huawei.com/de/static/HW-077443.pdf>
- [19] T. Jiménez, N. Merayo, R.J. Durán, J.C. Aguado, I. de Miguel, P. Fernández, R.M. Lorenzo and E.J. Abril, "Adaptive-Tuning Method Based on Neural Networks for PID Controllers Applied to Passive Optical Networks (PONs)", *2015 17th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, July, 2015, pp. 5-9.
- [20] John S. Vardakas, Vasilios G. Vasilakis, and Michael D. Logothetis, "Calculating blocking probabilities in single-hop WDM traffic-groomed optical networks", *Proc. of the International Conference on Transparent Optical Networks*, July, 2007, pp. 1-5
- [21] H. Akimaru, K. Kawashima, *Teletraffic – Theory and Applications*, Springer-Verlag, 1993.
- [22] H. H. Lee et al., "WDM PON experience and direction", FSN Workshop, November, 2009, Laforet Biwako.

Elkin Fabián Aguas Martínez

He was born in Sincé-Sucré, Colombia, in 1993. He is a student of the Universidad Distrital Francisco José de Caldas in Bogotá, Colombia, where he is pursuing the BSc. in Electronic Engineering. In 2014 he joined the Laboratory of Microwave, Electromagnetism and Radiation (LIMER) as a research assistant in the framework of the research project "Dynamic architectures for converged optical access networks". His research interests include telecommunication networks, covering optical and non-optical networking, and telematics.

e-mail: efaguasm@correo.udistrital.edu.co

Gustavo Adolfo Puerto Leguizamón

He was born in Sogamoso-Boyacá in 1978, he received the BSc. in Telecommunications Engineering in 2002. He joined the Institute of Telecommunications and Multimedia Applications at the Universitat Politècnica de València in Spain, where he received the Advanced Research Studies in 2005 and the PhD. degree in 2008. As postdoctoral researcher he performed as co-leader of the workpackage about new generation of physical technologies for optical networks in the framework of the European funded project ALPHA (Architectures for Flexible Photonics Home and Access Networks). Since 2012 he is an Assistant Professor at the Universidad Distrital Francisco José de Caldas in Bogotá where he is with the Laboratory of Microwave, Electromagnetism and Radiation (LIMER). He has published more than 40 papers in journals and international conferences and he is a reviewer of the IEEE Journal on Lightwave Technologies and IEEE Photonic Technology Letters. His research interests include optical networking and radio over fiber systems.

e-mail: gapuerto@udistrital.edu.co

Carlos Arturo Suárez Fajardo

He was born in Santa Sofía-Boyacá. He received the MSc. and PhD. degrees in Telecommunications Engineering from the Universitat Politècnica de València, Valencia, Spain, in 2003 and 2006, respectively. In 2006, he founded the Laboratory of Microwave, Electromagnetism and Radiation (LIMER) research group at the University Distrital Francisco José de Caldas in Bogotá, Colombia, and in 2007 he became as an associate professor at the same University. He has published more than 40 papers in journals and international conferences and he is a reviewer of the Chilean Journal Engineering and Journal of Antennas and Propagation (IJAP). His research interests include wideband and multi-band planar antenna design and optimization, microwave engineering, applied electromagnetic and small satellite communication systems.

e-mail: csuarezf@udistrital.edu.co

Construcción y Evaluación de Servicios Interactivos en Entornos de TVDi

Construction and Evaluation of Interactive Services in TVDi Environments.

Gabriel Elías Chanchí Golondrino^{1,*}, José Luis Arciniegas Herrera¹,
Wilmar Yesid Campo Muñoz²

¹Universidad del Cauca, ²Universidad del Quindío

* gabrielc@unicauca.edu.co

Received: 09/06/2015. Modified: 09/11/2015. Accepted: 31/12/2015

Resumen

Contexto: Con el fin de ampliar el abanico de oportunidades de la educación virtual, es importante considerar dos aspectos tecnológicos relevantes: el gran potencial de la penetración de la televisión y el auge de servicios de la Web 2.0 en redes sociales y comunidades en Internet, espacios en los cuales los usuarios comparten y generan conocimiento alrededor de una temática. Así, se hace necesario definir la forma adecuada de implementar y desplegar dichos servicios interactivos en entornos de televisión, dadas las características particulares de este escenario.

Método: Con el propósito de guiar el proceso de construcción de servicios interactivos de televisión, en este artículo se propone un esquema para el consumo de servicios para escenarios de televisión digital interactiva (TVDi), el cual fue adaptado a partir del estilo arquitectónico REST-JSON (*Representational State Transfer – Javascript Object Notation*).

Resultados: Como resultados del uso del esquema propuesto, se construyeron los servicios de chat, tablón de mensajes y acceso a correo electrónico, en los escenarios de televisión digital terrestre (TDT) y TV Móvil del proyecto ST-CAV (Servicios de T-Learning para el soporte de Comunidades Académicas Virtuales). Asimismo, otro de los resultados del presente artículo fue la evaluación de los servicios implementados, mediante pruebas de tráfico de red y consumo de memoria.

Conclusiones: De acuerdo a los tiempos de procesamiento y respuesta obtenidos en la evaluación de los servicios interactivos implementados, es posible concluir que el esquema planteado en este artículo puede considerarse como una alternativa adecuada para el diseño y construcción de servicios en escenarios de TVDi, permitiendo la convergencia con aplicaciones de Internet (Web 2.0).

Palabras clave: comunidades académicas virtuales, REST-JSON, servicios de la Web 2.0, Televisión Digital Interactiva (TVDi).

Open access



Citación: Chanchí, G. E., Arciniegas, J. L. y Campo, W. Y. (2016). Construcción y evaluación de servicios interactivos en entornos de TVDi. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 63 –82
© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a05>

Abstract

Context: In order to expand the range of virtual education opportunities, it's important to consider two technological aspects: the great potential of TV penetration and the Web 2.0 services boom in social networks and Internet communities, spaces in which users share and generate knowledge around a topic. So, it's necessary to define how to implement and deploy these interactive services in television environments, given the particular characteristics of this scenario.

Method: For the purpose of guiding the building process of interactive services, in this paper we propose a scheme of service consumption in scenarios of interactive digital television (iDTV), which has been adapted from the REST-JSON (*Representational State Transfer – Javascript Object Notation*) architectural style.

Results: As a result of the use of the proposed scheme, we implemented the message board, chat and e-mail services, in the television scenarios of digital terrestrial television (DTT) and Mobile TV of the ST-CAV project (T-Learning services for the support of virtual academic communities). Likewise, another result obtained in the present paper, was the evaluation of the implemented services through network traffic and memory consumption tests.

Conclusions: According to processing and response times obtained in the evaluation of implemented interactive services, the presented scheme can be considered as a viable alternative for the design and building of services in iDTV scenarios, allowing convergence with Internet applications (Web 2.0).

Key words: interactive digital television, REST-JSON, virtual academic communities, Web 2.0 services.

1. Introducción

Dado el proceso de migración de los sistemas analógicos a los digitales [1], la Televisión Digital Abierta (TDA), ha sido concebida como un servicio de cubrimiento cercano al 100 % en cada uno de los países. Además, gracias al soporte de interactividad que ofrece la TDA, esta se convierte en una de las tecnologías llamadas a reducir la brecha digital, mediante posibles entornos interactivos que promuevan el aprendizaje de forma personalizada, como es el caso del T-Learning [2].

En [3] los autores muestran cómo diferentes investigaciones predicen el rápido desarrollo de la TVDi en Europa, exponen cómo los usuarios demandan un mayor valor agregado sobre la televisión convencional. Así, el artículo describe una arquitectura cuyo objetivo es proveer un *Framework* digital interactivo que permita la convergencia de los servicios de la televisión por *Broadcast* con la televisión sobre IP. En [4] se presenta una arquitectura para proveer servicios interactivos para un sistema de TVDI, asegurando una comunicación estandarizada entre las aplicaciones del cliente y sus servicios interactivos, a través de un canal externo. Los autores usan como caso de estudio el contexto de la intención de la inclusión social de Brasil.

Por otra parte, la marcada evolución de Internet en los últimos años, ha permitido el intercambio y generación de una gran cantidad de información de forma ágil y flexible, gracias a la tendencia de los servicios actuales de la red de redes por fomentar la creación de contenidos de forma colaborativa y comunitaria. Entre estos servicios se destacan: foros, *wikis*, blogs, chat, entre otros, los cuales son conocidos también como herramientas de la Web 2.0. Dichas herramientas por lo general se encuentran asociadas a entornos virtuales de aprendizaje (E-Learning), redes sociales y comunidades académicas virtuales (CAV) [5][6]. Dadas las características de integración, reutilización y flexibilidad necesarias para el diseño e implementación de estos servicios, los esquemas de consumo más difundidos para este propósito, se basan en el uso de servicios web [7].

De acuerdo a lo anterior, resulta importante potenciar las ventajas de la interactividad en TD, aprovechando el auge y la aceptación de los servicios y tecnologías propias de la web 2.0. Dentro de las tecnologías de implementación de esquemas de consumo de servicios más

usados para las herramientas de la Web 2.0, se destacan dos aproximaciones tecnológicas: el protocolo Simple Object Access Protocol (SOAP, por sus siglas en inglés) y el estilo arquitectónico Representational State Transfer (REST, por sus siglas en inglés). La diferencia básica entre estos dos métodos de consumo de servicios, se da en cuanto al tipo de mensajes que se intercambian. Para el caso de SOAP, los mensajes son en formato Web Service Description Language (WSDL, por sus siglas en inglés), mientras que en el caso de REST, el tipo de mensaje más difundido es JavaScript Object Notation (JSON, por sus siglas en inglés), el cual basa su sintaxis en el lenguaje JavaScript. Los mensajes WSDL al estar basados en el lenguaje Extensive Markup Language (XML, por sus siglas en inglés) son complejos comparados con los de tipo JSON, razón por la que muchos de los servicios de las CAV y redes sociales (Facebook, Twitter) han sido implementados y tienen interfaces abiertas para desarrollo con el estilo arquitectónico REST [8].

En [9] se muestra cómo, mediante los servicios web basados en Single Sign-on (SSO, por sus siglas en inglés), se provee a los usuarios un fácil acceso a las aplicaciones y a los recursos de red, donde la parte de seguridad es tratada bajo JSON. Además, en este trabajo sustituyen el XML por JSON debido a su fácil compresión para los seres humanos y su mayor velocidad de procesamiento para los equipos de cómputo. En [10] se demuestra cómo usando XML se requiere un proceso de interpretación o análisis, mientras que usando JSON, se presenta un nuevo enfoque, pasando por alto la necesidad de procesamiento del lenguaje, que lo convierte en una solución más ágil. En [11] se describe la construcción de aplicaciones web de alto desempeño computacional, High Performance Computing (HPC, por sus siglas en inglés) usando servicios web que aprovechan las ventajas del estilo arquitectónico REST-JSON. Donde, para lograr una completa funcionalidad de las aplicaciones web, se tienen en cuenta los estándares de la Web 2.0.

A pesar de que los esquemas de consumo de servicios usados han sido ampliamente difundidos y aplicados en Internet, en el contexto de la televisión se deben considerar algunas restricciones adicionales, relacionadas con las capacidades de procesamiento, los tiempos de respuesta y memoria de los dispositivos de acceso, con el fin de permitir la eficiencia en el consumo de los servicios. Como aporte principal, este artículo propone la adaptación de un esquema de consumo de servicios para escenarios de TVDi, tomando como referencia el estilo arquitectónico REST. El esquema propuesto parte del diseño preliminar presentado por los autores en [12]. Así, el presente artículo realimenta las ideas propuestas en [12], permitiendo extender los escenarios de implementación y validar los servicios desarrollados a través del esquema propuesto. De igual forma es importante mencionar que el esquema propuesto y los servicios implementados a partir de este, han sido realimentados por las directrices de diseño de aplicaciones usables en TVDi propuestas en [13], desarrolladas también en el laboratorio de televisión de la Universidad del Cauca a partir de la adaptación y aplicación de heurísticas de usabilidad a escenarios de televisión. El propósito de este esquema es guiar el proceso de diseño e implementación de servicios interactivos de televisión, de manera independiente al campo de aplicación.

El esquema presentado en esta investigación fue usado en el proceso de construcción de los servicios asociados a las comunidades académicas virtuales (CAV) de los diferentes escenarios (televisión digital terrestre y Tv móvil) del proyecto ST-CAV (Servicios de T-Learning para el soporte de comunidades académicas virtuales) [14], desarrollado en el laboratorio experimental de TVDi de la Universidad del Cauca [15]. La importancia de las comunidades en el proceso de aprendizaje es abordada en [16], donde se investiga las necesidades de los usuarios para el desarrollo de una comunidad virtual (CV) para el curso de SAP UCC (University Com-

petence Center) del Grupo de Usuarios. El Grupo de Usuarios está compuesto por profesores y estudiantes para propósitos educativos. El objetivo de la CV es mejorar la comunicación y la cooperación entre los profesores y apoyar el desarrollo sistemático de las innovaciones, en el ámbito de la enseñanza de esta planificación de recursos empresariales de software. Asimismo, en [17] se estudia el proceso de aprendizaje y se presenta la metodología de diseño de un sistema interactivo de E-Learning basado en IPTV, se introduce un marco de servicios para IPTV basados en E-Learning. Además, se discuten las estrategias tradicionales de conversión de recursos de aprendizaje basados en la web a la plataforma de IPTV.

El proyecto ST-CAV, en el cual se enmarca esta investigación, tuvo por objetivo dar soporte a una CAV desde diversos escenarios televisivos (TDT, TV Móvil e IPTV), con el propósito de apoyar los procesos de aprendizaje y construcción de conocimiento en televisión (T-Learning), a través de servicios de la Web 2.0. Dentro de los servicios implementados en el proyecto y presentados en este artículo, se destacan: chat, tablón de mensajes o micro-blog y acceso al correo electrónico, los cuales fueron desplegados en escenarios de televisión digital terrestre y tv móvil. Finalmente, este artículo presenta como aporte adicional, la evaluación de los servicios implementados según el esquema propuesto, a través de pruebas de tráfico y pruebas de consumo de memoria, las cuales tienen por función verificar la eficiencia del esquema para escenarios de TVDi. Estas pruebas están de acuerdo a lo propuesto en [18], en donde se presenta un modelo de tráfico de los servicios soportados por una CAV, los cuales generan un comportamiento propio y diferente que depende del comportamiento de los usuarios y los horarios de acceso a los servicios.

La estructura de este artículo es la siguiente: en la sección 2 se muestran un conjunto de conceptos utilizados en el presente artículo. En la sección 3 se presenta el esquema de servicios para TVDi basados en servicios web REST-JSON. En la sección 4 se presentan los resultados más relevantes del escenario de experimentación realizado en la Universidad del Cauca. En la sección 5 se muestran las pruebas de tráfico y consumo de memoria sobre los servicios desarrollados a partir del esquema. Por último, en la sección 6 se muestran las conclusiones y trabajos futuros derivados del presente trabajo.

2. Marco teórico

A continuación, se presentan algunos conceptos relevantes, que se tuvieron en cuenta para el desarrollo de la presente investigación. Dentro de estos se encuentran: CAV, Servicios Web, REST, JSON.

2.1. CAV

Una CAV es definida como “uno o varios grupos de individuos que están vinculados por intereses en común, que tienen la capacidad de poseer una fuerza de voluntad autónoma y están comprometidos en un proceso de aprendizaje continuo, cuyo principal objetivo es el de construir conocimientos de forma compartida utilizando las TIC como un medio de expresión, como herramienta de comunicación, como recurso didáctico e incluso como instrumento de gestión” [5]. Para el caso de una CAV en TVDi, se plantea que el proceso de construcción de conocimiento sea impulsado por los contenidos multimedia aportados por los miembros de

la comunidad, así como por el conjunto de servicios que buscan promover la participación en torno a esos contenidos [19].

2.2. Servicios web

Según la W3C, un servicio web es un sistema software diseñado para soportar una interacción interoperable entre diferentes equipos en red [20]. Estos suelen ser librerías (API's) que son accedidas desde Internet y se ejecutan en el equipo que los aloja, cumpliendo una función determinada y permitiendo la integración con otros componentes o funcionalidades. Dentro de las implementaciones comunes de servicios web se encuentran SOAP y REST. El primero hace referencia al protocolo usado para la comunicación entre cliente y servidor intercambiando mensajes basados en XML (WSDL), mientras que en el segundo caso los mensajes son por lo general en formato JSON. En ambos casos tanto el cliente como el servidor deben conocer el formato de los mensajes para poder encapsular y des-encapsular peticiones y respuestas [21].

2.3. REST

El estilo arquitectónico Representational State Transfer (REST, por sus siglas en inglés), plantea una arquitectura cliente-servidor, en la cual un servicio es visto como un recurso y es identificado a través de una dirección Uniform Resource Locator (URL, por sus siglas en inglés), mediante la cual puede ser consumido. Para acceder a estos servicios web, se hace uso de mensajes en formato simple, los cuales se intercambian entre cliente y servidor [22]. REST define a partir de HTTP, cuatro métodos: GET, PUT, DELETE y POST, de los cuales los más utilizados son: GET y PUT. El primero de los métodos es usado para enviar la representación de un recurso o servicio al cliente, mientras que el otro es usado para transferir el estado de un cliente al recurso [23]. Para el intercambio de información entre cliente y servidor a través de REST, se puede hacer uso de diversos formatos y lenguajes: XML, HTML, JSON.

2.4. JSON

JSON es un formato ligero basado en de texto, cuya sintaxis es tomada de JavaScript. Debido a su sencillez es fácil generar y procesar un documento con este formato [22]. JSON usa convenciones para el manejo de datos, que son comunes a la familia de lenguajes: C, C++, Java, Perl, Python, etc. Lo anterior hace que JSON sea ideal para el intercambio de datos entre aplicaciones cliente servidor [24]. Un mensaje JSON está constituido por dos estructuras básicas [25]: la primera es una colección de estructuras nombre-valor, las cuales son conocidas en varios lenguajes como: diccionarios, tablas, hash, listas de claves o arreglos asociativos; y la segunda es una lista ordenada de valores (arreglos, vectores, listas, etc.). Estas estructuras son usadas para conformar los mensajes de intercambio entre cliente y servidor, en los cuales se define un protocolo interno con la representación: palabra clave - valor.

El presente trabajo hace uso de las definiciones anteriores, al proveer un conjunto de servicios basados en los conceptos de la Web 2.0 y vincularlos al contexto de la televisión digital interactiva, con el ánimo de promover la participación y, por ende, la generación de conocimiento alrededor de una CAV. Estos servicios fueron implementados usando el estilo arquitectónico REST y el lenguaje JSON como formato para el intercambio de mensajes.

3. Esquema de servicios para televisión digital interactiva

Dentro del proyecto ST-CAV se escogió un conjunto de servicios (tablón de mensajes o micro-blog, chat, acceso a correo electrónico), tomados de la Web 2.0 para dar soporte a las CAV en televisión, los cuales fueron diseñados e implementados de acuerdo al estilo arquitectónico REST-JSON. A continuación, se presentan las condiciones de diseño de estos servicios y el escenario de experimentación usado para los mismos.

Considerando que los mensajes intercambiados a través de REST deben contener la información necesaria para el funcionamiento de cada servicio en el escenario de televisión, es importante definir dentro del formato de los mensajes JSON, el conjunto de parejas nombre-valor relacionadas con la funcionalidad de los servicios. En la figura 1 se presenta un ejemplo de mensaje JSON perteneciente al servicio de tablón de mensajes del proyecto ST-CAV. En este mensaje “nombre” puede hacer referencia a los atributos: *login*, mensaje, hora; mientras que “valor” se refiere a una cadena de texto asociada a alguno de los atributos mencionados.

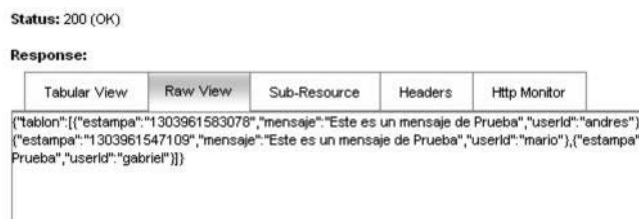


Figura 1. Mensaje en formato JSON.

En TVDi los servicios son consumidos mediante el canal de retorno usando el protocolo IP, e integrados por el STB (*Set-top box*) o dispositivo móvil en la interfaz del televisor, o en la pantalla del dispositivo móvil. Los mensajes a intercambiar entre los clientes de televisión y el servidor de aplicaciones, contienen características funcionales más no de presentación, razón por la cual cada cliente (dispositivo móvil o STB), recupera la información a partir de los mensajes e implementa de manera independiente la lógica de presentación.

En la figura 2 se presenta el esquema de consumo de servicios propuesto para el contexto de las CAV en TVDi, considerando el estilo arquitectónico REST-JSON. Cada servicio es representado como una instancia o recurso: R1, R2, ..., RN, dentro del repositorio de servicios o servidor de aplicaciones, de tal forma que estos se encuentran en la capacidad de interactuar entre sí para procesos de composición.

A cada recurso se le asigna una dirección URL desde la cual, el cliente: 1, 2, ..., N, puede acceder vía Internet y recibir el mensaje correspondiente a cada recurso. El mensaje recibido por cada cliente contiene una estructura con un conjunto de parejas nombre-valor, conocidas por los clientes y el servidor de aplicaciones (figura 1). Tales estructuras son desencapsuladas por cada cliente, y de acuerdo al nombre del atributo, son clasificadas funcionalmente y presentadas en la interfaz correspondiente. Cada tipo de cliente (STB, móvil) debe contar con la librería apropiada según las características de su hardware, para así permitir la interpretación de los mensajes JSON.

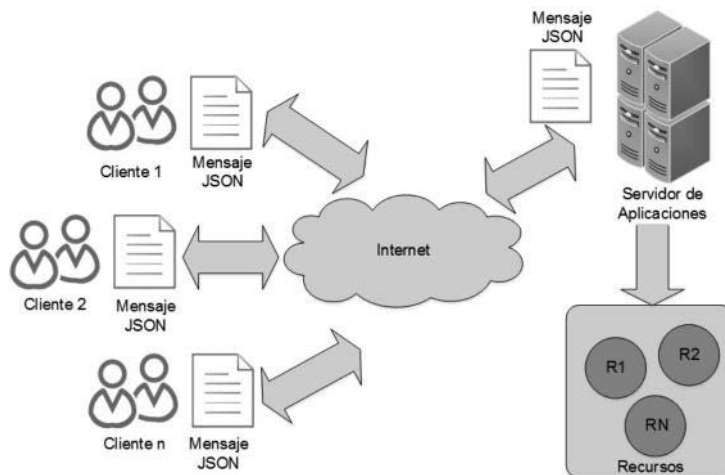


Figura 2. Esquema de consumo de servicios REST-JSON.

3.1. Escenario de experimentación

El escenario de experimentación utilizado para la implementación y despliegue de los servicios (figura 3), está formado por los siguientes componentes: servidor de difusión, servidor de aplicaciones, STB TDT – MHP (*Multimedia Home Platform*), dispositivo móvil DVB-H (*Digital Video Broadcasting Handheld*), *Access Point* y *Switch*. A continuación, se describe el funcionamiento de estos componentes.

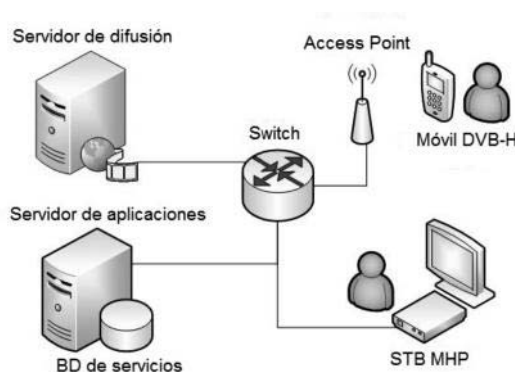


Figura 3. Escenario de experimentación.

El servidor de difusión es el encargado de almacenar, adecuar y transmitir el contenido multimedia vía *Broadcast*, para lo cual cuenta con la herramienta libre OpenCaster [26] y con la tarjeta moduladora de televisión: Dektec DTA 110T. El servidor de aplicaciones corresponde al equipo de cómputo encargado de almacenar los servicios, recibir y procesar las peticiones REST por parte de los clientes. En el ámbito del proyecto ST-CAV, se utilizaron dos

servidores para el despliegue de los servicios, un servidor basado en lenguaje Java (Glashfish) y un servidor basado en lenguaje Python (web.py). Ambos servidores cuentan con el soporte para la creación de aplicaciones usando el estilo arquitectónico REST-JSON. El *Switch* y El *Access Point* tienen la función de distribuir Internet de forma cableada e inalámbrica al STB y al dispositivo móvil respectivamente, permitiendo la conexión por canal de retorno.

El STB MHP de TDT o cliente de televisión, es el encargado de recibir la señal de televisión vía *Broadcast* y adecuarla para ser presentada en la pantalla del televisor. De igual forma, el STB puede acceder a los recursos del servidor de aplicaciones mediante la URL designada por cada servicio, para lo cual usa las librerías de conexión que provee el middleware MHP y la librería RestClient[27], desarrollada para escenarios JavaME y usada para las peticiones y conexiones REST. Cada vez que accede a un recurso, el STB recibe un mensaje en formato JSON, el cual es interpretado usando la librería compatible con MHP: json-simple.

A partir de la información interpretada del mensaje, el STB presenta en la pantalla del televisor. El dispositivo móvil es el encargado de recibir la señal de televisión DVB-H, la cual es adaptada en el servidor de difusión. Asimismo, este componente se encarga de acceder a los servicios de la CAV mediante la URL de cada recurso. Cada vez que el dispositivo móvil accede a un recurso, recibe un mensaje en formato JSON, lo procesa y lo presenta en la pantalla del dispositivo. Este mensaje contiene la información del servicio, sin incluir la lógica de presentación. El dispositivo móvil debe soportar el estándar DVB-H, así como el estándar 802.11 para conexiones inalámbricas y las librerías necesarias para hacer peticiones HTTP de tipo GET y PUT y para decodificar los mensajes en formato JSON. Los dispositivos móviles usados para las pruebas de consumo de servicios fueron: Nokia N96, N95 (compatibles con el estándar DVB-H).

4. Resultados

En esta sección se presentan los resultados de implementación y evaluación de los servicios interactivos del escenario de experimentación. Dentro de estos servicios se destacan principalmente tres: micro-blog o tablón de mensajes, chat y acceso a correo electrónico.

En las figuras 4, 5 y 6, se presentan diferentes versiones de interfaz del proyecto ST-CAV. Dentro de estas se pueden visualizar a la izquierda el contenido multimedia transmitido desde el servidor de difusión y a la derecha una ventana desplegable con un conjunto de pestañas, cada una correspondiente a un servicio de soporte desplegado y consumido a partir del Servidor de Aplicaciones. Esta configuración obedece a las recomendaciones para despliegue de contenidos para televisión digital [28]. La ventana desplegable o ventana de servicios puede ocultarse a la derecha de la pantalla, de tal manera que el tamaño del contenido multimedia se adapta al tamaño de la pantalla. Esta ventana permanece siempre activa en la interfaz de televisión y es independiente del contenido multimedia que se esté transmitiendo. Para navegar a través de la pantalla y de los servicios, se hace uso de las flechas y del botón OK del control remoto.

La ventana desplegable presenta información relacionada con la lógica de los servicios de apoyo al contenido (foro, chat, acceso a correo electrónico). Estos servicios buscan facilitar la interacción de los usuarios en torno a la comunidad académica, propiciando la generación de conocimiento alrededor de las temáticas de la CAV, sin embargo, es necesario tener en cuenta que el tamaño de la fuente debe obedecer a las recomendaciones para presentación de



Figura 4. Interfaz principal del proyecto ST-CAV.

contenidos de televisión [28]. Así, los servicios fueron diseñados para manejar una cantidad reducida de texto y adaptarla al tamaño de la ventana de servicios, de tal forma que este pueda ser visualizado fácilmente a 3m de distancia. Dado que los servicios presentes en la ventana desplegable son independientes al contenido multimedia, reciben el nombre de servicios no asociados al contenido. De igual forma existen un conjunto de aplicaciones que hacen parte del contenido multimedia, tales como las encuestas y la información asociada al contenido multimedia. Estas aplicaciones no son consumidas a través del canal de retorno, sino que viajan con el contenido multimedia en el carrusel de objetos propio del estándar Digital Video Broadcasting (DVB, por sus siglas en inglés). A continuación se describen los servicios de micro-blog, chat y acceso a correo electrónico.

4.1. Servicios de tablón y chat

El servicio de tablón de mensajes o micro-blog (figura 5), consiste en un mini foro similar al “microblogging” de Twitter, en el cual los miembros de una CAV pueden publicar mensajes con un restringido número de caracteres (considerando el uso de control remoto), al mismo tiempo que están visualizando un programa de televisión. La interfaz del servicio de tablón de mensajes permite listar los últimos cinco mensajes de los miembros de la comunidad y navegar a través de ellos mediante las flechas del control. Para ingresar mensajes al tablón o micro-blog, se hace uso de las teclas numéricas y del botón OK del control.

Los mensajes JSON que se intercambian en este servicio constan de un arreglo de parejas nombre-valor: `userid`, `mensaje`, `estampa` (figura 6), las cuales contienen el identificador de usuario, el mensaje a publicar y un dato de tipo long que representa una estampa de tiempo para obtener la hora a la que fueron enviados los mensajes. El tamaño del arreglo de mensajes es de cinco teniendo en cuenta que se listan en pantalla los últimos cinco mensajes de la comunidad. El STB se encarga de procesar el mensaje JSON, obteniendo cada uno de los valores de las parejas y presentando la información del servicio en la pestaña correspondiente.

El servicio de chat por su parte, tiene un estilo y funcionamiento semejante al servicio de tablón de mensajes, con la diferencia que no incluye comentarios sobre las publicaciones hechas por los miembros de la comunidad.



Figura 5. Servicio de Micro-Blog o Tablón.



Figura 6. Mensaje JSON-Tablón.

4.2. Servicio de acceso a correo electrónico

El servicio de acceso a correo electrónico (figura 7), permite acceder a los encabezados de los mensajes del correo de Gmail, asociados a un miembro de la comunidad. La interfaz del servicio permite listar los últimos cinco mensajes de correo del miembro de la comunidad registrado y navegar a través de ellos mediante las flechas del control remoto. Para visualizar uno de los mensajes en detalle, se hace uso del botón OK del control.

Los mensajes JSON que se intercambian en este servicio constan de un arreglo de parejas nombre-valor con la información de los atributos del correo: fecha, asunto, encabezado del mensaje, remitente, etc., las cuales contienen la información de cada uno de los mensajes de la bandeja de entrada que están sin leer (figura 8). El tamaño del arreglo de mensajes de correo es de cinco, teniendo en cuenta que se listan en pantalla los últimos cinco mensajes de la comunidad. El STB se encarga de procesar el mensaje JSON, obteniendo cada uno de los valores de las parejas y presentando la información del servicio en la pestaña correspondiente. Para la implementación de este servicio en el servidor de aplicaciones, se hizo uso de la API gmail4j [29], la cual es compatible con el lenguaje JSON y permite obtener por defecto un conjunto de mensajes en este formato, a partir de los cuales se envían al cliente solo cinco.

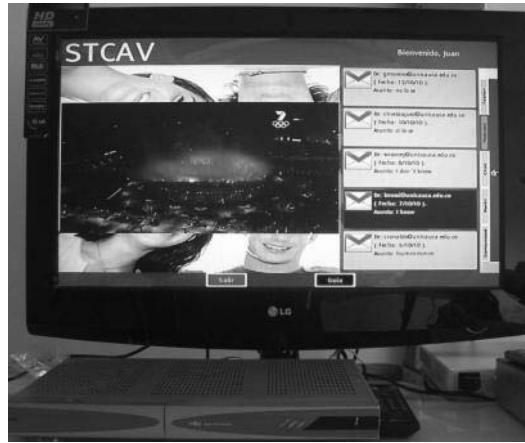


Figura 7. Servicio de acceso a correo.

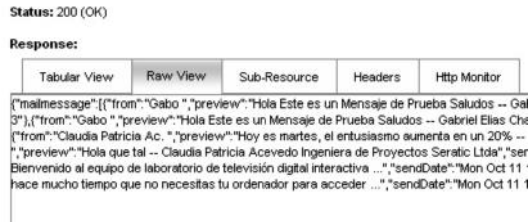


Figura 8. Interfaz de prueba del servidor–Correo.

4.3. Servicios desde el dispositivo móvil

Teniendo en cuenta el sistema operativo de los dispositivos DVB-H utilizados (N95 y N96), el cliente móvil se desarrolló usando el lenguaje Python a través de la librería PYS60, la cual es una implementación reducida del intérprete del lenguaje Python. Mediante el cliente desarrollado es posible invocar a los servicios de la CAV vía red inalámbrica usando la librería de conexión URLIB de Python. Una vez hecha la invocación a la URL del recurso o su servicio, se procede a la decodificación del mensaje JSON a través de la librería s60-json-library de Python [30]. Finalmente, la información obtenida del mensaje JSON es presentada en la pantalla del dispositivo (figura 9).

Dadas las ventajas del estilo arquitectónico REST-JSON, el consumo de servicios interactivos también puede realizarse en sistemas operativos como Android en el escenario de IPTV Móvil o WebTV. Lo anterior es posible gracias a la facilidad de procesamiento de los mensajes JSON y su compatibilidad con el lenguaje Javascript.

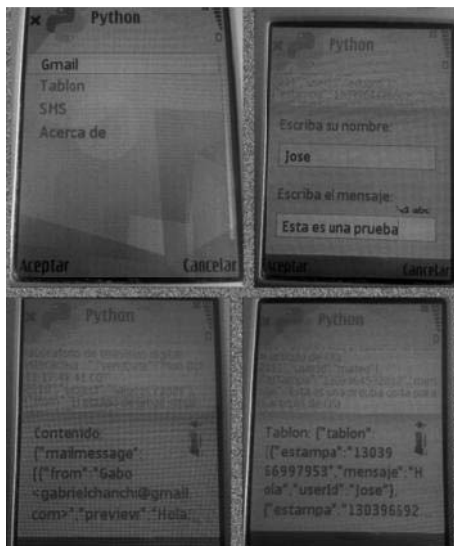


Figura 9. Servicio de Micro-Blog o Tablón.

5. Pruebas

En esta sección se presenta la evaluación de los servicios desarrollados usando el estilo arquitectónico REST-JSON. Esta evaluación fue realizada a través de pruebas de tráfico en la red y pruebas de consumo de memoria sobre el servidor de aplicaciones y sus servicios.

5.1. Análisis del tráfico de los servicios

El tráfico generado por los servicios de tablón de mensajes (microblog) y de chat corresponde a peticiones HTTP. La captura de este tráfico se realizó usando el analizador de protocolos Wireshark [31]. Se tomaron muestras con 1, 5 y 10, 20 y 30 usuarios pertenecientes a dos comunidades del proyecto ST-CAV. En la tabla 1 se presentan los tiempos de respuesta obtenidos en el lado del cliente para peticiones simultáneas a los servicios de tablón de mensajes y chat. En ambos casos, el tiempo de respuesta para un solo usuario es de 0,03 s, mientras que para 30 usuarios el tiempo de respuesta es de 1,58 s para el servicio de tablón y 1,50 s para el servicio de chat.

En la tabla 1 se observa que los incrementos de los tiempos de respuesta al aumentar el número de usuarios, son lineales para los dos servicios (figura 10). En el caso del servicio de tablón de mensajes, la pendiente estimada es de 0,053 segundos/usuario, mientras que, en el caso del servicio de chat, la pendiente de la curva estimada es de 0,051 segundos/usuario. El anterior factor permite determinar en promedio, el incremento en tiempo por cada usuario conectado a los servicios. Los anteriores datos están de acuerdo con los tiempos de respuesta en el procesamiento de un mensaje para el formato de intercambio JSON, los cuales oscilan alrededor de los 30 ms [33].

Tabla I. Tiempos de respuesta (seg)

Usuarios	Tablón	Chat
1	0,03	0,03
5	0,23	0,23
10	0,53	0,48
20	1,02	1,00
30	1,58	1,50
Pendiente (m)	0,053	0,051

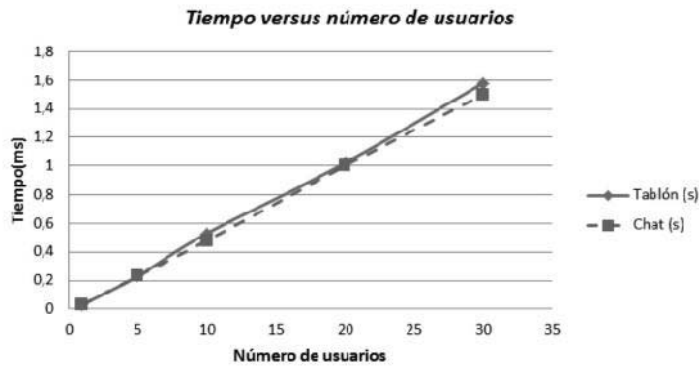


Figura 10. Tiempos de respuesta servicios chat y tablón.

De igual manera, en la figura 11 se presentan los tiempos de respuesta en el lado del servidor o tiempos en servir una petición. Estos valores son obtenidos al aplicar 100 conexiones secuenciales al servicio de tablón, desde la herramienta Apache Benchmark [32]. Según la figura 11, el tiempo en servir una petición es cercano a los 2 milisegundos, salvo las primeras peticiones en las cuales el servidor de aplicaciones se está estabilizando. Lo anterior está de acuerdo con lo presentado en [33], en donde se evalúan los tiempos de respuesta en el procesamiento de un

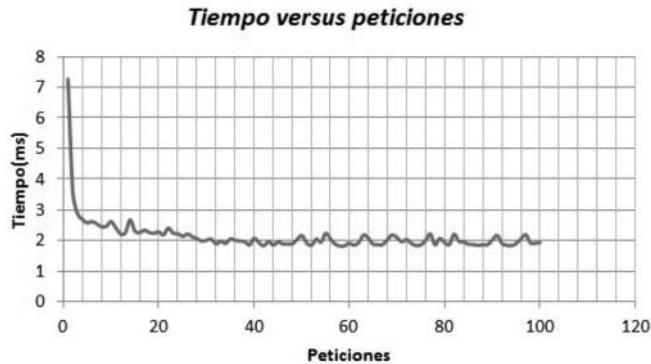


Figura 11. Tiempo en servir peticiones.

mensaje de un servicio REST-JSON JSON estándar con respecto a SOAP, obteniendo valores cercanos a los 30 milisegundos. El hecho de que los tiempos sean inferiores a los obtenidos con un servicio REST-JSON estándar, permite verificar la pertinencia de aplicación del esquema en escenarios limitados como el de TVDi.

Respecto al comportamiento en tamaño de los paquetes de tráfico, se encontró el mismo patrón para los dos servicios y para cualquier número de usuarios (figura 12). De acuerdo a esta gráfica, el 60% de los paquetes tiene un tamaño de 60 Bytes, el 20% de 62 Bytes y el 20% restante de 174 Bytes. De la figura 12 también se observa que el número total de paquetes enviados desde el servidor alcanza un máximo de 180 bytes con 30 usuarios, valor que es pequeño comparado con el tráfico generado por el formato de intercambio XML, en el que se triplica el número de bytes transmitidos para la misma cantidad de información y el mismo número de usuarios [34]. Lo anterior permite corroborar que JSON es un formato adecuado para el intercambio de datos en escenarios limitados como la televisión.

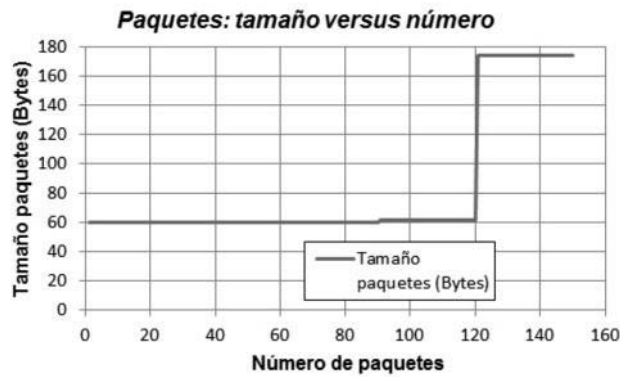


Figura 12. Tráfico para el servicio de chat con 30 usuarios simultáneos.

El número de paquetes para los dos servicios se encontró que es exactamente igual (tabla 2). Asimismo, se observa que el número de paquetes se incrementa de una manera lineal con el aumento de los usuarios (figura 13). De acuerdo a la pendiente de la curva estimada para los datos de la tabla 2, el incremento en número de paquetes por cada usuario conectado es de 5. Este valor es menor comparado con el tráfico generado por el formato de intercambio XML, en el que la cantidad de información sería mayor a quince paquetes por usuario [34].

Tabla II. Número de paquetes

Usuarios	Número de paquetes Tablón y chat
1	5
5	25
10	50
20	100
30	150
Pendiente (m)	5

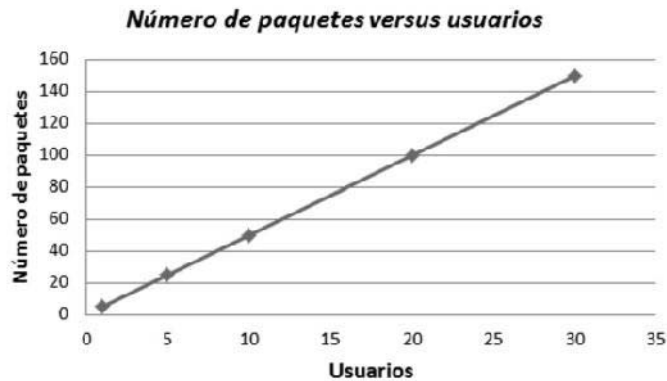


Figura 13. Número de paquetes vs usuarios.

5.2. Pruebas de consumo de memoria

Para realizar las pruebas de consumo de memoria en el lado del servidor de aplicaciones, se usó la herramienta de medición de estrés Apache Benchmark (ab) [32], la cual permite simular peticiones HTTP simultáneas y secuenciales. Asimismo, se desarrolló en Python una herramienta para monitorear el consumo de memoria del servidor (figura 14). Esta herramienta genera reportes del consumo de memoria RAM (Random Access Memory) y el porcentaje de consumo de CPU (Central Processing Unit), antes, durante y después de recibir las peticiones simuladas de la herramienta apache benchmark, usando para ello los comandos de consumo de memoria del sistema operativo Linux. En la figura 15 se presenta el porcentaje de uso de %CPU a lo largo del tiempo, al realizar 500 conexiones simultáneas al servicio de tablón de mensajes, mediante la herramienta ab. El servidor de aplicaciones web.py se ejecutó sobre un procesador doble núcleo con 4 Gb de memoria RAM, en el sistema operativo Linux Xubuntu 14.10.

```

archivol = open('servicios.csv', 'w' )
archivol.write("SERVICIOS;CPU;MEM\n")
cont1=0
while(True):
    comando = "ps -aux | grep servicios.py | grep -v grep | awk {'print $3,$4'} "
    p = os.popen(comando)
    out = p.read()
    lista = out.split()
    i = 0
    t = len(lista)

    while(t >= 1):
        cad1=lista[i]
        cad2=lista[i+1]
        cad1=cad1.replace(".",",")
        cad2=cad2.replace(".",",")
        fila = str(cont1)+";"+cad1+";"+cad2+"\n"
        print "la lectura es",fila
        archivol.write(fila)
        cont1 = cont1+1
        i = i+2
        t = t-2

    time.sleep(1)
archivol.close()
    
```

Figura 14. Herramienta de medición de memoria.

De acuerdo a la figura 15, cuando el servidor de aplicaciones se encuentra sin recibir peticiones, su porcentaje de consumo de memoria es inferior a 0,5 %. De igual manera, cuando se lanzan las 300 peticiones simultaneas sobre el segundo 5, el porcentaje del consumo de CPU se eleva hasta un 4%. Despues del segundo 5, el porcentaje de uso de CPU disminuye, debido a que el servidor de comienza a estabilizarse paulatinamente.

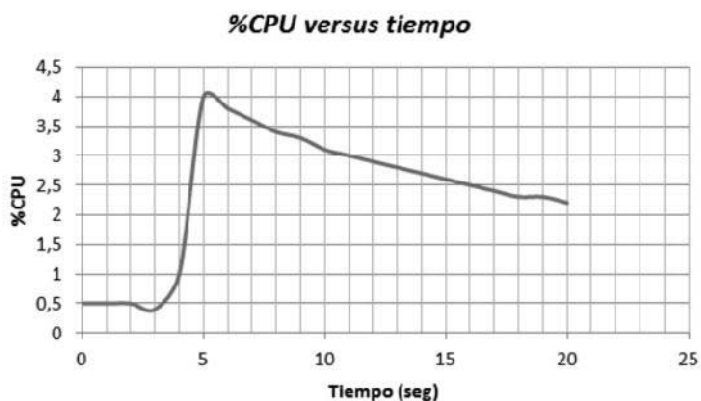


Figura 15. Porcentaje de consumo de CPU.

En lo que respecta a la memoria RAM utilizada por el servidor de aplicaciones, esta se mantiene en un valor invariante de 0.3 Gb a lo largo de todo el tiempo (figura 16).

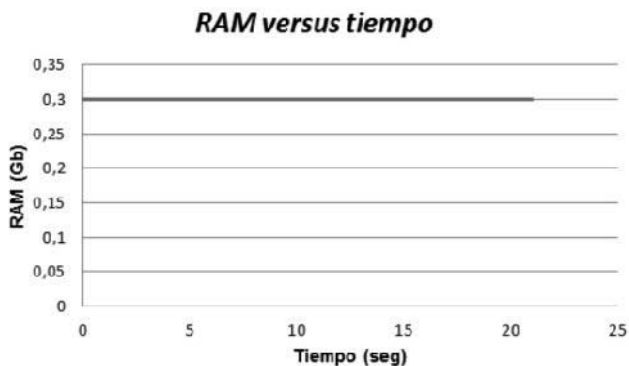


Figura 16. Cantidad de memoria consumida.

6. Conclusiones y trabajos futuros

El esquema de diseño y despliegue presentado permite la convergencia de servicios de Televisión (T-Learning) y servicios Internet (Web 2.0), mezclando las ventajas de interactividad en TD con la flexibilidad de los servicios de Internet. Lo anterior permitió que el proyecto

fuera validado en entornos educativos de la Universidad del Cauca, con el propósito de apoyar el desarrollo de prácticas de laboratorio de un curso del Departamento de Química. Como conclusión de lo anterior es importante destacar que, si bien los servicios se desplegaron de manera adecuada en el entorno de televisión, aún son necesarios esfuerzos investigativos para agilizar el acceso a los servicios, considerando las limitaciones de los mandos de entrada de los escenarios de televisión.

El estilo arquitectónico REST-JSON permite un diseño sencillo y flexible para servicios consumidos a través de Internet, lo cual facilita la integración de estos en escenarios de televisión. El diseño e implementación de servicios REST-JSON es independiente de la lógica de presentación en la interfaz del televisor o del dispositivo móvil, lo cual permite extender el escenario de aplicación de los servicios a otros entornos como IPTV.

El esquema de consumo de servicios presentado en este trabajo, así como las directrices de usabilidad presentadas en [13] y derivadas del proyecto ST-CAV, son un aporte importante para diseñadores, desarrolladores y demás actores de la cadena de negocios de TVDi, pues sirven como guía para el diseño, la implementación y el despliegue servicios flexibles y aplicaciones usables en TVDi.

Este trabajo representa un aporte significativo para el proyecto ST-CAV, al proveer un conjunto de servicios de Internet, los cuales buscan promover la participación y generación de conocimiento en comunidades académicas virtuales de televisión. Finalmente, este trabajo representa un punto de partida para proyectos en el que se deseen integrar servicios de Internet, con la flexibilidad que provee el protocolo REST-JSON, en otros ambientes de aplicación de la TVDi, tales como T-Gobierno y T-Comercio.

Asimismo, de acuerdo al análisis de tráfico realizado y presentado en la Tabla 2, se concluye que el consumo de servicios bajo el esquema REST-JSON, tiene un comportamiento lineal con el aumento del número de usuarios, específicamente en cuanto al tamaño de los paquetes, el número de paquetes y los tiempos de respuesta, siendo este el último parámetro el que más puede variar teniendo en cuenta otros servicios o usuarios que soporte la red de manera simultánea.

El análisis de tráfico realizado sobre los servicios construidos, permite evidenciar el bajo consumo de recursos, puesto que, para el caso de 30 usuarios simultáneos del servicio de chat, se genera un tráfico del orden de las decenas de bytes. De igual forma, los otros parámetros como el tamaño de los paquetes, el número de paquetes y el tiempo en servir peticiones, están en los órdenes de los bytes, decenas y *ms* respectivamente. Los anteriores valores no son críticos teniendo en cuenta las capacidades de las redes actuales, las cuales son capaces de manejar transmisiones que están en el orden de los megas en tiempo real. Asimismo, los valores obtenidos permiten corroborar que el formato de intercambio de datos JSON es adecuado en escenarios limitados, en comparación con el formato XML [34].

7. Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado en la Universidad del Cauca y ha contado con la financiación parcial del proyecto ST-CAV: Servicios de T-Learning para el soporte de Comunidades Académicas Virtuales, Cod 1103 489 25425, el cual es financiado por Colciencias y el SENA. De igual manera, cuenta con el apoyo de los proyectos de investigación: UsabiliTV (financiado por Colciencias y el MEN. ID 1103 521 28462) y RedAUTI (financiado por CYTED. ID

P511RT0184). Asimismo, este trabajo fue financiado por el programa de Doctorados Nacionales de Colciencias (Convocatoria 528 de 2011). Finalmente, se ha contado con el apoyo de un investigador del grupo de investigación GITUQ de la Universidad del Quindío.

Referencias

- [1] G. Campos, D. Espinosa, P. Gutiérrez, y F. Martínez, “Televisión Digital en Colombia: Posibilidad para diseñar aplicativos interactivos”. *Revista Tecnología*, Volumen 10, Número 2, 2011, pp. 85-91.
- [2] E. O. Tulande, D. F. Rojas, *Recomendaciones para la generación y distribución de contenidos educativos orientados a Televisión Digital Interactiva*, Tesis de pregrado, Departamento de Telemática, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia, 2009.
- [3] T. Itagaki, J. Cosmas, y M. Haque, “An interactive digital television system designed for synchronised and scalable multi-media content over DVB and IP networks”, *Multimedia and Expo ICME IEEE International Conference on*, Volumen 3, 2004, pp. 2155-2158.
- [4] G. Prado y S. Zorzo, “Interactive Service Provider Architecture for Interactive Digital Television systems”, *International Conference on Computer Information Systems and Industrial Management Applications (CISIM)*, Cracovia, Polonia, 2010, pp. 541-546.
- [5] M. Blando, *Comunidades Académicas Virtuales: Compartir para mejorar*, México, 2003, disponible en: <http://www.te.ipn.mx/comunidadesvirtuales/>.
- [6] L. Ávila, A. Madrid y M. Echeverría, “Construcción de comunidades virtuales para la investigación”, *Revista de Universidad y Sociedad del Conocimiento*, Volumen 6, Número 1, 2009, pp.1-12.
- [7] T. O'Reilly, “What is Web 2.0: design patterns and business models for the next generation of software”, *Revista Communications & Strategies*, Volumen 1, Número 65, 2007, pp. 17-37.
- [8] A. Vela, H. Cerón, *Plataforma móvil para redes sociales*, Tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Departamento de Telemática, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia, 2009.
- [9] Ye Jun, Li Zhishu, y Ma Yanyan, “JSON Based Decentralized SSO Security Architecture in E-Commerce”, *International Symposium on Electronic Commerce and Security*, Guangzhou, República Popular de China, pp. 471-475.
- [10] S. Downes, L. Belliveau, S. Samet, A. Rahman, y R. Savoie, “Managing digital rights using JSON”, *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) 2010 7th IEEE*, 2010, pp. 1-10.
- [11] S. Cholia, D. Skinner, y J. Boverhof, “NEWT: A RESTful service for building High Performance Computing web applications”, *Gateway Computing Environments Workshop (GCE)*, 2010, pp. 1-11.
- [12] G. Chanchí, W. Campo, J.P. Amaya, J.L. Arciniegas, “Esquema de servicios para Televisión Digital Interactiva, basados en el protocolo REST-JSON”, *Congreso Internacional de Telemática*, Gramado, Brasil, 2011.
- [13] A.F. Solano, G. E. Chanchí, C. Collazos, J.L. Arciniegas, C. Rusu, “Directrices para el diseño de aplicaciones usables en entornos de televisión digital interactiva”. *Revista Ingeniería y Universidad*, Volumen 18, Número 1, 2014, p.p. 103-119.
- [14] STCAV – *Servicios de T-Learning para el soporte de Comunidades Académicas Virtuales*, disponible en <http://www.unicauca.edu.co/stcav/>.
- [15] J. Amaya, F. Urbano, W. Campo, y J. Arciniegas, “Infraestructura Tecnológica para un laboratorio experimental de Televisión Digital Interactiva”, *Congreso Colombiano de Comunicaciones IEEE-Colcom*, 2008.
- [16] W. Ebner, U. Bretschneider, M. Leimeister, y H. Kremer, “Virtual Communities for Innovations: Users' Requirements for the Development of an Academic SAP User Group”, *Hawaii International Conference on System Sciences*, 2008.

- [17] Z. Gang, W.G. Lin, Y. Zongkai, L. QingTang, W. Ming, y Li Rong, "Research and Design of Interactive IPTV based E-Learning System", *2006 7th International Conference on Information Technology Based Higher Education and Training*, 2006, pp. 536-540.
- [18] W. Campo, *Modelo de Tráfico para Servicios Interactivos de una Comunidad Académica Virtual, con contenidos de Audio y Video de Alta Calidad*, Tesis de Doctorado en Ingeniería Telemática, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, 2014.
- [19] G. Chanchí, W. Campo y J. Arciniegas, "Directrices para el soporte de Comunidades Académicas Virtuales en TDi", *VI Congreso Internacional de Telecomunicaciones – CITTEL*, La Habana-Cuba, 2010.
- [20] R. Navarro, *REST vs Web Services*, Julio de 2006, disponible en: <http://users.dsic.upv.es/~rnavarro/NewWeb/docs/RestVsWebServices.pdf>.
- [21] Cessare Pautasso, "REST vs.SOAP:Making the Right Architectural Decision", *SOA Symposium*, Amsterdam, 2008.
- [22] S. Tyagi, *RestFul Web Services*, Agosto de 2006, disponible en: <http://www.oracle.com/technetwork/articles/javase/index-137171.html>.
- [23] T. Fredrich, *RESTful Service Best Practices*, Mayo de 2012, disponible en: http://www.restapitutorial.com/media/RESTful_Best_Practices-v1_1.pdf.
- [24] Ecma Intenational, *The JSON Data Interchange Format*, ECMA-404, Octubre de 2013, disponible en: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-404.pdf>.
- [25] M. Droettboom, *Understanding JSON Schema*, Octubre de 2015, disponible en: <http://spacetelescope.github.io/understanding-json-schema/UnderstandingJSONSchema.pdf>.
- [26] Avalpa Digital Engineering, *OpenCaster 3.2.2: the free digital tv software*, disponible en: <http://www.avalpa.com/the-key-values/15-free-software/33-opencaster>.
- [27] C. Hartmann, *RestClientlibrary*, Diciembre de 2009, disponible en: <http://www.acidum.de/2008/12/29/j2me-rest-client>.
- [28] W. Campo, G. Chanchí y J. Arciniegas, "Recomendaciones para el despliegue de contenidos de T-Learning", *XI Congreso Internacional-Interacción 2010*, Valencia-España, 2010.
- [29] T. Varaneckas, *Gmail4j*, disponible en: <https://github.com/spajus/gmail4j>.
- [30] P. Wach, *s60-json-library*, disponible en: <http://code.google.com/p/s60-json-library/>.
- [31] G. Combs, *Analizador de protocolos wireshark*, disponible en: <https://www.wireshark.org/>.
- [32] The Apache Software Foundation, *Apache benchmark*, disponible en: <http://httpd.apache.org/docs/2.2/programs/ab.html>.
- [33] R. Van der Broek, *Comparing the performance of SOAP and REST PHP clients*, Septiembre de 2015, disponible en: <http://referaat.cs.utwente.nl/conference/14/paper/7225/comparing-the-performance-of-soap-and-rest-php-clients.pdf>.
- [34] G. Mulligan, D. Graanin, "A Comparison of SOAP and REST Implementations of a service based interaction independence middleware framework", *Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference*, Austin-Texas, 2009.

Gabriel Elías Chanchí Golondrino

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca; magíster en Ingeniería Telemática de la Universidad del Cauca; candidato a Doctor en Ingeniería Telemática de la Universidad del Cauca; ha trabajado como docente universitario en cursos de Programación, Estructuras de Datos, Desarrollo de aplicaciones móviles y desarrollo de aplicaciones web. Entre sus campos de interés se encuentran los sistemas de recomendaciones, IPTV y los servicios interactivos en escenarios de televisión digital.

Contacto: gabrielc@unicauca.edu.co

José Luis Arciniegas Herrera

Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones; especialista en Redes y Servicios Telemáticos de la Universidad del Cauca; doctor en Ingeniería de Sistemas Telemáticos, Universidad Politécnica de Madrid; docente adscrito al Departamento de Telemática de la Universidad del Cauca; entre sus campos de interés están el Desarrollo del Software Evolutivo, Arquitectura del Software, Sistemas de Tiempo Real y la Televisión Digital Interactiva; forma parte del Grupo GIT de la Universidad del Cauca donde ha liderado varios proyectos de televisión Digital interactiva, EDiTV, MT2TDi y ST_CAV. Contacto: jlarci@unicauca.edu.co

Wilmar Yesid Campo Muñoz

Doctor en Ingeniería Telemática; magíster en Ingeniería, Área Telemática; ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca; Ha Ejercido profesionalmente como investigador en diferentes proyectos en el ITEC Telecom, en la Universidad del Cauca y en la Universidad del Quindío donde se encuentra actualmente vinculado como docente de planta; forma parte del grupo GITUQ de la Universidad del Quindío; entre sus campos de interés se encuentran: IPTV, sistemas de teletráfico, redes de telecomunicaciones avanzadas y televisión digital Interactiva y la Telemedicina. Contacto: wycampo@uniquindio.edu.co

Cargador Manual de Baterías: Prototipo Académico

Manual Battery Charger: an Academic Prototype

John Sneider Vanegas Varon,¹ Marco Antonio Latorre González,²
José Danilo Rairán Antolines^{3,*}

Profesor en Universidad Distrital Francisco José de Caldas,^{1,2,3}

* correspondence email: drairan@udistrital.edu.co

Received: 24/08/2015. Modified: 14/10/2015. Accepted: 15/12/2015

Resumen

Contexto: Cuando se construye un cargador manual de baterías se garantiza una potencia de salida, pero normalmente se omite la eficiencia a la cual se hace la carga. Sin embargo, en el contexto actual de preocupación por el cambio climático, la selección entre un equipo u otro debe hacerse en términos del valor de la eficiencia.

Método: Se estiman las potencias de entrada y de salida, necesarias en el cálculo de la eficiencia. Estas estimaciones requieren la aproximación de la velocidad angular y del torque en una manivela, y del voltaje y la corriente en la batería, las cuales se realizan mediante un procedimiento experimental y el uso de un circuito diseñado para tal fin.

Resultados: Se construye un prototipo para dar un ejemplo de la medición de eficiencia, y se encuentra que mientras la potencia de entrada se acerca a 12 W, la potencia de salida es de 3 W, por lo cual la eficiencia es aproximadamente 25%.

Conclusiones: El método de medición propuesto permite estimar la eficiencia de dispositivos manuales cargadores de baterías. Así, trabajos futuros pueden enfocarse en mejorar el diseño de los cargadores, para incrementar el valor de la eficiencia.

Palabras clave: estimación del torque, medida de eficiencia, recarga de baterías.

Abstract

Context: The building process of a manual charger allows designers to guarantee an output power, but the efficiency of the process usually remains unknown. However, in the current context of preoccupation for the climate change, the selection of a device should regard the efficiency value.

Method: This paper presents the input and output power estimation, as the efficiency computation requires. These estimations involve approximating angular speed and torque in a hand crank, as well as voltage and current in the battery, which depends on an experimental procedure and the use of a circuit designed for that purpose.

Results: The design and building of a prototype allow authors to present an example of the efficiency measurement, which resulted in an input power approaching 12 W, whereas the output power is 3 W, thus the efficiency approximates 25%.

Conclusions: The proposed method of measurement enables the estimation of efficiency for manual battery chargers. Thus, future works can focus efforts on improving the design of the chargers in order to increase the efficiency value.

Language: spanish.

Keywords: battery recharge, efficiency measurement, torque estimation.

Open access



Citación: Vanegas, J. S., Latorre, M. A. y Rairán, J. D. (2016). Cargador manual de baterías: prototipo académico. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 83-95

© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a06>

1. Introducción

Regulaciones como la política nacional de conservación de 1978 y la política energética de Estados Unidos de 1992 y de 2005, según se reporta en [1], tienen como finalidad incentivar el uso eficiente de la energía y el desarrollo de energías renovables, en contraposición con los gases de efecto invernadero y a la volatilidad del costo de los combustibles fósiles. Por ende, este trabajo fue enfocado a la recuperación de energía a partir del movimiento.

Cualquier dispositivo que recupere energía está compuesto de tres componentes básicos: un transductor, el cual transforma energía a tipo eléctrico; un circuito controlador, que permite el paso de energía; y la batería, donde se almacena la energía eléctrica. Bajo el enfoque de recuperación de energía en este artículo se implementó un prototipo que utiliza el giro de una manivela, el cual es multiplicado en velocidad mediante un juego de engranajes. La energía se almacena en un juego de supercapacitores, los cuales cargan una batería según comando de un circuito de control. El giro de la manivela puede provenir del giro de una rueda en una bicicleta, donde se recuperaría parte de la energía utilizada por el usuario.

En la literatura científica se han reportado trabajos similares encaminados al transductor. A manera de ejemplo está la recuperación de energía del movimiento de una persona mientras camina [2], el aprovechar el movimiento de la rodilla con base en un juego de engranajes para mejorar la eficiencia [3], un transductor mecánico de movimiento vertical, el cual aprovecha la energía de un grupo de personas que generan un movimiento vertical mientras bailan y las traduce a rotación, produciendo entre 2 y 8 vatios por persona [4] y finalmente en [5] dispositivos que utilizan fricción y presión para activar los LED y otros dispositivos de bajo consumo con promedio de 44 mili-vatios.

Otra alternativa que se ha explorado para recuperar energía son los elementos piezoeléctricos resonantes y no resonantes, los cuales pueden generar potencia en el orden de los mili vatios y una potencia promedio de 10 mW recuperable por el movimiento de cada parte del cuerpo [6]; lo cual motivó a los autores de este artículo a desarrollar el dispositivo presentado.

En [7] se reporta que en la estación de Marunouchi en Tokio-Japón se llegó a recuperar hasta 10 kW/día, energía proveniente del paso de los pasajeros por la taquilla, con lo cual se alimentaron algunas lámparas en la misma estación. Un trabajo adicional en este sentido, busca utilizar la generación piezoeléctrica que puede darse en un peaje al paso de los vehículos [8], en este estudio se cuantifica la energía que se recuperaría por año, y si bien se reconoce que la tecnología no es madura, se promueve su utilización.

Referente a la batería se encuentran trabajos en la literatura cuya finalidad es conocer su capacidad de almacenamiento, como en [9], donde se recupera la energía de cada pisada de una persona. Esa energía sirve para alimentar algún dispositivo que se lleve puesto (*wearable devices*), para lo cual se asume una energía promedio por pisada. Además de la capacidad de la batería, según el trabajo en [10], es importante conocer las condiciones nominales para la carga de la batería, tal como el voltaje nominal de transferencia. Esta transferencia se realiza normalmente mediante el uso de un juego de condensadores, los cuales almacenan energía, y elevan su voltaje hasta el valor ideal, a través de un circuito electrónico que permite la transferencia de energía. Finalmente, en [11] los autores muestran un circuito controlador óptimo con el fin de minimizar las pérdidas de transformación.

2. Método

En esta sección se describe en primera instancia la batería a ser utilizada para almacenar energía y posteriormente se detalla el prototipo construido, el cual fue diseñado para medir potencia y energía en él, centrado en el proceso de la conversión de energía cinética a eléctrica y no en la selección de la fuente de energía cinética, la cual podría provenir a manera de ejemplo del giro en una bicicleta.

La eficiencia η se define como la relación entre la potencia de entrada *versus* la salida, este es el parámetro de diseño más importante, razón por la cual mide la potencia de entrada al dispositivo (la cual proviene de un movimiento giratorio), y la potencia de salida (es decir la velocidad con que se almacena energía en la batería).

La potencia de entrada ($p_m = \tau\omega$) requiere la medición de torque τ y la velocidad ω . El torque es medido indirectamente a partir de la medición de corriente eléctrica, como se presenta al final de esta sección, dado que la relación entre estas dos variables puede considerarse lineal para una máquina de corriente directa. De otra parte, la velocidad es medida con un encoder incremental, construido para tal fin. La potencia de salida ($p_e = vi$) requiere la medición del voltaje v y la corriente en la batería i . Estos dos parámetros son medidos a través de una resistencia de medida.

2.1. Caracterización de la batería

En este artículo se utilizó una batería NiMH tamaño AAA, con voltaje 1.2 V y capacidad de 700 mAh, lo cual equivale a $0.7(\text{A}) \times 3600(\text{s}) = 2520 \text{ C}$. Para analizar el comportamiento experimental de la batería se cargó totalmente y luego se descargó a través de una resistencia de 2 Ω (figura 1). El tiempo de descarga depende del valor de la resistencia de carga, y en menor medida de la temperatura y de las veces que se ha usado la batería [12].

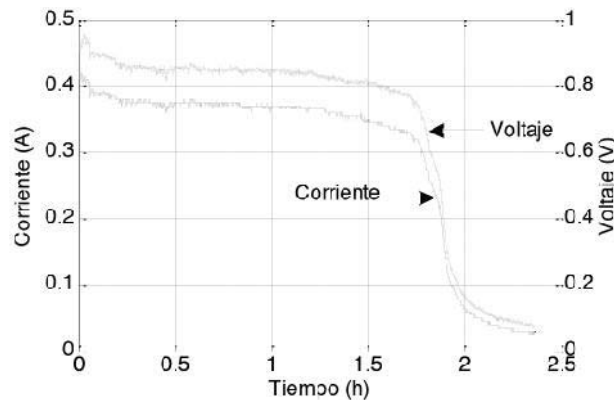


Figura 1. Descarga batería NiMH.

Nótese la caída de tensión, de 1.2 V nominales a 0.8 V, dado el tamaño de la resistencia, la cual se aproxima a la resistencia interna de la batería. El resultado de integrar la corriente es la carga eléctrica que entrega la batería, la cual es de 2900 C, es decir, superior al valor nominal.

La descarga de estas baterías comienza con un transitorio corto, de apenas unos minutos, donde se presentan voltajes y corrientes mayores al valor nominal. Posteriormente se presenta el comportamiento nominal, durante la mayor parte del ciclo de descarga. El comportamiento es constante por casi dos horas (figura 1), luego de lo cual se presenta una caída súbita, como también se indica en [12], cuando puede considerarse que la batería se ha descargado.

2.2. Descripción del prototipo

Del prototipo se distinguen tres partes: la mecánica, la electromecánica, y la electrónica. La primera parte está constituida por una manivela y un juego de engranajes; la segunda, por una máquina de corriente directa; y la tercera, por un supercapacitor, un tiristor, la batería y elementos para visualizar el estado de la carga. La energía fluye de la parte mecánica a la electrónica, pasando por la electromecánica. Así, un giro en la manivela produce corriente eléctrica en el generador, y finalmente la carga eléctrica es almacenada en la batería.

La conversión de energía cinética a eléctrica comienza con la acción de la manivela (parte 1.1, de la figura 2.b). La selección de este dispositivo tiene que ver con los valores bajos de potencia que se puede recuperar de un movimiento humano, lo cual obliga a descartar movimientos como el de los dedos, la cabeza, etc., para limitarse a un movimiento que se pueda dar por varios minutos sin cansancio o lesiones, en este caso el del brazo. La manivela tiene una longitud de 16 cm, este valor resultó de la experimentación; medidas inferiores dificultan el giro, mientras superiores causan molestias en el hombro.

La manivela hace girar un grupo de engranajes (parte 1.2), los cuales hacen que la máquina de corriente directa (parte 2) gire catorce veces más rápido que la manivela. Esta relación de transmisión equipara la velocidad que puede alcanzarse en la manivela (alrededor de 2 revoluciones por segundo), con la velocidad nominal del motor, es decir, 1800 revoluciones por minuto. Relaciones superiores o inferiores reducen la eficiencia de la conversión de energía, porque la máquina no trabajaría en condiciones nominales. La máquina de corriente directa es de modelo PC280LG-022, el cual fue seleccionado dada su popularidad y bajo costo. El trabajo de esta máquina es convertir la energía cinética en su eje a voltaje, es decir, trabaja como generador de energía eléctrica.

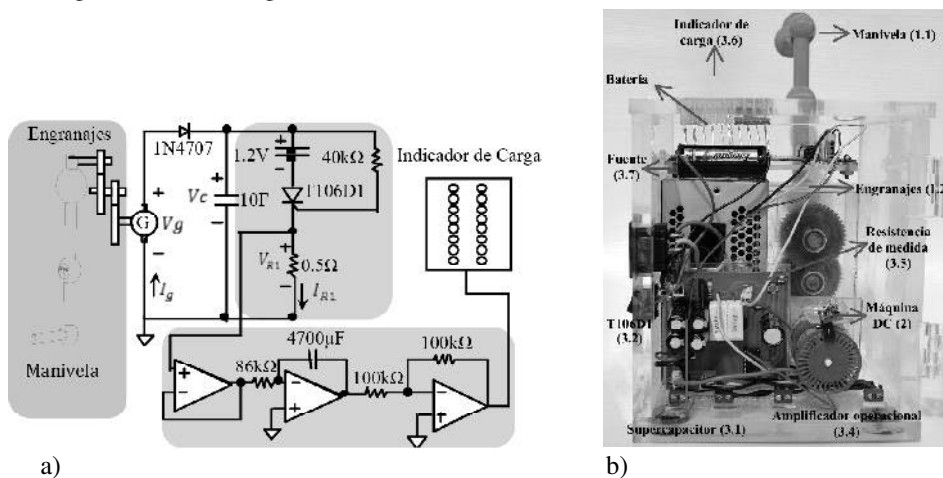


Figura 2. Prototipo para la recuperación de energía, a) esquema, b) prototipo.

El proceso de conversión de energía continúa con el almacenamiento de la carga eléctrica proveniente del generador en un supercapacitor (parte 3.1), el cual es indispensable como elemento intermedio de almacenamiento, porque soporta voltajes altos desde el generador, mientras que es recomendable recargar la batería solo cerca del valor nominal, el cual es ofrecido por el supercapacitor.

La selección del supercapacitor tiene que ver con el tiempo que una persona puede estar girando la manivela, y que aun así el cansancio le permite continuar hasta cargar la batería. Pruebas experimentales dejan ver que ese tiempo es aproximadamente de 80 s. En ese tiempo, y dado el tamaño del generador, es posible extraer una carga q de 35 C. La transferencia de carga comienza en 5.6 V, que es el máximo voltaje en los supercapacitores usados, y termina en 2.1 V, que es el voltaje al cual se iguala la tensión en la batería y el supercapacitor. Así dado que $C=q/\Delta V (F)$, entonces $C=10 F$.

La carga acumulada en el supercapacitor es transferida a la batería, con el comando del tiristor T106D1 (parte 3.2), el cual requiere de un juego de resistencias para mantener el circuito abierto, para que inicialmente no se transfiera carga a la batería (parte 3.3). La conducción comienza cuando se alcanza un umbral de 5.6 V en el supercapacitor, el cual corresponde al voltaje máximo de este dispositivo. En ese momento el tiristor permite el flujo de carga hacia la batería, hasta cuando ya no se transfiere más carga del supercapacitor a la batería, y entonces el tiristor abre el circuito.

En el momento de la transferencia de la carga hacia la batería, y con el propósito de visualizar el estado de la carga, se utilizan dos amplificadores operacionales (parte 3.4). El primero es un seguidor de voltaje, el cual sensa la tensión en la resistencia de medida R1 de 0.5 Ω (parte 3.5). La tensión en el seguidor alimenta un segundo operacional, configurado como integrador. La constante de tiempo de ese integrador es RC, donde $R=86 k\Omega$ y $C = 4.7 mF$, según indica la parte a) de la Figura 2, por tanto, esa constante es 404.2 s. El propósito de esta constante es hacer que la carga nominal de la batería, 2520 C, corresponda con el voltaje máximo en el indicador, es decir, 5 V.

El estado de carga es visualizado mediante el manejo de voltaje que hace el integrado lm3914, el cual sirve como vúmetro. Se utilizan dos de estos circuitos, uno para la salida del integrador del párrafo anterior y otro para la tensión en el supercapacitor. Cada integrado activa proporcionalmente a su voltaje de entrada entre uno y diez leds (parte 3.6). Estos leds forman una escala de colores: rojo para la carga mínima, amarillo para la carga media, y verde para el máximo de carga.

Véase que el prototipo incluye una fuente de computador (parte 3.7), como se ve en la parte b) de la figura 2, esta tiene por objetivo alimentar los amplificadores operacionales, los vúmetros y los leds, los cuales sirven solo como indicadores, y no son parte del proceso de conversión de energía.

2.3. Medición de torque

La medición del torque requirió del montaje en la Figura 3. En esta prueba se alimentó la máquina de corriente continua con un voltaje constante, y como resultado la manivela se movió, pero solo hasta donde lo permitió un dinamómetro. Posteriormente se varió la posición del dinamómetro (cambiando la posición del brazo mecánico), hasta que la manivela estuvo a

90° con respecto al dinamómetro, y se tomó esa lectura de fuerza. El producto entre fuerza y brazo es el torque.

El procedimiento en el párrafo anterior se repitió para varios valores de voltaje, observando en cada caso la relación entre el corriente y torque. Dada la longitud de la manivela (0.16 m), y las lecturas de corriente y fuerza, la relación par corriente es el indicado en la ecuación 1.

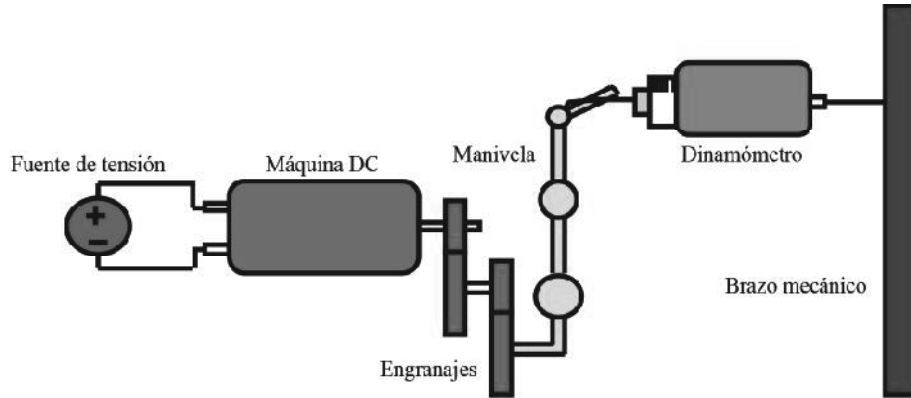


Figura 3. Medición del torque en la máquina DC.

$$\tau = 1.13i \quad (Nm) \quad (1)$$

3. Resultados

En esta sección se calculará la potencia que puede entregar una persona al prototipo, y la potencia a la cual se carga la batería, con las cuales se determina la eficiencia. Finalmente se discuten los resultados encontrados.

3.1. Medición de torque

El cálculo de potencia implica la medición de corrientes y voltajes, por lo tanto, en esta sección se comienza con el análisis del voltaje y la carga por medio de dos experimentos. El primero centrado en el supercapacitor, mientras el segundo observa todo el prototipo.

El primer experimento emula la acción de una persona cuando esta aplica torque sobre la manivela. Se supone un tiempo de acción y otro de descanso iguales, mediante una señal pulso con un periodo de 7 s y una amplitud de 7 V (figura 4). Este voltaje proviene de una fuente de tensión, la cual reemplaza el generador. Véase que el voltaje en el supercapacitor aumenta hasta 5.6 V, el cual corresponde con la carga máxima, y en ese momento se activa la transferencia de carga hacia la batería. Luego de la primera transferencia de carga, el voltaje se estabiliza en 2.1 V, donde se iguala la tensión de supercapacitor con la de la batería y no fluye más corriente.

En el segundo experimento se observa el comportamiento normal del prototipo, es decir, cuando la energía proviene de una persona. Para comenzar la persona aplica torque, buscando una

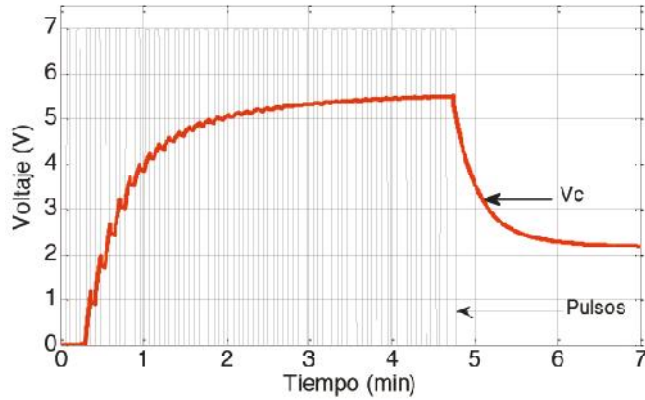


Figura 4. Comportamiento del supercapacitor.

velocidad de giro constante. El valor inicial de corriente en el supercapacitor es el máximo, debido a que se encuentra descargado, y a medida que se carga, la corriente disminuye (figura 5.b).

De otra parte, el voltaje en el generador V_g aumenta hasta 6.4 V (figura 5.a). Este aumento es proporcional al aumento del voltaje en el supercapacitor V_c . La diferencia entre estos voltajes se debe principalmente a la operación del diodo a través del cual se dirige la dirección de la corriente, Figura 2.a. Cuando V_c alcanza el umbral de 5.6 V, el tiristor se cierra y comienza a transferir carga del supercapacitor a la batería. Esta transferencia es sensada con la resistencia de medida R_I . De otra parte, nótese que durante la descarga del supercapacitor no se aplica torque a la manivela, por tanto, V_g es cero.

El supercapacitor entrega un máximo de 63% de su carga a la batería en cada transferencia. Esto se debe a que la transferencia solo se da si el voltaje en el supercapacitor es mayor que en la batería, para que la carga fluya hacia esta última. En la práctica, y debido a la configuración del tiristor, se encontró que durante la primera transferencia ese voltaje debe ser mayor o igual que 2.1 V. De otra parte, el voltaje en el supercapacitor cae en la misma proporción que se transfiere carga, como indica la siguiente expresión: $q = CV_c$ (C). Así, la transferencia equivale a $(5.6 - 2.1) / 5.6 = 0.63$, es decir, 63%.

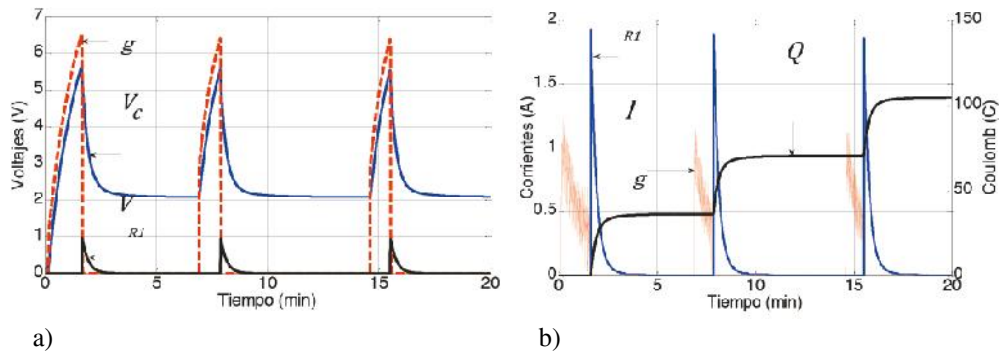


Figura 5. Medidas experimentales, a) voltajes, b) corrientes y carga.

La primera transferencia es de 35 C, dado que $q = 10(5.6-2.1)$ C. Este valor disminuye levemente a medida que se carga la batería, porque el voltaje en la batería aumenta. Así, dada la carga nominal de la batería 2520 C, en lugar de requerir 72 transferencias (2520/35), en realidad se requieren 74.

La corriente de carga I_{R1} tiene un máximo de 1.8 A, y decrece en forma similar a una exponencial. I_{R1} alcanza su valor nulo luego de unos cinco minutos (figura 5.b). Este procedimiento de carga del supercapacitor y posterior transferencia se repite hasta cargar la batería. Si se gira la manivela durante el periodo de transferencia a la batería, esa carga generada se reparte entre el supercapacitor y la batería, y dada las conexiones del circuito, se igualan los voltajes a un valor cercano a 3 V.

La medición de los voltajes en la figura 5.a se realizó por medio de la tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E de National Instruments y Simulink de Matlab. A partir de estas lecturas se obtienen las curvas en la figura 5.b, de acuerdo con las expresiones en la ecuación 2.

$$I_{R1} = \frac{V_{R1}}{R1} \quad (A)$$

$$I_g = C \frac{dVc}{dt} \quad (A) \quad (2)$$

$$q = \int I_{R1} dt \quad (C)$$

3.2. Potencia y eficiencia

En esta sección se presenta la medición de los parámetros eléctricos y mecánicos, y a partir de ellos se calculan las potencias, posteriormente se calcula la eficiencia.

3.2.1. Medición de potencia

En las mediciones de las potencias eléctrica pe y mecánica pm , se utiliza una tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E, configurada con un periodo de muestreo de 100 ms. Estas mediciones se realizan durante el primer ciclo de carga, cuando la batería y el supercapacitor están descargados, porque este es el caso extremo. En cualquier otro ciclo la potencia de entrada es menor y por tanto la eficiencia es mayor.

Para medir la potencia eléctrica se aplica torque a la manivela, buscando que la velocidad de giro sea constante, y se miden los voltajes Vc y Vg . Dado que durante la carga del supercapacitor se halla en serie con el generador, entonces pe es igual a $VgC(dVc/dt)$. El resultado de este cálculo se muestra en la Figura 6.b, donde la potencia promedio es de 3 W. Adviértase que, si bien Vc y Vg parecen ser curvas suaves, la potencia pe presenta saltos, debido al efecto de la derivada dVc/dt .

Para medir la potencia mecánica (la que produce la persona), se debe estimar el par y la velocidad en la manivela. Se comenzará con la explicación de la medida de velocidad y luego se hablará de la medida del torque.

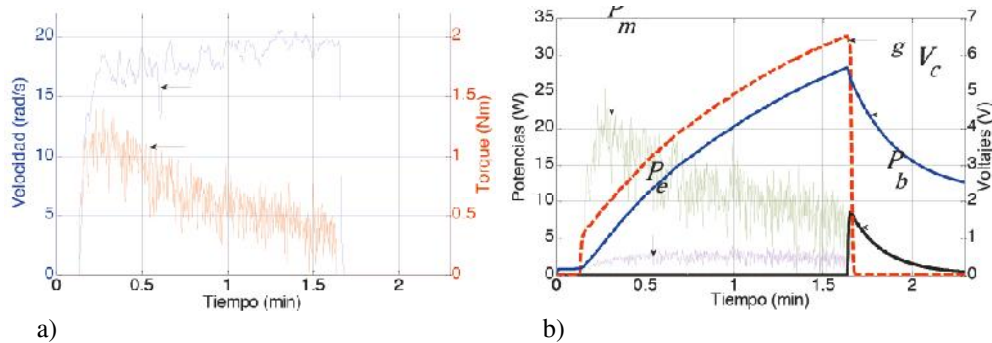


Figura 6. Medida de potencia, a) par y velocidad, b) potencias y voltajes.

La medida de velocidad se hace con un encoder incremental de 36 ranuras, el cual no está ubicado en la manivela, sino en el eje del generador. Esto se hace por facilidad de instalación y porque la estimación presenta errores menores a velocidades altas. Así, la aproximación de la velocidad de giro se hace con el contador de pulsos de la tarjeta de adquisición de datos, según se indica en la ecuación 3, donde l_i es el conteo de pulsos actual; l_{i-1} es el conteo anterior; 0.1 es el tiempo de muestreo; $2/36$ es una constante para pasar pulsos/s a rad/s; y $1/14$ es la relación de transmisión de los engranajes.

$$\omega = \frac{l_i - l_{i-1}}{0.1} \frac{2\pi}{36} \frac{1}{14} \quad (3)$$

El resultado de la medición de la velocidad se observa en la figura 6.a, en la cual puede verse que la velocidad de giro está alrededor de 18 rad/s. Nótese que no es posible mantener constante, porque el par de oposición al giro de la manivela es proporcional a la corriente en el supercapacitor, y esta cambia. Inicialmente esa corriente es máxima y luego decrece a medida que el supercapacitor se carga. Existen otras razones, como las diferencias entre los dientes de los engranajes o el hecho de que el brazo de una persona no puede aplicar el mismo torque en todas las posiciones de la manivela.

El método para obtener el par se presentó en la sección 2.3. Recuérdese la ecuación 1 en la sección 2.3, donde $i=I_g$. De esta forma, el resultado del cálculo de potencia mecánica se consigna en la figura 6.b. Véase que la potencia mecánica tiene un valor máximo al comienzo, de alrededor de 25 W, luego de lo cual decrece hasta unos 5 W. El máximo se presenta porque para hacer girar la manivela con el supercapacitor descargado hay que aplicar un par alto. Luego, ese par decrece hasta cuando el supercapacitor queda cargado, momento en el cual la potencia mecánica necesaria es solo para vencer fricciones y la inercia del sistema.

3.2.2. Cálculo de la eficiencia

La carga de la batería requiere dos procesos. El primero es cargar el supercapacitor y el segundo es transferir esa carga a la batería. Mientras el primer proceso es electromecánico el segundo es eléctrico. En el primer proceso se convierte energía mecánica en eléctrica, mientras en el segundo la entrada y la salida son energía eléctrica. El cálculo de la primera eficiencia

consiste en realizar el cociente $\eta_m = p_e/p_m$, el cual se presenta en la figura 7. En esa figura se observan tres ciclos de transferencia. Véase que la eficiencia de la parte electromecánica del prototipo no supera el 26%.

El cálculo de la segunda eficiencia implica el cálculo de la potencia eléctrica en el supercapacitor, denotada como p_c durante la transferencia a la batería y de la potencia en la batería p_b . La potencia en el supercapacitor es la indicada en la ecuación 4.

$$p_c = V_c C \frac{dV_c}{dt} \quad (W) \quad (4)$$

De otra parte, p_b equivale al producto del voltaje por la corriente en la batería. En lugar de medir directamente ese voltaje, se utiliza la diferencia entre V_c y V_{R_I} porque estas señales ya están en la tarjeta de adquisición de datos. La lectura de corriente también se hace de manera indirecta, a través de la resistencia de medida, según se indica en la ecuación 5.

$$p_b = (V_c - V_{R_I}) \frac{V_{R_I}}{R_I} \quad (W) \quad (5)$$

Así, la eficiencia es $\eta_e = p_b/p_c$. Esta vez la eficiencia supera el 80%, y se acerca a 100% a medida que la corriente baja (figura 7).

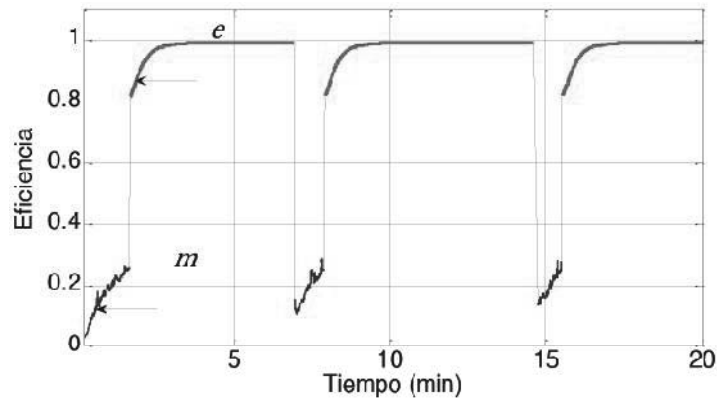


Figura 7. Eficiencia en la transformación de energía.

3.3. Discusión

El aporte más importante en este artículo es la presentación de un procedimiento para la medida de la eficiencia de dispositivos que cargan manualmente baterías. Esto, debido a que, si bien la literatura reporta la construcción de cargadores manuales de baterías, no se dan razones de los parámetros de diseño, es decir, a aspectos tales como el tamaño, el cual es una de las variables que define la potencia de salida. En lugar de ello, trabajos como [13], [14] y [15] se dedican a medir la potencia de salida, lo cual se entiende dada la dificultad para medir la potencia de entrada.

La potencia en los prototipos para cargar baterías de forma manual depende de los engranajes, del generador y sobre todo de cómo se introduce la energía. Ahora, dada la variabilidad en estos componentes, no debe descartarse una aplicación u otra por el valor de potencia de salida. En su lugar, el parámetro final de diseño es la eficiencia. Esta es la razón por la cual en este artículo se propone un procedimiento para medir la eficiencia, el cual es confirmado mediante la medición de eficiencia en un prototipo académico.

El prototipo diseñado no se construyó para maximizar la eficiencia, ni para lograr que esta fuera mayor que la de dispositivos comerciales, sino para presentar el proceso de medida de la eficiencia. En este sentido, se resaltan algunos componentes que no se encuentran en un prototipo comercial, a manera de ejemplo la visualización del estado de carga de la batería, la estimación de la carga almacenada en el supercapacitor, o la instalación de un encoder incremental. Otros aspectos de diseño que distinguen este prototipo académico de uno comercial son lo visible de cada componente, dada la carcasa de acrílico transparente y la forma y el tamaño. Estos últimos parámetros fueron seleccionados para extender la durabilidad del prototipo y su robustez, de manera que pueda presentarse en distintos espacios, además del laboratorio.

En contraposición a las ventajas del prototipo en el párrafo anterior, se listan dos desventajas. Primero, si bien el prototipo es modular, no es posible cambiar el generador, dadas las distancias entre los engranajes y el encoder, lo que implica que no es posible estudiar el efecto del cambio de generador. Segundo, el tamaño del prototipo hace difícil acoplarlo a otros dispositivos, por ejemplo, a una motocicleta. Esto se menciona porque se prevé que la investigación a futuro debería buscar aplicaciones para la recuperación de energía, además de la búsqueda de la mejora de la eficiencia.

Si bien el objetivo general de este trabajo no es optimizar la eficiencia, en trabajos futuros esa optimización debería enfocarse en el diseño de la manivela, de los engranajes y del generador. El diseño de la manivela implica la optimización del tamaño y de la forma, de manera ergonómica, para aprovechar la mayor cantidad de energía proveniente del usuario sin causar problemas en la mano o brazo. En cuanto a los engranajes, además de la relación de dientes, se pueden estudiar otros aspectos, como el tipo de engranaje, el cual influencia directamente en las pérdidas de fricción que se presentan.

El componente que más influye en la eficiencia es el generador. Si se utiliza uno comercial ya hay una cota cercana al 60% en el valor de la eficiencia. De esta manera superar esa eficiencia implica el diseño electromagnético de otro dispositivo, el cual implicaría teoría de máquinas eléctricas y el uso de herramientas de programación como los elementos finitos. En cualquier caso, el prototipo que se diseñe debe garantizar las condiciones para que se dé la eficiencia máxima. De estas condiciones, la más importante es la velocidad de giro del generador.

4. Conclusiones

En este artículo se presenta la implementación de un prototipo para convertir energía cinética a energía eléctrica, la cual es almacenada en una batería. Como aportes fundamentales del trabajo se encuentra la formulación de un procedimiento para medir la eficiencia, en el cual no se requiere la medida del torque para determinar la potencia de entrada, sino que el torque se mide indirectamente a partir de la lectura de corriente en el generador. Este procedimiento puede ser replicado sobre cualquier dispositivo que utilice una máquina de corriente directa para generar la carga eléctrica.

La conversión de energía en el prototipo puede dividirse en dos procesos: uno electromecánico y uno eléctrico. En el primero se pasa del giro en una manivela al voltaje en el generador, el resultado es una eficiencia alrededor de 25%. En el segundo proceso, desde el voltaje en el generador hasta que la carga eléctrica es almacenada en una batería, se alcanza una eficiencia cercana al 100%, reducida solo por el consumo en una resistencia adicionada para medir.

Trabajos futuros deben estar encaminados en primera instancia a incrementar la eficiencia de la parte electromecánica del prototipo. Luego de lo cual también es importante reducir el tiempo de transferencia del supercapacitor a la batería, el cual puede verse como un tiempo muerto por parte del usuario. Finalmente, puede ser interesante experimentar con el uso de sistemas embebidos para reemplazar la electrónica implementada en este trabajo. Esto reduciría pérdidas, ampliaría posibilidades de manipulación de las señales eléctricas y reduciría el tamaño del dispositivo.

Referencias

- [1] Y. Song, "American policy on renewable energy and its inspiration", en *Management Science and Engineering (ICMSE)*, 2010 International Conference, Melbourne, VIC, noviembre 24-26, 2010, pp. 1513-1519, doi: 10.1109/ICMSE.2010.5719987.
- [2] A. Hamid, M. Navid y N. Saied, "Human passive motions and a user-friendly energy harvesting system", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 25, n° 8, pp. 923-936, 25 mayo 2014, doi: 10.1177/1045389X13502854.
- [3] Q. Li, V. Naing, J. A. Hoffer, D. J. Weber, A. D. Kuo y J. M. Donelan, "Biomechanical energy harvesting: Apparatus and method", en *Robotics and Automation*, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, Pasadena, CA, mayo 19-23, 2008, pp. 3672-3677, doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543774.
- [4] J. J. H. Paulides, J. W. Jansen, L. Encica, E. A. Lomonova y M. Smit, "Human-powered small-scale generation system for a sustainable dance club", en *Electric Machines and Drives Conference*, 2009. IEMDC '09. IEEE International, Miami, FL, mayo 3-6, 2009, pp. 439-444, doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075243.
- [5] M. E. Karagozler, I. Poupyerv, G. K. Fedder, y Y. Suzuki, "Paper Generators: Harvesting Energy from Touching, Rubbing and Sliding", en *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, octubre 8-11, 2013, pp. 23-30, doi: 10.1145/2501988.2502054.
- [6] R. Caliò, U. B. Rongala, D. Camboni, M. Milazzo, C. Steganini, G. de Petris, y C. M. Oddo, "Piezoelectric Energy Harvesting Solutions", en *Journal Sensors*, marzo 10, 2014, vol. 14, núm. 3, pp. 4755-4790, doi: 10.3390/s140304755.
- [7] Z. Lei y T. Xiudong, "Large-scale vibration energy harvesting", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 24, n° 11, pp. 1405-1430, 2013, doi: 10.1177/1045389X13486707.
- [8] A. Kokkinopoulos, G. Vogas, y P. Papageorgas, "Energy harvesting implementing embedded piezoelectric generators – The potential for the Atiiki Odos traffic grid", en *The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability*, TMREES14, Beirut, Lebanon, Abril, 2014, pp. 1070-1085.
- [9] V. Goudar, R. Zhi, P. Brochu, P. Qibing y M. Potkonjak, "Optimizing the configuration and control of a novel human-powered energy harvesting system", en *Power and Timing Modeling, Optimization and Simulation (PATMOS)*, 2013 23rd International Workshop, Karlsruhe, septiembre 9-11, 2013, pp. 75-82, doi: 10.1109/PATMOS.2013.6662158.
- [10] T. Galchev, J. McCullagh, R. L. Peterson y K. Najafi, "Harvesting traffic-induced bridge vibrations", en *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS)*, 2011 16th International, Beijing, junio 5-9, 2011, pp. 1661-1664, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969860.



- [11] K. Dongwon, G. A. Rincon-Mora y E. O. Torres, “Harvesting Ambient kinetic energy with switched-inductor DC-DC converters”, en *Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium*, Paris, mayo 30, 2010, pp. 281-284, doi:10.1109/ISCAS.2010.5537878.
- [12] A.C. Hua y B. Z. Syue, “Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery”, en *Power Electronics Conference (IPEC)*, 2010 International, Sapporo, junio 21-24, 2010, pp.1478-1483, doi: 10.1109/IPEC.2010.5544506.
- [13] L. Linqiang, W. Dahu, Z. Tong, y H. Mingke, “A Manual Mobile Phone Charger”, en *Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2010 International Conference on, Wuhan, junio 25-27, 2010, pp. 79-82, doi: 10.1109/iCECE.2010.28.
- [14] L. Wu, A. Zachas, R. Harley, T. Habetler, y D. Divan, “Design of a portable hand crank generating system to power remote off-grid communities”, en *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa*, 2007. PowerAfrica '07. IEEE, Johannesburg, julio 16-20, 2007, pp. 1-8, doi: 10.1109/PESAFR.2007.4498043.
- [15] D. Dai y J. Liu, “Human powered wireless charger for low-power mobile electronic devices”, en *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 3, pp. 767-774, agosto 27, 2012, doi: 10.1109/TCE.2012.6311316.

John Sneider Vanegas Varon

Tecnólogo en Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; auxiliar de investigación en el Grupo de Investigación en Control Electrónico, GICE, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Contacto: jsvanegasv@correo.udistrital.edu.co

Marco Antonio Latorre González

Tecnólogo en Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; auxiliar de investigación en el Grupo de Investigación en Control Electrónico, GICE, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Contacto: malatorreg@correo.udistrital.edu.co

José Danilo Rairán Antolines

Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia; magíster en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia; PhD en la Universidad Nacional de Colombia; docente en el área de control de sistemas dinámicos, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; director del Grupo de Investigación en Control Electrónico, GICE, el cual estudia la aplicación de técnicas de control a sistemas dinámicos.

Contacto: drairan@udistrital.edu.co



Implementación de una Carta de Control para Corridas Cortas en la Industria de Autopartes

Implementation of a Short Run Chart in the Auto Parts Industry

Jesús Barrera Cobos¹

¹Escuela Colombiana de Ingeniería.
e-mail: jesus.barrera@escuelaing.edu.co

Received: 05/08/2015. Modified: 07/10/2015. Accepted: 15/12/2015.

Resumen

Contexto: La industria nacional tiene que adaptarse a las necesidades del mercado, lo que implica en algunos casos el cambio en la realización de sus procesos productivos. Uno de estos cambios tiene que ver con el tamaño de lote de producción, el cual ha pasado de un tamaño de miles de unidades a uno quizás, de algunos cientos. El seguimiento de estos procesos con métodos estadísticos, como las cartas de control, ha llevado al uso de las denominadas cartas de control para lotes pequeños.

Método: En este artículo se presenta la propuesta de implementación de una carta de este tipo en un proceso de fabricación de una empresa del sector automotriz nacional. Inicialmente se plantea el estado actual del proceso, el cual se sigue con una carta de control $\bar{X}-R$, usada por la empresa para el seguimiento de la producción; luego se hace mención a algunas de las cartas de control para lotes pequeños, que han sido planteadas por diversos autores.

Resultados: Con base en la información del estado actual del proceso se realiza la elección de la carta para lotes pequeños más adecuada.

Conclusiones: Dadas las características de no homogeneidad de la varianza, determinada mediante una prueba no paramétrica para las referencias analizadas, se decide que la carta a ser usada es la normalizada. De las tres propuestas de carta presentadas la decisión de cuál usar depende de la varianza del proceso al fabricar las distintas referencias.

Palabras clave: carta de control, carta de diferencias, carta normalizada, carta para lotes pequeños, variabilidad del proceso.

Abstract

Context: The national industry has to adapt to market needs, which implies the change in the performance of their production processes. One of these changes has to do with the size of production lot, which has gone from a size of one thousand units of perhaps a few hundred. The monitoring of these processes using statistical methods such as control charts, has led to the use of so-called control charts for short runs.

Method: This article presents the proposed implementation of a chart of this type in a manufacturing process of a company in the national automobile sector. Initially the current state of the process poses with the results shown in the control chart $\bar{X}-R$, used by the company to monitor production; then the mention of some of the control charts for short production runs that can be used for this type of variables which have been raised by various authors is made.

Results: Based on the information of the current status process the election of the chart is made more suitable for short production runs.

Conclusions: Given the characteristics of non-homogeneity of variance, determined by a nonparametric test for references analyzed, it is decided that the letter to be used is the normalized chart. The decision of which chart to use depends on the variance of the process to manufacture the various references.

Keywords: control chart, difference chart, normalized chart, process variability, short run chart.

Open access



Citación: Barrera, J. F. (2016). Implementación de una carta de control para corridas cortas en la industria de autopartes. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 97-106
© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a07>

1. Contexto

Ante la necesidad de poder satisfacer las necesidades de sus clientes las empresas requieren tener un amplio portafolio de productos, además, dado que hoy en día los diversos clientes de un mismo producto desean ciertas características especiales, las empresas han tenido que empezar a producir lotes cada vez más pequeños de distintas referencias del mismo producto, con el fin de evitar que los clientes busquen otro proveedor.

El control estadísticos de procesos normalmente se hace empleando cartas de control univariadas, llamadas también cartas *Shewhart*, las cuales fueron propuestas por Walter Shewhart (1924) de los Laboratorios Bell de los EE.UU. [8], [11]. Dichas cartas son apropiadas para tamaños de producción de miles de unidades, situación que se presentaba hasta hace algunas décadas [8].

Ante la necesidad de producir lotes de tamaño pequeño y de controlar el proceso, las cartas Shewhart no son las más adecuadas, debido a que en el establecimiento de sus límites de control se requiere la producción de cierta cantidad de producto, que en ocasiones es comparable al tamaño del lote a ser producido, con lo que el costo y el tiempo de producción se incrementan.

Por estas razones, se han planteado algunas cartas de control a fin de ser utilizadas bajo estas características de proceso [5], [4], [3], [12], [13], [9]. Así, cuando prácticamente se usa el mismo proceso para la producción de diferentes referencias, estas cartas permiten controlar el proceso de fabricación mas allá de controlar la producción de una referencia en particular.

El presente trabajo está orientado hacia la determinación de la carta más adecuada para hacer el seguimiento del proceso de producción, con el muestreo que se sigue actualmente, en cuanto a cantidad de muestras por turno y tamaño de la muestra. Inicialmente se hace una descripción del proceso de fabricación y del tipo de carta de control que la empresa usa para su seguimiento, luego se analiza el estado actual del proceso para las tres referencias seleccionadas. Una vez se ha analizado el estado del proceso se seleccionan las opciones de cartas a usar para después seleccionar la mas adecuada, con base en las propiedades observadas en las referencias seleccionadas realizar la implementación y finalmente se indican algunas conclusiones pertinentes.

1.1. Descripción del proceso

La empresa x manufactura diversos productos para la industria automotriz, para ello cuenta con una planta de última tecnología, lo cual le permite fabricar un producto de acuerdo a las necesidades del mercado. Debido a que la demanda de sus productos en el mercado nacional no requiere la fabricación de grandes volúmenes (por el tamaño de su mercado) de las diferentes referencias, se hace necesaria la fabricación de algunas centenas de unidades por cada lote de producción, el promedio de unidades fabricadas, por lote, es de alrededor de 150.

Actualmente para realizar el seguimiento del proceso la empresa emplea cartas de control $\bar{x}-R$ [7], [11], [6] en sus diversos productos. A fin de establecer los límites de control de la carta, el personal encargado fabrica una cantidad apreciable (respecto al tamaño del lote) de producto, a la cual se le hace verificación de la característica de interés¹ en todos sus elementos,

¹ La característica de interés es el diámetro del agujero dentro del cual se deslaza un cilindro por efecto de la presión de un fluido.

con lo cual el tiempo requerido para ajustar el proceso puede ser tan alto como el requerido para la fabricación del lote completo. Debido a lo anterior la productividad de la empresa no es la adecuada.

Así, la producción se realiza en esquema de isla de trabajo, en la cual cada tipo de producto es hecho en un grupo de máquinas acondicionadas para tal fin; y la empresa ha definido la realización de tres muestreos por turno de ocho horas con un tamaño de muestra de cinco unidades.

En el presente trabajo se considerarán tres referencias (A, B y C) que utilizan un proceso análogo y a las cuales se le hace seguimiento a la misma característica de interés, como es un diámetro, llamado diámetro principal. La medición de esta característica se lleva a cabo con un instrumento adecuado para tal fin, se le realiza procesos de calibración de forma periódica y además se le lleva un registro de calibración. De igual forma el personal encargado del proceso es idóneo y tiene la experiencia y el entrenamiento en el proceso. La maquinaria es sometida a rutinas de mantenimiento de acuerdo a lo recomendado por el fabricante, dicha maquinaria se encuentra diseñada para la clase de trabajo que se realiza en ella y es del tipo de control numérico.

Las especificaciones del cliente para las referencias en cuestión se describen en la tabla I:

Tabla I. Especificaciones para las tres referencias.

Ref.	<i>L.E.I. (mm)</i>	<i>L.E.S. (mm)</i>
A	20,600	20,633
B	22,000	22,033
C	19,000	19,033

L.E.I. hace referencia a límite de especificación inferior y *L.E.S.* corresponde a límite de especificación superior. Estos límites son dados por los clientes.

2. Método

Se dispone de información de las tres referencias A, B y C, la cual ha sido tomada mediante muestreo (tres muestras de cinco elementos por turno de ocho horas) según lo tiene establecido la empresa. Esta ha establecido límites de control de proceso para cada una de las referencias, con los cuales se lleva a cabo el ajuste del proceso cada vez que se desea realizar la fabricación de una referencia, mediante la fabricación de cierta cantidad de producto en el establecimiento de los límites de control para la carta. En la tabla II se pueden apreciar los límites así como el promedio y el rango para cada una de las referencias.

Tabla II. Límites de control para las tres referencias.

Ref.	<i>L.E.I. (mm)</i>	<i>L.E.S. (mm)</i>	$\bar{x}(mm)$	<i>R (mm)</i>
A	20,613	20,617	20,615	0,004
B	22,015	22,020	22,0175	0,005
C	19,014	19,018	19,016	0,004

La tabla III muestra el promedio y el rango para las distintas muestras de cada una de las referencias, durante la fabricación de un lote de cada una de ellas.

Tabla III. Información para las tres referencias.

m	\bar{x}_A	R_A	\bar{x}_B	R_B	\bar{x}_C	R_C
1	20,6162	0,005	22,017	0,004	19,016	0,004
2	20,6144	0,004	22,018	0,002	19,0162	0,003
3	20,6154	0,005	22,0174	0,005	19,0162	0,003
4	20,6152	0,005	22,0186	0,005	19,0168	0,005
5	20,6152	0,004	22,0172	0,003	19,0172	0,003
6	20,6162	0,003	22,0174	0,003	19,0164	0,004
7	20,6140	0,002	22,0174	0,005	19,0174	0,003
8	20,6162	0,004	22,0178	0,003	19,0164	0,005
9	20,6142	0,002	22,0172	0,002	19,0164	0,003
10	20,6168	0,003	22,0172	0,004	19,0168	0,004
11	20,6152	0,004	22,0166	0,003	19,0164	0,004
12	20,6160	0,004	22,0172	0,005	19,0166	0,003
13	20,6160	0,002				

Las unidades para los promedios son milímetros así como para los rangos. De igual forma en la tabla III, m indica el número de muestra.

Las cartas de control para la media y para el rango de cada una de las referencias con anterioridad se muestran en las figuras 1, 2 y 3.

2.1. Observaciones a las cartas de control

Con base en las diferentes gráficas realizadas, así como en la información de proceso disponible, se tienen los siguientes comentarios respecto al estado del proceso:

1. Los tres procesos se encuentran bajo control, con la media de las muestras alrededor de la media de la respectiva carta, salvo en el caso de la referencia C, pues se muestra que aunque la variable está dentro del intervalo de aceptación los límites de control para la carta parecen no estar bien determinados.

2. El rango para las diferentes referencias se puede considerar constante, aunque quizás se deba hacer una prueba de igualdad de varianzas, y se halla dentro de los límites de la carta para esta variable.

3. Las referencias A y C tienen un valor medio diferente al valor objetivo, lo que se observa de forma más clara en la carta para la referencia C, figura 3. Lo anterior indica que el proceso para estas referencias no está centrado respecto al valor objetivo, lo que en sí no es un problema siempre y cuando la producción esté cumpliendo las especificaciones del cliente.

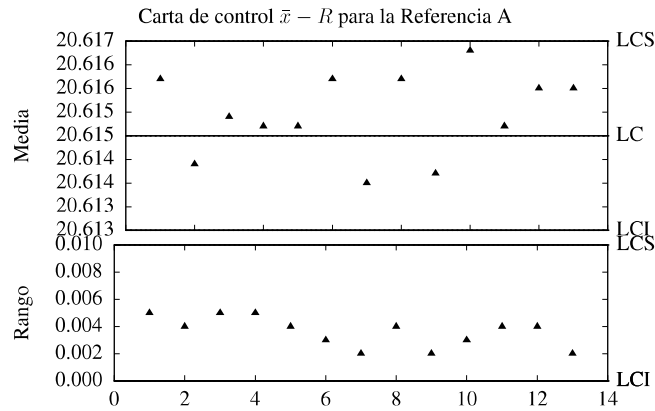


Figura 1. Carta de control de la media y el rango para la referencia A.

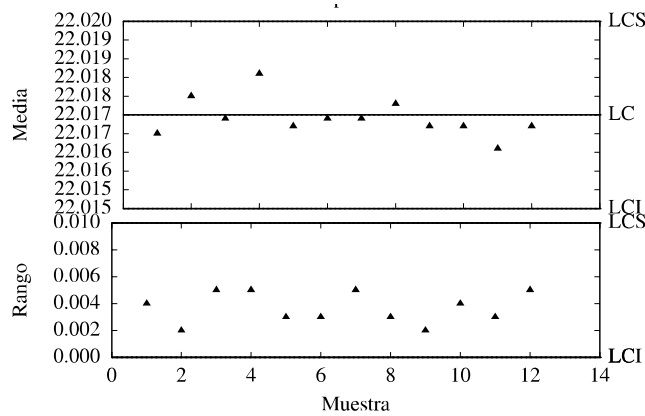


Figura 2. Carta de control de la media y el rango para la referencia B.

2.1.1. Opciones de cartas

En busca de la mejora del proceso se considera la posibilidad de implementar cartas de control para lotes pequeños (*short run charts*), entre otras cosas. La determinación de qué tipo de carta es la adecuada pasa por el análisis de las diferentes variables y las características que se desea mostrar.

Entre las diferentes cartas a elegir están:²

² Aquí solo se presentan las cartas más adecuadas según las propiedades de las características que actualmente se siguen, en [1] se mencionan otras cartas para lotes pequeños cuando las características a seguir presentan ciertas particularidades, también en [2] se hace un análisis de las propiedades que tienen los tres estadísticos mencionados en este documento.

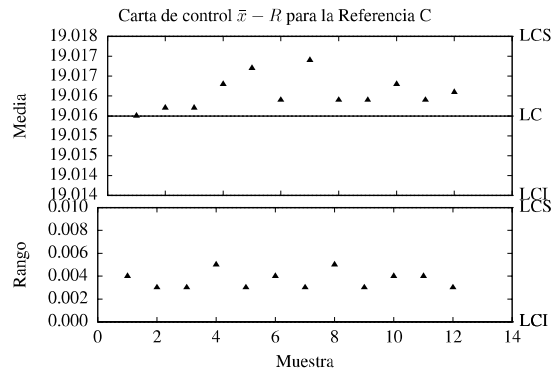


Figura 3. Carta de control de la media y el rango para la referencia C.

- **Carta de diferencias** es tratada en [3], [12] y [13] y también es llamada carta *X-nominal* o carta *X-objetivo*; consiste en tomar las diferencias de las mediciones de las variables contra el valor objetivo. Esta diferencia se grafica en una carta \bar{X} y sus límites son función de la variabilidad del proceso, por lo que si se desea tener varias referencias graficadas en la misma carta su variabilidad debe ser estadísticamente igual y, además, deben tener las mismas unidades de medida.

El propósito de la carta de diferencias es visualizar el estado del proceso aunque este sea utilizado para la fabricación de diferentes productos, es decir, diferente objetivo. Aun cuando los diferentes productos se encuentran bajo control estadístico, interesa observar los cambios que suceden en el proceso al cambiar de producto.

Para un funcionamiento adecuado de la carta se requiere que la variabilidad del proceso sea relativamente constante de producto a producto. Si lo anterior no se cumple se hace necesario utilizar una carta normalizada, también llamada carta Z.

Los límites de control para la carta están dados por:

$$(x - \text{valor nominal}) = 0,0 \pm 2,66m\bar{R} \quad (1)$$

en donde $m\bar{R}$ es el promedio de los rangos móviles.

El valor nominal que es restado puede ser el promedio histórico para cada producto o el valor objetivo para cada producto. El promedio del rango móvil, $m\bar{R}$, a partir de la carta control del producto o el rango calculado a partir de los x observados. Se puede utilizar una carta de rango móvil junto con la carta de diferencias, con el propósito de observar la variabilidad del proceso junto con el valor de la variable. Los límites de control de la carta del rango son:

$$\begin{aligned} LC_R &= m\bar{R} \\ LCS_R &= D_4 m\bar{R} = 3,268\bar{R} \end{aligned} \quad (2)$$

- **Carta normalizada** esta carta es mencionada en [12] y [13] y se utiliza cuando la variabilidad de las referencias no es igual o cuando se desean graficar características diferentes. En su uso se necesita conocer el valor nominal (valor objetivo o el promedio

histórico) y desviación estándar (o algún estadístico que permita tener información respecto a la variación intragrupo) para cada uno de los productos.

La expresión para calcular los valores para la carta Z es:

$$Z = \frac{x - x_{nominal}}{\sigma[x]} \quad (3)$$

De lo anterior se tiene que los límites de control para la carta están dados por:

$$\begin{aligned} LCI_Z &= -K \\ LC_Z &= 0,0 \\ LCS_Z &= K \end{aligned} \quad (4)$$

donde K es el número de desviaciones estándar de la carta X normal.

- **Carta porcentaje de valor nominal** es mencionada en [3], su idea es que cuando diferentes partes son hechas por un mismo proceso es posible graficar en una misma carta las diferencias entre las partes respecto a su valor nominal (o valor objetivo). En este caso se plantea utilizar la carta en la cual se mire qué tanto la relación \bar{x}_i/T_i se desvía de uno (1); \bar{x}_i indica el promedio de la muestra y T_i hace referencia al valor objetivo. La interpretación de esta es sugerida como el porcentaje del valor nominal.

2.1.2. Elección del tipo de carta

Debido a las características del proceso de fabricación es posible utilizar la carta de diferencias, la carta normalizada o la carta del porcentaje del valor nominal. La carta de diferencias, así como la carta del porcentaje, se pueden utilizar si la variabilidad del proceso se mantiene constante para las diferentes referencias. Dado que los límites de control de las cartas son función de la desviación estándar de la variable graficada, se hace necesario determinar si la variabilidad del proceso para las distintas referencias se puede considerar igual. Si la variabilidad no se mantiene constante entre referencias es necesario utilizar una carta en la cual sus límites de control no dependan de la desviación estándar, lo cual se logra normalizando los datos, con lo cual se utilizaría la carta normalizada.

Según se menciona en la sección 2, el rango para las tres referencias se puede considerar constante; sin embargo, es posible utilizar una prueba estadística para determinar si la varianza de las medias de las referencias se puede considerar estadísticamente igual. Debido a que la cantidad de datos es pequeña para cada una de las referencias se utiliza una prueba no paramétrica de heterogeneidad de varianzas, rangos cuadrados [10].

Para la aplicación de la prueba se hallan las desviaciones absolutas de las medias respecto a la media total por referencia, el cual se espera sea el punto medio del intervalo de especificación; es decir, se espera que el proceso tenga como valor objetivo el valor medio de la especificación para cada referencia. Dichas desviaciones se observan en la tabla IV; las diferencias que se aprecian en la tabla IV están dadas en milésimas de milímetro (micrómetros). La prueba no paramétrica para igualdad de varianzas [10] da como resultado un $T = 7,37$ correspondiente

Tabla IV. Desviaciones absolutas respecto a la media objetivo por referencia.

m	A	B	C
1	1,2	-0,5	0,0
2	-0,6	0,5	0,2
3	0,4	-0,1	0,2
4	0,2	1,1	0,8
5	0,2	-0,3	1,2
6	1,2	-0,1	0,4
7	-1,0	-0,1	1,4
8	1,2	0,3	0,4
9	-0,8	-0,3	0,4
10	1,8	-0,3	0,8
11	0,2	-0,9	0,4
12	1,0	-0,3	0,6
13	1,0		

Tabla V. Datos normalizados.

m	A	B	C
1	0,3319	-0,1364	0,0000
2	-0,1660	0,1364	0,0545
3	0,1106	-0,0273	0,0545
4	0,0553	0,3000	0,2182
5	0,0553	-0,0818	0,3273
6	0,3319	-0,0273	0,1091
7	-0,2766	-0,0273	0,3818
8	0,3319	0,0818	0,1091
9	-0,2213	-0,0818	0,1091
10	0,4979	-0,0818	0,2182
11	0,0553	-0,2455	0,1091
12	0,2766	-0,0818	0,1636
13	0,2766		

a un p-valor de 0,0089585859, el cual indica que con un nivel de significancia del 5 %, el proceso no tiene la misma variabilidad para las tres referencias.

Dado que interesaba saber si el proceso presenta, para las tres referencias, la misma variabilidad y con base en ello definir el tipo de carta a utilizar, se concluye que se debe usar la carta normalizada.

3. Resultados

La carta normalizada (también llamada carta *Zed* o *Z*) para datos normalizados, permite cambios en el valor objetivo así como en la cantidad de dispersión de referencia a referencia. Para su utilización se necesita conocer *T*, el valor nominal, valor objetivo o el promedio histórico y algún estadístico que permita tener información respecto a la variación intragrupo para cada uno de los productos³.

La expresión para calcular los valores para la carta *Z* es [12]:

$$Z = \frac{(\bar{X} - T)}{\sigma[\bar{X}]} \tag{5}$$

Al usar como estadístico de variación a \bar{R} se tiene que los límites de control para la carta están dados por:

3 Entre los estadísticos de la variación intragrupo, $\sigma(\bar{X})$, se tienen: $\frac{R}{d_2\sqrt{n}}$ y \bar{R} , d_2 es una constante que depende del tamaño de la muestra *n* [12].

$$\begin{aligned}
 LCI &= -A_2 \\
 LC &= 0,0 \\
 LCS &= A_2
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

donde A_2 es una constante que depende del tamaño de la muestra para una carta \bar{X} normal, para un tamaño de muestra de cinco unidades $A_2 = 0,577$.

Normalmente la carta de la variable es acompañada por una carta en la que se muestre la variabilidad de las muestras. En este caso se utiliza una carta de rango normalizado R_{ij}/\bar{R}_i , para la cual:

1. La línea central para los rangos es 1.
2. Los límites de control para los rangos son D_3 y D_4 , las cuales son constantes que dependen del tamaño de la muestra y que para el caso son 0 y 2,114 respectivamente [12], [13].

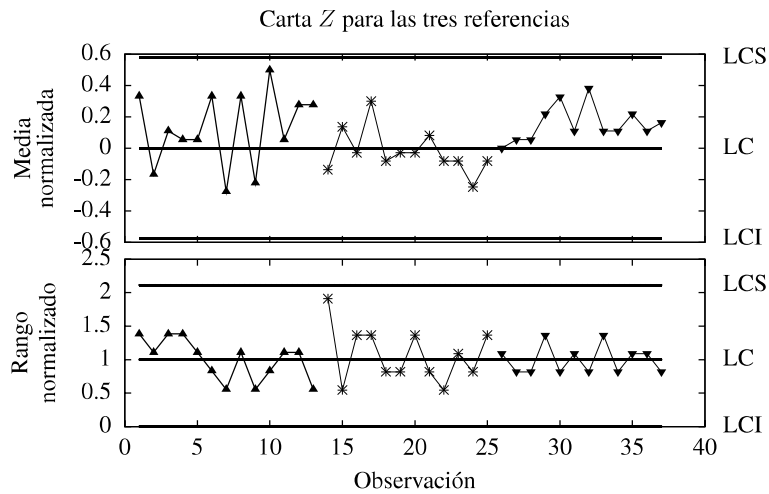


Figura 4. Carta Z (normalizada) para las tres referencias.

Con base en lo anterior los datos para la carta normalizada se muestran en la tabla V, en milésimas de *mm*.

En la figura 4 se muestra la carta normalizada para las tres referencias y también la carta para el rango normalizado. En las cuales los primeros trece valores corresponden a la referencia A, los siguientes doce a la referencia B y los restantes doce a la referencia C.

Con base en la figura 4 se puede comentar lo siguiente:

1. El gráfico de los datos normalizados muestra que los procesos no están centrados respecto a la especificación dada por la empresa, lo cual también se aprecia en cada una de las cartas individuales.
2. En los dos gráficos se aprecia que los procesos se encuentran bajo control.
3. El gráfico del rango se halla alrededor de su valor central.

4. Conclusiones

1. La carta para lotes pequeños implementada presenta el mismo comportamiento que tienen las muestras en las cartas individuales, de manera que el operario tendrá confianza en la información que brinda esta carta.
2. Es muy importante verificar la igualdad de varianzas en el caso de que se pueda utilizar una carta de diferencias, en esta implementación se puede apreciar que aunque la variación entre muestras para las diferentes referencias puede ser muy similar, por el orden de magnitud que se tiene, si no se hubiese realizado dicha prueba se habría realizado una carta de diferencias, con lo cual la carta no mostraría realmente el comportamiento del proceso y llevaría a tomar decisiones erróneas o a no ver a tiempo problemas que podrían estar presentándose.
3. En la implementación práctica de este tipo de cartas, que es muy ventajosa por el hecho de poder observar la evolución del proceso además de la evolución de cada referencia, se tiene que tener en cuenta la necesidad de capacitar a las personas encargadas del registro, de tal forma que la carta muestre el estado del proceso. Se debe observar que para esta implementación la persona encargada de llevar la carta tiene que hacer otras operaciones matemáticas con los resultados obtenidos del muestreo, lo que puede llevar a que sea mejor disponer de un sistema al cual se le entregue los datos medidos y este devuelva la información a registrar en la carta o el mismo sistema realice la carta.
4. Este tipo de cartas permite apreciar si el proceso está o no centrado respecto a las especificaciones para las distintas referencias, sean dadas por el fabricante o por el cliente.
5. Para el caso se muestra que se puede realizar la implementación de cartas de control para lotes pequeños, sin embargo se hace necesario realizar algunas consideraciones respecto a las características a controlar en cuanto a sus unidades y a la variabilidad.

Referencias

- [1] J. F. Barrera. Cartas de control para lotes pequeños. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, (96):87 – 92, 2014.
- [2] J. F. Barrera. Estudio de las características de los estadísticos utilizados en algunas cartas de control para lotes pequeños. XXIV Simposio Internacional de Estadística, 2014.
- [3] N. Farnum. Control charts for short runs: nonconstant process and measurement error. *Journal of Quality Technology*, 24(3):138 – 144, 1992.
- [4] L. Haugh and A. Pond. Adjusted individual control charts for short runs. *ASQC 49th Annual Quality congress Proceedings*, pages 1117 – 1125, 1995.
- [5] D. Holmes and E. Mergen. Process acceptance charts for short runs. *Quality Engineering*, 1(10):149 – 153, 1997.
- [6] J. M. Juran and F. M. Gryna. *Quality planning and analysis*. McGraw Hill International editions, 1993.
- [7] Hitoshi Kume. *Herramientas estadísticas básicas para el mejoramiento de la calidad*. Norma, 1992.
- [8] A. Mitra. *Fundamentals of quality control and improvement*. Prentice Hall, 1998.
- [9] D. C. Montgomery. *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & sons, fourth edition, 2001.

- [10] P. Sprent. *Applied Nonparametric Statistical Methods*. Chapman & Hall, 1992.
- [11] Wadsworth, Stephens, and Godfrey. *Métodos de Control de calidad*. Ceca, 2005.
- [12] D. Wheeler. *Short Run SPC*. SPC press, 1991.
- [13] S. Wise and D. Fire. *Innovative Control Charting, practical SPC solutions for today's manufacturing environment*. ASQ quality press, 1998.

Jesús Fidernan Barrera Cobos

Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; Especialista en Automatización de Procesos Industriales, Universidad de Los Andes especialista en Estadística de la Universidad Nacional de Colombia; MSc. en Matemática Aplicada de la Universidad Nacional de Colombia. Ha sido catedrático en instituciones El Colegio Mayor del Rosario; La Universidad Piloto de Colombia; Universidad de La Salle, Universidad Antonio Nariño y Universidad Nacional de Colombia.

Instrucciones para los Autores

Introducción

La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería a través de la publicación de artículos originales y/o inéditos. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los temas del campo de la Ingeniería.

Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo en una edición futura. Todos los artículos presentados a la revista INGENIERÍA deben ser inéditos. No se publicarán artículos que hayan sido anteriormente publicados o que hubieren sido sometidos por el autor o los autores a otros medios de difusión nacional o internacional para su publicación.

Clasificación de los artículos

La clasificación de los artículos dentro de la revista INGENIERÍA se hace de acuerdo con la categorización sugerida por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología y e Innovación COLCIENCIAS, para revistas científicas y tecnológicas indexadas. Los autores deben definir y comunicar en la carta de presentación y en la plantilla del artículo la categoría del mismo. Las categorías de los artículos son:

1. *Artículo de investigación científica y tecnológica:* Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. *Artículo de reflexión:* Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. *Artículo de revisión:* Documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.
4. *Artículo corto:* Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren de una pronta difusión.
5. *Reporte de caso:* Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas

consideradas en un caso específico. Incluye una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos.

6. *Revisión de tema:* Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

La Revista INGENIERÍA dará prelación a aquellos documentos que se clasificarían en los artículos tipo 1, 2 o 3.

Procedimiento para el envío de artículos

Los autores deberán enviar al Editor los siguientes documentos mediante la plataforma Open Journal System (OJS) de la Revista:

- Carta de presentación y originalidad del artículo: el formato de la presente carta se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/10337>

La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

- El artículo en formato digital utilizando la plantilla y las normas de presentación que se pueden consultar en el siguiente enlace (instrucciones a los autores):

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos%20e%20Indicaciones%20para%20Autores>

Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

- Debe tener al menos título de maestría
- Pertener a una institución diferente a la de los autores
- Haber realizado publicaciones en los últimos tres años

Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica revista_ing@udistrital.edu.co

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5091/6711>

Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

Aspectos a tener en cuenta

- Se considera un artículo largo cuando tiene más de diez (10) páginas con este formato. Por consiguiente se recomienda tener como límite diez (10) páginas para la elaboración de un artículo. El Comité Editorial podría solicitar a los autores reducir el tamaño del artículo cuando lo considere demasiado largo.
- Los resultados de las evaluaciones de los pares árbitros y las modificaciones que requiera el Comité Editorial serán notificados a los autores a través de la plataforma OJS y al correo electrónico del autor de correspondencia. Los autores deberán enviar nuevamente el artículo con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una, dos o más veces después de presentar el artículo.
- Cuando un artículo no cumple con las condiciones definidas para la revista, el Comité Editorial podría decidir no publicarlo. En este caso, el autor o los autores serán notificados de la decisión.

Derechos de autor

El contenido completo de la licencia Creative Commons, bajo la cual se resguardan los derechos de autor de aquellos que publican en la Revista **INGENIERÍA**, puede consultarse en: Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.