

Enero – abril 2017, Vol 24 N° 1 ISSN 1316-6832



Revista INGENIERÍA UC

Órgano de Divulgación
Científica y Tecnológica de la Facultad de Ingeniería
de la Universidad de Carabobo

Disponible en:
Revista Ingeniería UC
www.ing.uc.edu.ve/revistaing
revista.ing.uc.edu.ve

VALENCIA – VENEZUELA

Universidad de Carabobo Autoridades

Jessy Divo de Romero

Rectora

Ulises Rojas

Vicerrector Académico

José Ángel Ferreira

Vicerrector Administrativo

Pablo Aure

Secretario

Autoridades de la Facultad de Ingeniería

Prof. José Luis Nazar

Decano

Prof. Crisdalith Cachutt
Directora Esc. Ing. Industrial

Prof. Olga Martínez
Asistente al Decano

Prof. Lisbeth Manganiello
Directora de Investigación

Prof. Cesar Ruiz
Director Esc, Ing. Eléctrica

Prof. Carlos Brito
Director de Asuntos
Estudiantiles

Prof. Demetrio Rey Lago
Director de Postgrado

Prof. Carlos Alfonso
Director Esc. Ing, Mecánica

Prof. María Teresa Cruz
Directora Docencia y Currículo

Prof. Jesús Jiménez
Director del Instituto de
Matemáticas y Cálculo Aplicado

Prof. Marielvys Jiménez
Director Esc. Ing. Civil

Prof. Carlos Cochiarella
Director de Asuntos
Profesorales

Prof. Pablo Baricelli
Director del Centro de
Investigaciones Químicas

Prof. Carlos Hernández
Director Esc. Ing. Química

Prof. Nelson Hernández
Director Consejo Facultad

Prof. César Seijas
Director del Centro de
Procesamiento de imágenes

Prof. Osman Amad
Director Esc. Ing Telecomunicaciones

Prof. Lin Hurtado
Directora Estudios Básicos

Prof. Marlín Gómez
Director de Extensión

REVISTA INGENIERÍA UC

La Revista Ingeniería UC es una publicación periódica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, adscrita a la Dirección de Investigación. Es arbitrada, indizada en REVENCYT (Venezuela) ; Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile); IET/INSPEC (Unitec Kingdom UK); LATIDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México) y está incluida en Ulrich's International Periodical Directory (USA), de Publicación Internacional; DRJI; Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Se publica cada cuatro meses bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC). Se aceptan trabajos en Castellano e Inglés. Todos los trabajos son revisados por el Comité Editorial, Arbitrados por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Dirección postal: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Bárbula-Valencia, Código Postal 2008, estado Carabobo, Venezuela.

Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Página Web: <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>; <http://revista.ing.uc.edu.ve/>

ISSN 1316-6832
Depósito legal pp 92.0200

Revista Ingeniería UC

Revista indexada en:
REVENCYT (Venezuela); Actualidad Iberoamericana (CIT-Chile);
IET/INSPEC (United Kingdom UK);
LATIDEX-Catálogo (México); REDALYC (México); Periódica (México)
DRJI; Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Órgano de Divulgación Científica y Tecnológica
Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo
Valencia-Venezuela

Editor Jefe

Dra. Lisbeth Manganiello
Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Valencia, Venezuela

Comité Editorial

Dr. Adelmo Ortiz Conde
USB, Venezuela
Dr. Ángel Ríos Castro
Universidad de Castilla La Mancha, España
Dr. Antonino Caralli
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Carlos Martínez
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Enrique Barbien
University of Houston, USA
Dr. Guillermo Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Dr. Herbert J. Sira R.
CINVESTAV-IPN, México
Dr. Johnny Bullon
Universidad de los Andes, Venezuela

Dra. Maura Vázquez de Ramírez
Universidad Central de Venezuela, Venezuela
Dr. Merlin Rosales
Universidad del Zulia, Venezuela
Dr. Pablo Baricelli
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Roberto Callarotti
IVIC, Venezuela
Dr. Sergio Mora
Universidad de Santiago de Chile, Chile
Dr. Teodoro García
Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. José A. Díaz
Universidad de Florida, USA

Editores Honorarios

Dr. Edilberto Guevara
Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo, Venezuela

Dr. Francisco Arteaga
Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo, Venezuela

Asesores a la Editora Jefe:

Dr. Cristóbal Vega
Ing. Jesús Jiménez, MSc.,
IMYCA, Facultad de Ingeniería
CATS, Facultad de Ingeniería
Universidad de Carabobo

Comité Técnico*

Dr. Eliecer Colina, ULA
Dr. Francisco García Sánchez, USB
Dr. Gian Franco Passariello, USB
Dr. Giovanni De Mercato, USB
Dr. Luis Vallés, UC
Dr. Alfredo Varela, UC
Dr. Sergio Pérez, UC
Dr. Antonio Bonsjak, UC
Dra. Susana Salinas de Romero, LUZ
Ing. Donato Romanello, MSc, UC
Ing. Thalia San Antonio, MSc, UC
Dra. Nereida Sánchez, UC
Ing. Lucila Martino, UC
Ing. Ricardo Villegas, MSc, UC

Ing. Paulino Del Pino, MSc, UC
Ing. Carlos Lameda, MSc, UNEXPO
Ing. Alfonso Alfonsi, UDO
Ing. Ángel Vellegas, UC
Dr. Demetrio Rey Lago, UC
Dr. Alfonso Zozaya, UC
Dr. José A. Díaz, UC
Dr. Guillermo Montilla, UC
Dra. Laura Sáenz, UC
Lic. Atilio Morillo, MSc, UC
Ing. Sergio Vellazana, MSc, UC
Lic. Reina Windevoxhel, MSc, UC
Ing. Enrique Pérez, UC
Ing. María T. Cruz, UC

Dr. Cesar Seijas F, UC
Dr. Fernando Mora, USB
Dr. Enrique Cázares Rivera, ITESM, México
Dra. Yadira Martínez, UC
Ing. Luis Llave, UC
Ing. Johel Rodríguez, MSc, UPV, España
Lic. Celeste Fernandez, MSc, UC
Ing. José R. Pacheco, UC
Dr. Cristóbal E. Vega González, UC
Ing. Teddy Rojas, MSc, UC
Ing. Carlos Jiménez, MSc, UC
Dr. Luis Melián, UC
Ing. Antonio Millán, MSc, UC
Ing. Jesús Jiménez, MSc, UC

Ing. Wilmer Sanz, MSc, UC
Ing. Carlos Hernández, MSc, UC
Ing. Enrique Flores, MSc, UC
Dra. Damelys Zabala, UC
Ing. Jennifer Aparicio, UC
Dra. Lilly Marciano, UC
Ing. César Martínez, UC
Ing. Alejandro Centeno, UC
Ing. Enrique Flores, MSc, UC
Ing. Franklin Camejo, UC
Ing. Vanesa Altomares, UC
Dra. Sandra Cabello, UC
Ing. Julio Pineda, UC

* Lista parcial

Frecuencia de publicación

Revista INGENIERÍA UC se publica un volumen anual en tres números: abril, agosto y diciembre

Información de Contacto

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>

<http://revista.ing.uc.edu.ve/>

Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Diseño y Diagramación: Revista INGENIERÍA UC, Dirección de Investigación - IMYCA - CATS en L^AT_EX, Facultad de Ingeniería, Valencia, Venezuela
Web master: Ing. Francisco Ponte, Biblioteca Central, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela



Revista INGENIERÍA UC
VALENCIA - VENEZUELA

ISSN 1316–6832



Revista INGENIERÍA UC

ORGANO DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

FACULTAD DE INGENIERÍA

UNIVERSIDAD DE CARABOBO

Valencia – Venezuela



Contenido General, (*General content*)

v Editorial

J.–L. Nazar, L. Manganiello

1 *Letter to the editor: Environment for the edition and writing thesis of the School of Engineering of Telecommunications of the University of Carabobo*

Carta al editor: Entorno para la edición y redacción de trabajos especiales de grado de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo

Carlos Mejías, Ahmad Osman, Paulino Del Pino, Alfonso Zozaya

12 *Feature extraction of stator current in induction motors for the detection of bearings damage using support vectors machines*

Extracción de rasgos de la corriente de armadura en motores de inducción para la detección de fallas en cojinetes utilizando máquinas de vectores de soporte

Rubén Terán, Ledy Guerra, Carlos Jiménez

22 *Evaluation of expanded polystyrene with cement mortar covering under fire exposition*

Evaluación del poliestireno expandido con mortero de cemento expuesto al fuego

Francesco Rogontino, Javier López, Edson Martínez, Salvador Scola

28 *Logical–Mathematical Model of Encoder 2D–RS for Hardware Description in VHDL*

Modelo lógico–matemático del Codificador 2D–RS para descripción de hardware en VHDL

Cecilia E. Sandoval–Ruiz

40 *Determination of the effect of a normalized thermal treatment on the fatigue life by rotating flexion of an AISI 1045 steel*

Determinación del efecto de un tratamiento térmico de normalizado sobre la vida a fatiga por flexión rotativa de un acero AISI 1045

Hernán Ulloa, Dessireé Scope, Argel Porrello, Carlos Alfonzo, Franklin Camejo

46 *Performance on construction operations*

Análisis de rendimientos en operaciones de construcción

Genesis A. Hernández C., Dayana A. Morales P., Francisco Soto

53 *A cooperative method for image segmentation based on cellular automata*

Un método cooperativo para la segmentación de imágenes basado en autómatas celulares

Jorge Parra, Niriaska Perozo

63 *Determination of the adsorption capacity of ibuprofen and diclofenac in agricultural venezuelan soils*

Determinación de la capacidad de adsorción del ibuprofeno y el diclofenac en suelos agrícolas venezolanos

Angelina Correia, Neudis Subero, Lisbeth Manganiello, Lily Marcano

Contenido General (Continuación), (*General content*)

-
- 73 *Radar imaging basics*
Fundamentos de la imagen de radar
A. J. Zozaya, F. Carrera, R. Bolaños
-
- 81 *Supervisory control application to solving optimal control problems for discrete event systems*
Aplicación de control supervisorio en la resolución de problemas de control óptimo para sistemas de eventos discretos
Guelvis Mata
-
- 91 *Treatment landfill leachate in filters anaerobic upflow of two phases (DI – FAFS)*
Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en filtros anaerobios de flujo ascendente de dos fases (DI – FAFS)
Julio Isaac Maldonado M., Jarson Alexis Rodríguez Chona, Ángela Maritza Cajiao
-
- 105 *Student schedule generation with option selection at a university engineering faculty*
Asignación de horarios estudiantiles con selección de opciones en una facultad universitaria de ingeniería
Demetrio Rey, Luis Llave, Enrique Flores, Víctor Barrios, Braulio De Abreu, José L. Nazar
-
- 115 *Comparative of reinforced concrete structural walls design compliant to FONDONORMA 1753:2006 and ACI 318–14*
Comparación del diseño de muros estructurales de concreto armado según FONDONORMA 1753:2006 y ACI 318–14
Simón Arteaga, Jorge Malavé, José Olival
-
- 128 *Parameters relating to chemical properties and organoleptic quality of waters confluing reservoirs for human consumption*
Parámetros relativos a propiedades químicas y calidad organoléptica de aguas que confluyen a embalses destinados al consumo humano
Milagros Jimenez–Noda, Rosalyn Cova, Lilitza Trías, Cristóbal Vega, Lisbeth Manganiello
-

Apéndices

-
- Apéndice: 1 **Línea editorial**
Apéndice: 2 **Editorial Line**
Apéndice: 3 **Normas para la presentación de artículos**
Apéndice: 5 **Authors Information**
Apéndice: 7 **Carta de compromiso**
Apéndice: 8 **Compromise letter**
Apéndice: 9 **Comité editorial**
-

Editorial

La Revista INGENIERÍA UC y nuestra ilustre Universidad de Carabobo dedican la edición de su número uno (1) correspondiente al lapso enero – abril del año 2017, a VENEZUELA, nuestro país, uno de los más hermosos sobre la Tierra, por sus ríos, sus montañas, sus playas, sus médanos, sus llanos, sus sabanas su salto Ángel entre otras riquezas que suman minerales y petrolíferas; pero por sobre todas las cosas la riqueza que representan sus estudiantes y profesores. Porque saben decir presente cuando el deber llama, porque a pesar de todo seguimos adelante y nos crecemos como venezolanos ante la adversidad, demostrando hoy por hoy que lo más valioso que tiene esta tierra bendecida por Dios es su GENTE. Muestra de ello es el trabajo científico que hemos recopilado para esta entrega tanto de nuestra Universidad; como de la Universidad de los Andes – ULA, la Universidad Centro Occidental Lisandro Alvarado – UCLA, complementada con las contribuciones de investigadores de Colombia y Ecuador.

Abrimos esta publicación con una interesante “Carta al Editor” donde se pone de manifiesto la necesidad de estandarizar la redacción de los trabajos de grado de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de nuestra facultad utilizando como base el editor científico L^AT_EX. Terán Guerra y Jiménez nos presentan los fundamentos del uso de clasificadores basados en inteligencia de maquinas, específicamente maquinas de vectores de soporte, aplicado al diagnostico de motores de inducción para detectar fallas en cojinetes con una alta exactitud, especialmente si el motor opera en la condición de plena carga. Rogontino y colaboradores exponen en su investigación las ventajas del mortero de cemento como defensa al poliestireno expandido en caso de incendio. Este mortero presento un agrietamiento leve con buena adherencia a la malla electrosoldada. Sandoval-Ruiz en su contribución desarrolla un modelo lógico – matemático del codificador Reed Salomón, este modelo constituye un aporte al diseño de codificadores complejos con hardware libre ya que simplifica la descripción VHDL del codificador y promueve su actualización en el tiempo.

Ulloa y colaboradores demuestran en su trabajo que el tratamiento térmico normalizado aplicado al acero 1045 con ciclaje acumulado influye en el aumento de numero de ciclos para que la probabilidad de fractura sea de 1 %, traduciéndose en una ganancia en la vida a la fatiga. Hernández, Morales y Soto evaluaron los rendimientos en operaciones de construcción tomando como base, la toma de tiempos probabilísticos de ejecución de tareas que componen dichas operaciones; la simulación de procesos de construcción aporta una herramienta útil para la planificación y administración de la obra, generando modelos teóricos con datos actuales. Parra y Perozo proponen en su investigación un método cooperativo para detectar bordes en imágenes basándose en autómatas celulares en el que las células comparan componentes RGB de la vecindad cooperando entre ellas para determinar si existen bordes, logrando una imagen con gran nivel de detalle. Correia y Colaboradores en su trabajo muestran un estudio de alto interés medioambiental, donde se determino la capacidad de absorción de los fármacos Ibuprofeno y Diclofenac en suelos de interés agrícola mediante el uso de isotermas de adsorción, determinándose que la adsorción de estos compuestos es mayor en suelos con pH ácido.

Zozaya, Carrera y Bolaños realizaron en su contribución una revisión de los fundamentos de la imagen de radar desde el punto de vista de la teoría de campo tomando como referencia el desarrollo

de Sullivan y haciendo correcciones sobre dos errores cometidos en su publicación. Mata expone sobre el control de supervisión en sistemas de eventos discretos y su aplicación para la resolución de problemas correspondiente al control optimum, que se relaciona con una situación en la que el control se ejecuta para satisfacer una serie de especificaciones cualitativas máximas o mínimas en el Lenguaje generado o marcado para sistemas de eventos discretos. Maldonado, Rodríguez y Cajiao demuestran que el tratamiento de lixiviados de relleno sanitario en filtros anaeróbicos en flujo ascendentes en dos fases (DI- FAFS) se puede realizar con volúmenes de las fases no metanogénicas del 20% del volumen total del reactor y las metanogénicas con un volumen total del 80% del reactor. Rey y colaboradores describen el algoritmo de solución a un problema real como es la asignación de horarios a estudiantes de una facultad de ingeniería, el mismo consiste en permitir a los alumnos seleccionar tres opciones en orden de preferencia y posteriormente generar un horario que satisfaga su necesidad, con uno igual o con un horario aproximado a una de sus tres solicitudes.

Arteaga Malavé y Olival establecieron una comparación entre el diseño de muros estructurales en base al proyecto de norma FONDONORMA 1753:2006 y la norma americana ACI 318-14, evidenciando las deficiencias del código local con respecto a la normativa internacional, proporcionando mediante este trabajo a los profesionales vinculados al cálculo estructural un procedimiento sistemático, preciso, correcto y actual del diseño de estos elementos. Jiménez - Noda y colaboradores estudiaron los parámetros relativos a propiedades químicas y calidad organoléptica de aguas producto de los aportes de diferentes tributarios y que finalmente confluyen a embalses destinados al consumo humano, tal es el caso del río El Paíto, una fuente de agua que desemboca en el embalse de Pao Cachinche. Con una muestra de ambos períodos, en varios puntos representativos de la ruta del río El Paíto, se determinaron parámetros antes mencionados primordiales para la clasificación de la calidad de los cuerpos de agua. Los ensayos estadísticos permitieron garantizar que las aguas en el caudal del río El Paíto en este momento no cumplen con las características necesarias de las aguas, para poder ser acondicionadas mediante tratamientos convencionales.

Nos despedimos deseando la paz y la prosperidad de nuestra amada VENEZUELA para este año que iniciamos y como es costumbre en nosotros invitando muy cordialmente a publicar en nuestra Revista INGENIERÍA UC a todos aquellos investigadores nacionales e internacionales interesados en confiarnos sus productos científicos en las diferentes áreas de la ingeniería, ciencias afines.

Profesor *José Luís Nazar*
Decano de la Facultad de Ingeniería

Profesora *Lisbeth Manganiello*, PhD
Editora – Jefe

Letter to the editor: Environment for the edition and writing thesis of the School of Engineering of Telecommunications of the University of Carabobo

Carlos Mejías, Ahmad Osman*, Paulino Del Pino, Alfonso Zozaya

Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

La escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo ha venido detectando ciertas inconformidades, entre los que hacemos vida en esta institución, al momento de llevar a cabo la edición de un trabajo especial de grado. Se ha conincido en la necesidad de estandarizar y automatizar el proceso de edición de este documento tal manera de satisfacer algunas necesidades. Por eso, el propósito de este trabajo es la construcción de un entorno para la edición y redacción de Trabajos Especiales de Grado (EERTEG) en la Escuela de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo a través de una estructura base para la construcción del documentos bajo el esquema de composición tipográfica \LaTeX . De esta manera, se genera una herramienta útil para la edición de este documento de producción científica liberando al autor de algunas preocupaciones relativas a detalles de forma, aumentando la calidad tipográfica y facilitando su posterior divulgación en revistas científica especializadas.

Keywords: \LaTeX ; Trabajos especiales de grado; ingeniería; telecomunicaciones.

Carta al editor: Entorno para la edición y redacción de trabajos especiales de grado de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo

Resumen.-

The staff school of Telecommunications Engineering, of the University of Carabobo, have detected some nonconformities at the moment of the edition of an undergraduate thesis. It has agreed on the need to standardize and automate the process of editing in one way to meet some needs. So, the purpose of this work is showing how was the building of the environment for the edition and writing for the undergraduate theses (EERTEG) for this school. Thus, this might be possible through a basic document structure under the typographic composition scheme \LaTeX . On this way, this useful tool releases the authors of scientific production of some concerns about details of form; increasing typographic quality and facilitating its later disclosure in specialized scientific journals.

Palabras clave: \LaTeX ; Undergraduate thesis; telecommunications; engineering.

Recibido: octubre 2016

Aceptado: enero 2017

1. Introducción

Al editor y a los asiduos lectores de *Revista Ingeniería UC*, sírvanse de la presente publicación como un instrumento de valoración a las contribuciones que se hacen dentro de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo a fin

*Autor para correspondencia

Correo-e: aosman@uc.edu.ve (Ahmad Osman)

de de facilitar algunos procesos relacionados con la producción científica. Esta intención, pretende divulgar y posteriormente deja mostrar a los lectores, un trabajo que constituye un punto de partida para la estandarización, automatización y formación de identidad en los documentos de producción científica que se generan desde la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo.

La Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo ha venido manifestando ciertas inconformidades, entre los que hacemos vida en esta institución, al momento de llevar a cabo la edición de un Trabajo Especial de Grado (TEG). Se ha coincidido en la necesidad de estandarizar y en lo posible automatizar los procesos de edición a manera de satisfacer las necesidades propias de esta escuela. Por eso, el objetivo de este trabajo es el desarrollo de un *Entorno para la Edición y Redacción de Trabajos Especiales de Grado* (EERTEG) pertenecientes a la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo a través de una estructura base para la construcción del documentos bajo el esquema de composición tipográfica \LaTeX , generando así una herramienta útil para la producción científica de forma automatizada; liberando al autor de algunas preocupaciones relativas a detalles de forma. [1]

A manera historiográfica es importante traer a colación que desde hace un poco más de una década se ha venido promoviendo, por parte de los profesores Alfonso Zozaya y Paulino Del Pino, un movimiento cultural relacionado con la evolución en los patrones de edición y redacción de trabajos especiales de grado que empezó en el Dpto. de Electrónica y Comunicaciones de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, y que alcanza un excelente nivel de madurez en la antesala de la creación de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones.

En particular, desde el Laboratorio de Electromagnetismo Aplicado (LaBEMA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, un grupo de tesis comenzaron a materializar la idea de generar una identidad y al mismo tiempo facilitar la edición de los TEGs incorporando herramientas de composición tipográficas basadas en

lenguaje \LaTeX . El uso de \LaTeX , en comparación con los editores de texto del tipo WYSIWYG, siglas de *What You See Is What You Get*, como Microsoft Word, implicaba un enorme cambio de paradigma. \LaTeX obliga a enfrentar la escritura pensando en la estructura lógica del discurso y no en su disposición estética, y permite, a su vez, la creación de documentos con un acabado tipográfico profesional. [2][3]

De esta forma, se produjeron trabajos especiales de grado no solo mejor estructurados, sino también mejor redactados, los cuales, prontamente, llamaron la atención de la comunidad que hacía vida en esos espacios. Este impulso de calidad fue objeto merecedor de tres premios nacionales IEEE-Inelectra a los mejores trabajos especiales de grado en el área de electrónica y comunicaciones: dos primeros y un tercero lugares en los años 2006, 2007 y 2009 respectivamente.

La pretensión inicial, de este trabajo, no es la invención de normas estéticas desde el punto de vista artístico, más bien es la adopción, de manera estructurada, consolidada y automatizada, de algunas normas instituidas, como las normas IEEE, normas Vancouver, normas APA a fin de facilitar la comprensión, mejorar la estética, mejorar los procesos de síntesis, mejorar los procesos de análisis, disminuir probabilidades de errores de forma, centrar más la atención en el contenido de lo que se escribe, así como también construir una identidad tipográfica acorde a documentos científicos en el área de la Ingeniería de Telecomunicaciones que pueda ser visible y respetada en cualquier parte del mundo.

2. Metodología

Algunos docentes que hace vida en la recientemente creada Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo, gracias a sus raíces formativas, algunos ganadores de los premios IEEE-Inelectra antes mencionados, decidieron retomar algunas de las iniciativas expuestas en la sección anterior, esta vez para construir una normativa institucional oriunda de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, cuyo propósito reside en satisfacer las necesidades propias de

nuestra comunidad a la hora de emprender los procesos de edición y redacción de los TEG.

En inicio, se comenzó a trabajar en la adaptación de algunas plantillas de trabajos de grado (hechas en \LaTeX) recopiladas de diversas fuentes, que sirvieron de insumo para seleccionar, categorizar y jerarquizar las secciones metodológicas que debe llevar un TEG, tomando en cuenta la naturaleza de los proyectos, los procesos cognitivos y metodológicos que predominan en el quehacer científico relacionado con el área de las telecomunicaciones.

La segunda etapa, consistió en la detección cualitativa de necesidades relacionadas con algunas manifestaciones evidentes en lo que respecta a lo denominado «detalles de forma». Si bien no existe ninguna investigación científica formal que evidencie la necesidad de facilitar la edición de los detalles de forma de un TEG en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones, en este caso, se asume un sentir colectivo informal cónsono con la construcción de rasgos de identidad, que caracterizan y hacen distinguir a la Escuela de Telecomunicaciones como una institución de vanguardia al servicio de la producción intelectual y al desarrollo de la sociedad.

Luego, se realizó un rastreo en la páginas web oficiales de universidades como el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), la Universidad de Stanford, la Universidad de Cambridge, la Universidad de Oxford y la Universidad Técnica de Múnich (TUM). Ellas, que gozan de prestigio internacional en las áreas de conocimiento de ingeniería, matemática, física y computación, recomiendan, abierta y enfáticamente en sus páginas institucionales, el uso de \LaTeX como una herramienta de composición de texto para la redacción de trabajos de grado y tesis doctorales, proporcionando, además, una plantilla con el estilo requerido para su elaboración. En la Tabla 1 se muestra una tabla en la cual se explicita las de que manera se ofrece el uso de \LaTeX en cada una de las universidades: de manera oficial, recomendada y en plataformas online.

Seguidamente, se buscó optimizar la calidad

Tabla 1: Uso de \LaTeX en cada una de las universidades: de manera oficial, recomendada y en plataformas

Proceso Tiempo	Oficial	Recomienda	Online
	Instituto Tecnológico de Massachusetts	Si	Si
Universidad de Stanford	Si	Si	Si
Universidad de Cambridge	Si	Si	Si
Universidad de Oxford	Si	Si	Si
Universidad Técnica de Múnich	Si	Si	Si

del contenido y de alguna manera consumir el menor esfuerzo cognitivo en detalles de forma. Para esto último, fue necesario indagar y sobre algunas normas existentes para la publicación de documentos científicos, entre las cuales, hubo mayor resonancia con la tipología de escritura de documentos de ingeniería adoptada por la IEEE. [4, 5]

2.1. Implementación del EERTEG

Finalmente, se implementaron todos los criterios expuestos anteriormente en una plantilla escrita bajo código \LaTeX , en la cual se programaron todos los macros necesarios para respectiva automatización del proceso de edición. Se seleccionaron aquellos elementos y herramientas que permitieran, a nuestro criterio, mayor practicidad, menor distracción visual, mayor calidad tipográfica, mejor resolución gráfica, mejor disposición estética, mayor énfasis y concreción en la presentación de los capítulos que contienen los procedimientos de trabajo, discusión de resultados y conclusiones [6].

El archivo `Thesis.cls` fue preparado preparado con el fin de facilitar la construcción de todo el trabajo; en ella se encuentran la mayoría de las normas y los parámetros requeridos, por la Escuela de Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, para la entrega del Trabajo Especial de Grado. A continuación se detalla brevemente cómo se construyó la plantilla.

2.1.1. Carpetas

Se creó un archivo comprimido `.zip` el cual incluye una serie de archivos y carpetas descritas de la siguiente manera:

Apéndices. En esta carpeta se encuentra los archivos que contienen los apéndices, donde cada apéndice debe estar, de manera individual, en un archivo `.tex` por separado. La carpeta incluye un archivo modelo `.tex` para escribir dichos apéndices.

Capítulos. En esta carpeta se encuentra los archivos que contienen los capítulos, donde cada capítulo debe estar, de manera individual, en un archivo `.tex` por separado. Generalmente los capítulos están distribuidos de la siguiente manera: capítulo 1 (Introducción), capítulo 2 (Marco Conceptual), capítulo 3 (Procedimiento de la investigación), capítulo 4 (Análisis, interpretación y presentación de los resultados) y capítulo 5 (Conclusiones y Recomendaciones).

Figuras. En esta carpeta se encuentra los archivos que contienen las figuras editadas y listas para mostrar en el documento. Las extensiones de imágenes comúnmente utilizadas son: `.pdf`, `.svg`, `.png`, `.jpeg`, `.eps`.

2.1.2. Archivos

En esta plantilla se encontrarán distintos tipos de archivos, estos son:

- `.tex`: Archivo de entrada \LaTeX . Compilado con \LaTeX .
 - `.ty`: \LaTeX Macro Package. Este es un archivo que se puede cargar en el documento usando el comando `\usepackage`
 - `.dtx`: \TeX documentado. Formato de distribución principal para archivos de estilo de \LaTeX . Si se procesa un archivo de este tipo, se obtiene un código documentado del paquete contenido en este archivo.
 - `.ins`: Instalador de los archivos contenidos en el archivo `.dtx` correspondiente. Si se baja un paquete de la red, se obtendrá un archivo `.ins` y uno `.idx`. Se debe ejecutar \LaTeX sobre el archivo `.ins` para instalar el archivo `.idx` y con él, el paquete deseado.
 - `.cls`: Archivo de clase. Define como el documento debe lucir. Este archivo es cargado con el comando `\documentclass`.
 - `.bib`: Archivo utilizado por BibTeX que contiene la base de datos de las Referencias Bibliográficas utilizadas en el documento.
- Los siguientes tipos de archivo son generados cuando se ejecuta $\LaTeX()$ en el archivo de entrada:
- `.dvi`: Device Independent File. El resultado principal de la compilación de un archivo de entrada \LaTeX .
 - `.log`: Brinda información detallada de lo que sucedió en la última compilación generada con \LaTeX .
 - `.toc`: Contiene todas las secciones de encabezados. Es leído para la siguiente compilación y se utiliza para generar la tabla de contenidos.
 - `.lof`: Es como un `.toc` pero para la lista de imágenes.
 - `.lot`: Es como un `.toc` pero para la lista de tablas.
 - `.aux`: Otro archivo que transporta información desde una compilación hacia la siguiente. Entre otras cosas, contiene información sobre las referencias cruzadas.
 - `.idx`: Si el documento contiene un índice, \LaTeX guarda todas las palabras que van dentro del mismo en este archivo. Se debe procesar este archivo con el comando `makeindex`.
 - `.ind`: Es el archivo `.idx` luego de procesado, listo para ser incluido en el siguiente ciclo de compilación.
 - `.ilg`: Como `.log` pero para el comando `makeindex`.

2.1.3. Paquetes

En el archivo `Thesis.cls` fueron cargados una serie de paquetes que permiten el uso efectivo de una serie de comandos en el archivo `Principal.tex`. Antes de compilar el documento, se debe verificar si se tiene instalados los paquetes de configuración que se muestran con asterisco. [7, 8, 9]

- **inputenc.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage[utf8]{inputenc}
```

Permite escribir directamente, en la página de códigos, de la forma más común posible, transformando internamente el texto introducido a texto \LaTeX . Se usa `utf8` en las opciones del paquete si la codificación es de tipo `utf-8`; tal y como lo es para muchas distribuciones de Linux.

- **fontenc.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage[T1]{fontenc}
```

Indica a \LaTeX que use la codificación de fuente T1. Se usa para tener acceso a letras acentuadas reales y no imitadas con la superposición de letra y acento.

- **textcomp.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage{textcomp}
```

Es el paquete que soporta las fuentes *Text Companion fonts*, el cual provee una gran variedad de símbolos tales como ©, ¥, €, °C, °, entre otros.

- ***bera.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage[scaled]{beramono, berasans}
```

Beramomo selecciona el tipo de fuente Bera Mono por defecto cuando se use la familia de fuente *Typewriter*. Berasans selecciona el tipo de fuente Bera Sans por defecto cuando se use la familia de fuente *Sans Serif*. La opción `scaled`, escala el tamaño normal de la fuente en un 90%.

- ***slahbox.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage{slahbox}
```

Permite dibujar una diagonal en una columna en \LaTeX .

- ***float.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage{float}
```

Controla la ubicación de los flotantes.

- ***biblatex.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage{biblatex}
```

Reimplementación de los paquetes de referencias bibliográficas proporcionados por \LaTeX y BibTeX. Es la evolución de BibTeX y provee un gama más amplia de opciones para citar, permite separar las referencias básicas de las referencias de consulta o agruparlas por secciones.

- ***etoolbox.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage{etoolbox}
```

Paquete orientado principalmente a la clase \LaTeX y el paquete `author`.

- ***logreq.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage{logreq}
```

Ayuda a automatizar el flujo de trabajo de \LaTeX típico cuando involucra correr varias veces la compilación.

- ***ifplatform.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage{ifplatform}
```

Determina el sistema operativo en el que se está compilando en documento \LaTeX .

- ***csquotes.** Sintaxis de carga:

```
\usepackage{csquotest}
```

Control avanzado de citas en línea y visualización de las mismas.

- ***eulervm y palatino.** Sintaxis de carga:

`\usepackage{eulervm, palatino}`

Selecciona la fuente Euler para el texto matemático y la fuente Palatino para el texto normal en roman.

- **babel**. Sintaxis de carga:

`\usepackage[spanish]{babel}`

Selecciona el estilo que permite adaptar una serie de elementos del documento de \LaTeX a la lengua española, tanto en las traducciones como en la tipografía.

- ***setspace**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{setspace}`

Se encarga de configurar los diferentes espaciado dentro un documento. Espaciado entre líneas, entre párrafos y figuras, entre flotantes, entre flotantes y texto, y entre párrafos.

- ***vmargin**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{vmargin}`

Permite editar el tamaño de los márgenes del documento, dimensiones para el encabezado y pie de página, orientación del papel, así como habilitar la impresión doble cara.

- ***fancyhdr**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{fancyhdr}`

Permite personalizar el encabezado y el pie de página del documento.

- Los paquetes `amsmath`, `amssymb`, `amscd`, `amsthm`, `xspace`. Su Sintaxis de carga es:

`\usepackage{amsmath, amssymb, amscd, amsthm, xspace}`

Definen un conjunto de paquetes \LaTeX para matemáticas desarrollado por la Sociedad Americana de Matemáticas (AMS).

- ***caption**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{caption}`

Permite personalizar las leyendas de los ambientes flotantes como tablas o figuras.

- ***url**. Sintaxis de carga:

`\usepackage[hyphens]{url}`

Permite incluir y resaltar URLs

- ***textcase**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{textcase}`

Contiene los comandos que permite colocar el texto en mayúsculas sin afectar las expresiones matemáticas en el argumento.

- ***graphics**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{graphicx}`

Permite la inclusión de gráficos.

- ***subfig**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{subfig}`

Permite manipular y realizar referencias de varias subfiguras o subtablas dentro de un sólo entorno de figura o tabla.

- ***rotating**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{rotating}`

Permite rotar diferentes objetos.

- ***listings**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{listings}`

Permite presentar códigos de programación con un estilo de fuente y colores similares al presentado por el interpretador del lenguaje de programación utilizado.

- ***hyperref**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{hyperref}`

Permite la incorporación de hipervínculos en nuestro documento PDF, para navegar por las diferentes secciones, referencias y citas.

- ***xcolor**. Sintaxis de carga:

`\usepackage{xcolor}`

Permite la incorporación de una gamma de colores, tonalidades, sombras y mezclas. Este paquete se encuentra en `texlive` para el caso de TeXLive.

Todos los paquetes que se incluyeron en el trabajo permiten el uso de comandos con funciones específicas con el objeto de lograr las descripciones hechas en los párrafos anteriores. El uso de estos comandos son detallados con mayor especificidad en el manual de instrucciones que se elaboró.

Adicionalmente, en el archivo `Thesis.cls` se crearon variables nuevas de distinta naturaleza con el objeto de automatizar la generación de las portadas necesarias al momento de realizar la compilación, así como también el espaciado de los pies de figuras, los pies de tablas y la relación necesaria entre márgenes e interlineado, para una lectura fluida, de tal manera, que el usuario solo se preocupe de «rellenar» los espacios con contenido.

En el caso particular de la plantilla del proyecto especial de grado se incluyó el paquete:

- **pgfgantt** Sintaxis de carga:

`\usepackage{pgfgantt}`

Es un paquete macro para la creación de diagramas de gantt a través de gráficos que incluyen una sintaxis similar a la usada por Tikz. Este paquete se encuentra en `texlive-pictures` para el caso de TeXLive.

2.1.4. Construcción de la estructura interna del EERTEG

Una vez seleccionados y cargados los paquetes se construyó una estructura, que se puede observar tanto en el archivo principal como el en los archivos de los capítulos, formada por todos los elementos que debería tener un proyecto especial de grado y un trabajo especial de grado. Es decir, se incluyó el esqueleto de todos los elementos necesarios para la edición del texto, esto es:

- Capítulos.
- Resumen.
- índice general.
- índices de figuras.
- índices de tablas.
- Lista de acrónimos.
- Lista de constantes físicas.
- Referencias.
- Referencias cruzadas.
- Los objetos flotantes.
- Secciones de código.
- Ecuaciones.
- Secciones y subsecciones.
- Diagramas de Gantt.
- Hipervínculos

Todo lo anterior se dispone, de tal manera, que el usuario solo tenga que rellenar sin necesidad de interactuar con código \LaTeX , es decir solo escribir el contenido o información estrictamente referente a su investigación y así generar el documento estructurado de manera automática.

3. Análisis y discusión de resultados

El EERTEG se centra en dos ejes fundamentales. Primero, el eje estructural; esto es la manera en cómo se debe disponer, qué debe llevar y qué nombres se le deben colocar a las partes y las secciones del documento. Este aspecto es, en inicio, una propuesta piloto, meramente experimental y exploratoria, establecida en convenio por los profesores de planta de la escuela y está sujeta a modificaciones siempre que se someta, como mínimo, a los debidos procesos institucionales de aprobación y divulgación. El segundo eje, es el de automatización, que consiste en utilizar la <clase> proporcionada en el EERTEG para generar el documento final de manera automatizada.

Cabe destacar que el EERTEG se presenta en dos modalidades, la primera es para el proyecto o propuesta del trabajo especial de grado y la otra es para el trabajo especial de grado definitivo, ambas elaboradas bajo el esquema de composición tipográfica \LaTeX . Los archivos necesarios para trabajar en cada modalidad del EERTEG se encuentran alojados en <http://telecom.ing.uc.edu.ve/lista-documentos> en su versión más actualizada (v1.4), así como también el manual de instrucciones que se elaboró.

3.1. El manual de instrucciones para el usuario

Toda la estructura construida en la sección 2.1.4 constituye en sí un manual de instrucciones de usuario. Es decir, además de todos los archivos correspondientes a los capítulos, existe un archivo adicional que sirve: de prueba de compilación, de estructura guía para la edición de los trabajos y también es un manual de instrucciones de usuario. En dicho manual se desarrollan los siguientes tópicos:

- Una explicación de la Plantilla TEG Escuela Telecomunicaciones.
- Un esquema de realización del Trabajo Especial de Grado.
- Una sección dedicada al funcionamiento de \LaTeX
- Software necesario para trabajar con \LaTeX

- Una sección dedicada ¿Cómo compilar un documento en \LaTeX ?
- Una sección dedicada ¿Cómo instalar paquetes en las distribuciones \LaTeX ?
- Manejo de errores.
- Símbolos Matemáticos comunes en \LaTeX .
- Estructura de la plantilla: carpetas, archivos, paquetes, espaciado.
- Referencias Cruzadas.
- Objetos flotantes.
- Diagramas de gantt.
- Hipervínculos
- Elaboración de gráficos
- Composición de ecuaciones
- Inserción un código de programación
- Secciones y Sub-secciones
- Referencias Bibliográficas
- Creación de Ficheros .bib
- Cómo trabajar con JabRef
- Cómo trabajar citar una referencia bibliográfica

El procedimiento para llevar a cabo la construcción de un documento usando el EERTEG consta de los siguientes pasos: descargar los archivos de la plantilla disponibles en el link mostrado anteriormente (D), descargar e instalar un motor \LaTeX acorde con su sistema operativo (M), descargar e instalar un editor que interprete código \LaTeX (I), abrir el archivo `principal.tex` con el editor (A) , compilar el documento (C) y por último, editar (E). Este procedimiento describe el proceso inicial requerido para observar la plantilla compilada. Para realizar modificaciones en el interior del documento, se debe editar los archivos correspondientes a los

capítulos y compilar, es decir repetir los pasos C y E sucesivamente. La Figura 1 muestra un diagrama que con los pasos a seguir para hacer uso correcto de la plantilla.

En otras palabras, la elaboración del documento requiere normalmente de dos etapas. En la primera hay que crear, mediante cualquier editor de texto plano, un fichero fuente que, con las órdenes y comandos adecuados, contenga el texto que queremos imprimir. La segunda consiste en procesar este fichero; el procesador de textos interpreta las órdenes escritas en él y compila el documento, dejándolo preparado para que pueda ser enviado a la salida correspondiente, ya sea la pantalla o la impresora. Ahora bien, si se quiere añadir o cambiar algo en el documento, se deberán hacer los cambios en el fichero fuente y procesarlo de nuevo.

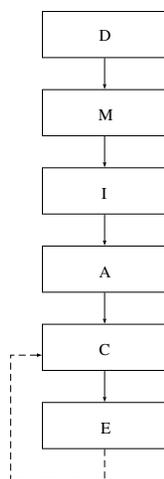


Figure 1: Diagrama de flujo del procedimiento para llevar a cabo la construcción de un documento usando el EERTEG.

Los archivos descargados a través del link anterior contienen todo lo necesario para trabajar en el EERTEG. El manual de instrucciones, como se mostró anteriormente, explica de manera detallada en funcionamiento del entorno y toda la normativa establecida correspondiente al eje estructural que compete: las referencias, índice general, índice de tablas, índices de figuras, disposición de códigos de programación, generación de gráficos vectoriales, entre otros aspectos.

Simultáneamente se explica, de manera breve, algunos tópicos fundamentales para llevar a cabo

la elaboración del Proyecto Especial de Grado y del Trabajo Especial de Grado, así como también algunos ejemplos que ayudan a construir su esquema inicial. Es importante recalcar que el EERTEG basado en \LaTeX genera el documento de forma automatizada, liberando al autor de la mayoría de preocupaciones relativas a los detalles de forma.

3.2. Algunas mediciones prematuras

El EERTEG se ha implementado como herramienta de edición para la totalidad de los TEGs desarrollados en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo, generando resultados positivos e influyendo de manera sustancial en la cultura de edición de los demás documentos científicos que se elaboran en esta escuela. Ellos pueden servir de referencia clara y contundente para cualquier procesos de adecuación de normativas que requieran estar basadas en las implementadas en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo.

Una vez entrevistados un total de 22 egresados, de la Escuela de Telecomunicaciones y considerados por haber tenido un buen desempeño en la realización de sus trabajos especiales de grado, emergen ciertos indicadores preliminares. En este sentido, en la Tabla 2, se muestran algunos resultados que permiten tener una noción prematura sobre el desempeño de la herramienta en función de algunos procesos intrínsecos que se manifiestan en el desarrollo de un trabajo especial de grado, es decir, se indagó en el tiempo que invirtieron los estudiantes en cerrar algunos procesos relacionados con la elaboración de su trabajo especial de grado. La Tabla 2 refleja el porcentaje de personas que invirtieron ciertos lapsos en cada uno de los procesos A, B y C. El primer proceso monitoreado fue, una vez culminados todos los objetivos de su trabajo especial de grado, ¿Cuánto tiempo le llevó al estudiante el proceso de redacción? (A), el segundo proceso monitoreado fue ¿Cuánto tiempo le llevó al estudiante adaptarse a la plantilla de trabajos especiales de grado?(B) y el tercer proceso monitoreado fue ¿Cuánto tiempo le llevó al estudiante adaptar su trabajo especial

Tabla 2: Porcentaje de personas que invirtieron ciertos lapsos en los procesos A, B y C

Proceso	A	B	C
Entre seis meses y un año	0%	0%	0%
Entre tres meses y seis meses	13,6%	4,5%	13,6%
Entre un mes y tres meses	54,5%	13,6%	18,2%
Entre una semana y un mes	27,3%	50%	40,9%
Menos de una semana	0%	31,8%	22,7%

de grado a las normas de forma de la Escuela de Telecomunicaciones ? (C). Para el caso A se observa una evidente mayoría de personas que consumen entre un mes y tres meses en cerrar el procesos de redacción. También se observa que la mayoría de los estudiantes tardan entre una semana y un mes en adaptarse al EERTEG y por último una ligera mayoría tarda entre una semana y un mes y menos de una semana en adaptar su trabajo a las normas de forma de forma de la Escuela de Telecomunicaciones.

4. Conclusiones y recomendaciones

A manera de reflexión final, se tiene entonces que el EERTEG da un primer paso hacia un mayor control de la movilidad de los documentos, a la estandarización, automatización y construcción de una identidad normativa en los documentos de producción científica de la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo, permitiendo centrar los esfuerzos cognitivos única y exclusivamente en el contenido.

Además, fue elaborado en su totalidad bajo software libre y dispone de todas las libertades posibles a la hora de que alguna escuela o facultad quiera utilizarlo. De hecho, el propósito, es que el resto de las instituciones académicas que se desempeñan en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo: escuelas de pregrado, área de postgrado, y otros órganos de divulgación científica, se sirvan de los ejemplos Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones y Revista Ingeniería UC, adoptando esta cultura a fin de que los artículos científicos e insumos

científicos como: TEGs de pregrado y postgrado emerjan, desde su primera aprobación, en formato \LaTeX , facilitando su posterior publicación tanto en revistas internas, como en revistas nacionales e internacionales y catapultar, a la Universidad de Carabobo, como una institución de vanguardia en lo que respecta a la producción científica.

En otro orden de ideas, las monografías que se presentan en la Escuela de Ingeniería de Telecomunicaciones de la Universidad de Carabobo bajo el nombre de Trabajos Especiales de Grado, constituyen sin duda una indagación exhaustiva y formal sobre un tópico abordado con originalidad relacionado con el área de procesamiento digital de señales y/o con con el área de electromagnetismo y radiación, que si bien no pretenden transformar el conocimiento existente ni construir nuevo conocimiento, si pretenden ser punto de partida e insumo científico para el desarrollo de investigaciones que contribuyan, tanto a elevar el nivel investigativo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como al avance tecnológico de la nación.

Por último, se recomienda e invita a toda la comunidad científica de esta facultad a la realización de encuestas y entrevistas para medir e interpretar la aceptación del EERTEG y realizar estudios comparativos para constatar los procesos de edición, redacción y construcción de formatos elaborados bajo software con filosofía WYSIWYG¹ y de esa manera evaluar la posibilidad de que se asuma \LaTeX como esquema de composición tipográfica en toda la facultad de ingeniería y en si es posible en toda la Universidad de Carabobo.

Referencias

- [1] Leslie Lamport. *LaTeX: A Document Preparation System*. Addison-Wesley, 1986.
- [2] Jorge EirasBarca. Ventajas y percepción del uso de latex en el entorno académico y en la investigación. *Revista Internacional de Investigación e Innovación en Didáctica de las Humanidades y las Ciencias*, (2):137–147, 2016.

¹What you see is what you get

- [3] Victoria Baramidze. Latex for technical writing. *Journal of Technical Science and Technologies*, 2(2):45–48, 2014.
- [4] Revista ingeniería uc. <http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>.
- [5] Revista ieeec américa latina. <http://www.ewh.ieee.org/reg/9/etrans/esp/>.
- [6] N.M.Z.L.A.R.S. Francisco Moreno C. *Cómo escribir textos académicos según normas internacionales: APA, IEEE, MLA, VANCOUVER e ICONTEC*. Ediciones Uninorte, 2010.
- [7] The comprehensive tex archive network. <http://www.ctan.org/tex-archive/info/lshort/>.
- [8] B.C. Salinas. *El Libro de latex*. Pearson Educación, 2003.
- [9] A. Borbón. *Editor de textos científicos L^AT_EX*. Instituto tecnológico de Costa Rica, 2015.

Feature extraction of stator current in induction motors for the detection of bearings damage using support vectors machines

Rubén Terán^{*,a}, Ledy Guerra^a, Carlos Jiménez^b

^aDpto. de Potencia, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Carabobo, Venezuela.

^bDpto. de Circuitos y Mediciones, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.-

The analysis of the armature current is one of the methods used to detect the incipient faults in different parts of the induction motor. In the nineties, this analysis was performed by a spectral analysis to the current and then it was compared the amplitude of the harmonics with a reference; through this, it could be inferred if the motor had faults or no. Currently, the trend is the use of classifiers based on the machine intelligence paradigm, such as: neural networks, support vector machines and fuzzy logic. This paper introduces a procedure for detecting incipient faults in ball bearings of induction motors using the aforementioned paradigm. Principally, the armature current of a three phase induction motor is acquired, which operates in normal condition and later with the defective bearings. Then to the current signal are extracted definite characteristics or features and, finally, the use of the support vector machines as classifiers. The results show that it can get diagnostics of faults in bearings with a high precision especially if the motor works in the condition of full charge.

Keywords: Support vector machine; feature extraction; failures in bearings; induction motor; predictive maintenance.

Extracción de rasgos de la corriente de armadura en motores de inducción para la detección de fallas en cojinetes utilizando máquinas de vectores de soporte

Resumen.-

El análisis de la corriente de armadura es uno de los métodos que se utilizan para la detección de fallas incipientes en las distintas partes del motor de inducción. En la década de los 90 este análisis se realizaba haciendo un análisis espectral a la corriente y luego se comparaban las amplitudes de los armónicos con unos de referencia, a partir de esto se podía inferir si el motor presentaba fallas o no. Actualmente la tendencia es el uso de clasificadores basados en el paradigma de inteligencia de máquinas, tales como: redes neuronales, máquinas de vectores soporte y lógica difusa. En este trabajo se muestra un procedimiento para la detección de fallas incipientes en cojinetes de bolas de motores de inducción usando el paradigma antes mencionado. Primeramente se adquiere la corriente de armadura de un motor de inducción trifásico, el cual opera en condición normal y luego con los cojinetes defectuosos. Luego a la señal de corriente se le extraen ciertas características o rasgos y, finalmente, el uso de las máquinas de vectores soporte como clasificador. Los resultados demuestran que se pueden obtener diagnósticos de fallos en cojinetes con una alta exactitud especialmente si el motor opera en la condición de plena carga.

Palabras clave: máquinas de vectores de soporte; extracción de características; fallas en cojinetes; motor de inducción; mantenimiento predictivo.

Recibido: agosto 2016

Aceptado: marzo 2017

*Autor para correspondencia

Correo-e: rubenteran@hotmail.com (Rubén Terán)

1. Introducción

Los cojinetes son componentes críticos en las maquinas rotatorias. Su degradación en el tiempo es una de las principales razones para que ocurra una falla [1]. En un estudio realizado por la IEEE se tiene que un 40 % de las fallas en los motores eléctricos son de cojinetes. Para detectar esta falla se pueden utilizar técnicas no invasivas, entre las que se tienen, el monitoreo de la corriente de armadura. Esta señal eléctrica contiene componentes de corriente, que están asociadas a componentes únicas de flujo rotatorio causadas por fallas tales como rotura de barras, excentricidades y daños en cojinetes [2].

En el análisis de la corriente de armadura se puede usar la señal en el dominio del tiempo, en el dominio de la frecuencia o una mezcla de ambas.

Con el propósito de disminuir la cantidad de información se pueden extraer métricas estadísticas o rasgos de la corriente, usadas hoy en día en el monitoreo de las condiciones de las máquinas, tales como: valor medio, desviación estándar, curtosis, asimetría entre otras. En este trabajo se muestra primeramente el proceso de adquisición de la corriente de armadura, luego la extracción de ciertas características o rasgos y, finalmente, el uso de las máquinas de vectores de soporte, para determinar si el motor de inducción presenta falla en cojinetes o no.

2. Fallas en cojinetes

La mayoría de los motores eléctricos usan cojinetes, estos consisten en dos anillos, uno exterior y otro interior que contienen un conjunto de bolas o elementos rodantes, puestas en unas pistas dentro de los anillos como se muestra en la Figura 1. Las fallas se clasifican de acuerdo a los elementos afectados: falla en pista externa, falla en pista interna y falla en bola [3].

Las fallas nombradas producen vibraciones causando que el entrehierro de la máquina varíe. Esta variación afecta el flujo magnético introduciendo componentes únicas de frecuencia en la corriente medida, las cuales, dependen de la geometría del cojinete y de su velocidad de giro dada por [3, 4, 5]

$f_{cojinete} = |f_1 \pm m f_{1,0}|$ donde $m = 1, 2, \dots$ f_1 es la frecuencia de la corriente y $f_{1,0}$ es una frecuencia característica que depende de la geometría del rodamiento ver Figura 1 y viene dada por la ecuación (1).

$$f_{1,0} = \frac{N_b}{2} f_r \left(1 \pm \frac{D_b}{D_j} \cos \beta \right) \quad (1)$$

donde: N_b es el número de bolas del cojinete, f_r la frecuencia mecánica del rotor en Hertz, D_b el diámetro de la bola, D_j el de la jaula y β el ángulo de contacto de las bolas con las pistas

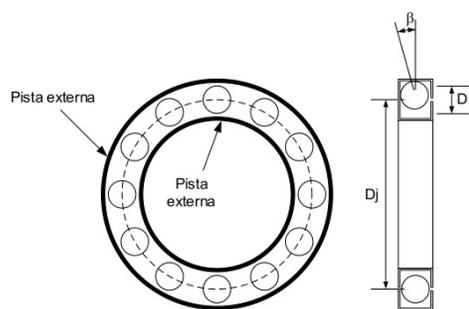


Figura 1: Dimensiones del rodamiento

3. Monitoreo de las condiciones del motor de inducción

Los motores de inducción trifásicos son máquinas simétricas que funcionan en estado normal con campos magnéticos sinusoidales en el entrehierro. Cualquier falla que ocurra alterará de alguna manera estos campos y producirá uno o más de los siguientes síntomas [6]: desbalance de tensión y corriente, aumento en las pulsaciones de par, disminución del par promedio, disminución de la eficiencia, calentamiento excesivo.

Con el monitoreo de las condiciones del motor se puede determinar el estado actual de la máquina. Este consiste en la medición de uno a varios parámetros relacionados con la condición mecánica del motor, estos se mencionan a continuación [6]: monitoreo eléctrico, monitoreo de vibraciones, monitoreo del par, monitoreo de temperatura, monitoreo químico.

En este trabajo las variables se obtuvieron con este tipo de monitoreo específicamente, por medio

de medición de la corriente del estator. El análisis espectral de la corriente del motor es una de las técnicas más usadas para la detección de la falla del motor, este consiste en la observación de las componentes del espectro de corriente en donde al ocurrir alguna falla esta producirá cambios en las componentes. Este tipo de análisis requiere la presencia de un experto el cual distinguirá el tipo, la ubicación, la magnitud y el tiempo de la falla.

4. Extracción de rasgos de la corriente de armadura

Los rasgos son valores que se obtienen de las variables medidas y que se usan como información para la realización del diagnóstico y son una parte crucial en el proceso de monitoreo de las señales, el diagnóstico final depende de la precisión y exactitud de estos. Los rasgos extraídos deben contener la información necesaria acerca de la falla y que sea suficiente para la toma de decisiones[7].

Se pueden extraer rasgos tanto de las señales medidas en el dominio del tiempo como, en el espectro en frecuencia, e inclusive una combinación de ambas. En este trabajo se obtienen de la señal en el dominio del tiempo.

En el mantenimiento predictivo se han usado métodos estadísticos para obtenerlos, arrojando buenos resultados, y estos pueden reflejar el contenido físico de la señal en el tiempo. Las siguientes métricas estadísticas se extraen en el proceso de monitoreo [7, 8]:

- Media (μ): conocida como media aritmética, es la suma de los valores divididos entre el número de valores $\mu = \frac{\sum X}{n}$
- Raíz media cuadrática (RMS): es la raíz de la media de los cuadrados de los valores $RMS = \sqrt{\frac{\sum X^2}{n}}$
- Media cuadrática (MC): es la media de la raíz cuadrada de la suma de los datos $MC = \frac{\sqrt{\sum X^2}}{n}$
- Mediana (MD): es el valor central de un conjunto de datos obtenido una vez que

estos se han ordenado de forma ascendente o descendente.

- Varianza (σ^2): es la media de los cuadrados de la distancia de cada valor con respecto a su media $var = \sigma^2 = \frac{\sum (x-\mu)^2}{n-1}$.
- Desviación estándar (σ): es una medida de la energía del contenido de la señal. Es la raíz cuadrada de la varianza $sd = \sigma = \sqrt{\frac{\sum (x-\mu)^2}{n-1}}$.
- Valor pico (X_{peak}): es la media de dos picos (máximo y mínimo) de todos los ciclos medidos $X_{peak} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{|max_i|+|min_i|}{2N} \right)$ donde N es el número de ciclos.
- Error estándar de la media (sdm): es la desviación estándar de la distribución de errores o fluctuaciones aleatorias $sdm = \frac{sd}{\sqrt{n}}$
- Curtosis: mide cuan puntiaguda es una distribución con respecto a un estándar $curtosis = \frac{\frac{1}{n} \sum (x-\mu)^4}{\left(\frac{1}{n} \sum (x-\mu)^2 \right)^2}$.
- Asimetría (SK): mide el grado de asimetría de la distribución respecto a su media $SK = \frac{n}{n-1} \frac{\sum (x-\mu)^3}{sd}$.
- Factor de cresta (FC): es la razón entre el valor pico y el valor rms $FC = \frac{X_{peak}}{RMS}$.
- Mínimo valor: es el mínimo valor de un conjunto de datos.
- Máximo valor: es el valor máximo valor de un conjunto de datos.
- Suma: es la suma de todos los valores de una señal.
- Rango: es la diferencia entre el máximo valor y el mínimo valor.

5. Transformación de datos reduciendo su dimensión

Al tener datos con un número alto de rasgos es probable que se tenga exceso de información o inclusive redundancia, para estos casos existen

métodos para reducir la dimensión de los datos con la mínima pérdida de información. En el caso de datos numéricos, como ocurre en este trabajo, entre las técnicas más usadas se tienen: Análisis de Componentes Principales, Análisis Factorial y Transformada de Wavelet [9].

Suponga que los datos consisten en un conjunto de vectores con n atributos, el Análisis de Componentes Principales PCA (de sus siglas en inglés, Principal Components Analysis) busca vectores ortogonales de k dimensiones (con $k \leq n$) que puedan ser usados para representarlos. Los datos originales quedan así proyectados en un espacio reducido resultando en una reducción de su dimensión. El procedimiento básico es el siguiente [9]:

1. Se normalizan los datos. Esto garantiza que los atributos de mayor valor no prevalezcan sobre los de menor valor.
2. Se determinan los vectores ortogonales. Estos se conocen como componentes principales (PC_1, PC_2, \dots, PC_n). Los datos de entrada se expresan como combinación lineal de estos vectores. En un principio, la dimensión de las componentes principales es igual a la de los datos originales.

$$\begin{aligned} PC_1 &= a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \\ &\quad \vdots \\ PC_n &= a_{n1}X_1 + a_{n2}X_2 + \dots + a_{nn}X_n \end{aligned} \quad (2)$$

donde: PC_i son las componentes principales, X_i los rasgos originales y a_{ij} los pesos de las variables

3. Las componentes principales se ordenan en orden decreciente. La primera componente será la de mayor varianza, la segunda será la siguiente con mayor varianza y así sucesivamente.
4. El tamaño de los datos se puede reducir eliminando las componentes de menor varianza.

La primera componente (PC_1) se obtiene de forma que su varianza sea máxima sujeta a la restricción de que la suma de los pesos a_{1j} al cuadrado sea igual a la unidad: $\max V(PC_1)$ sujeto a $\sum_{j=1}^n a_{1j}^2 = 1$

Se puede demostrar que para maximizar $V(PC_1)$ se toma el mayor valor propio (λ_1) de la matriz de varianza V , para maximizar $V(PC_2)$ se toma el segundo mayor valor propio (λ_2) y así sucesivamente.

Cuando las variables originales están muy correlacionadas entre sí, la mayor parte de su variabilidad se puede expresar con muy pocas componentes. Si las variables originales estuvieran completamente no correlacionadas entre sí, entonces el PCA no tendría ningún sentido, ya que las componentes principales coincidirían con las originales.

Para escoger las componentes a retener se seleccionan aquellas que tengan las varianzas más altas, de manera de que el intervalo de confianza sea mayor al 95 %.

6. Máquinas de vectores de soporte

La máquina de vectores de soporte SVM (por sus siglas en inglés, Support Vector Machines) es un método general para la resolución de problemas de clasificación, regresión y estimación. La idea principal de las SVM es separar los datos por medio de una función, la cual es obtenida de una muestra de estos. A manera de ejemplo la Figura 2 muestra como se separan datos de distinta clase por medio de una recta.

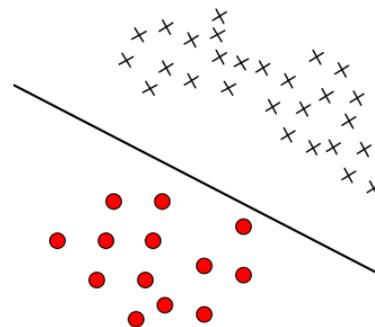


Figura 2: Los datos están separados por un plano clasificador [10]

El problema puede formularse de la siguiente manera se tiene un conjunto de datos los cuales pueden dividirse en dos grupos, a cada grupo se le asigna un valor o etiqueta; en la práctica se le asignan valores de +1 (para datos positivos) y

-1 (para datos negativos). Para un conjunto de datos cada uno se representa por el vector (\mathbf{x}, y) en donde la componente \mathbf{x} tiene n atributos, y la componente y corresponderá a la etiqueta. Los valores de \mathbf{x} se les conocen como patrones o entradas. La clasificación se puede lograr usando la función $f : X \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ de la manera siguiente: a la entrada $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ se le asignará la etiqueta +1 si $f(\mathbf{x}) \geq 0$, en caso contrario se le asignará la etiqueta -1 [10].

Considerando el caso en que $f(\mathbf{x})$ es una función lineal de $\mathbf{x} \in X$, se puede expresar de la siguiente forma:

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \mathbf{x} + b$$

donde \mathbf{w} es el vector de pesos y b los ajustes. El vector \mathbf{w} y el escalar b son usados para definir la posición de un hiperplano separador. Para separar los datos en positivos y negativos se usa la función $\text{sign } f(\mathbf{x})$. El hiperplano de separación óptimo es aquel que hace máxima la distancia entre el plano y las entradas mas cercanas de las distintas clases como se muestra en la Figura 3. Esta distancia se le llama margen de clasificación y viene dado por:

$$m_D(\mathbf{w}) = \frac{2}{\|\mathbf{w}\|}$$

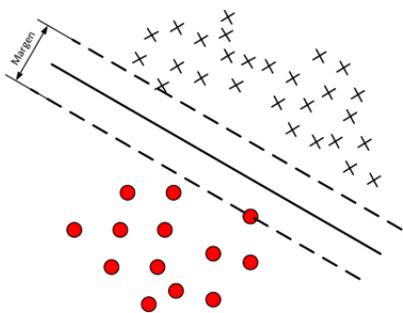


Figura 3: Clasificación con hiperplano. El margen de clasificación viene dado por la distancia entre los puntos de cada clase que son más cercanos al hiperplano [10]

Para determinar el mínimo margen de clasificación se debe resolver el siguiente problema de optimización, minimizar

$$\frac{1}{2} \|\mathbf{w}\|^2 + C \sum_{i=1}^n \xi_i$$

condicionado a $y_i(\mathbf{w}^T \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i$, $i = 1, \dots, n$ donde ξ_i es la distancia medida entre el margen y el punto \mathbf{x}_i que se encuentra en el lado incorrecto de este, C es un factor de penalización.

Usando el método de los multiplicadores de Lagrange, podemos obtener la formulación *dual*, la cual es expresada en términos de la variable α_i [11], maximizar

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n y_i y_j \alpha_i \alpha_j \mathbf{x}_i^T \mathbf{x}_j$$

condicionado a $\sum_{i=1}^n y_i \alpha_i = 0$, $0 \leq \alpha_i \leq C$

La formulación dual conduce a una expansión del vector de pesos en función de los datos de entrada:

$$\mathbf{w} = \sum_{i=1}^n y_i \alpha_i \mathbf{x}_i$$

En la mayoría de las aplicaciones los datos no son linealmente separables, sin embargo se puede seguir usando un clasificador lineal el cual, es deseable porque, tiene la ventaja de algoritmos de entrenamiento rápidos. La clasificación se logra ahora transformando los datos del espacio de entrada X al espacio de características F de igual o mayor dimensión, en el que se supone una mayor separación entre las clases, usando la función no lineal ϕ [12].

Una vez que los datos están en el espacio F la función discriminante es:

$$f(\mathbf{x}) = \mathbf{w}^T \phi(\mathbf{x}) + b$$

Con el propósito de reducir memoria y tiempo de cálculo el vector de pesos se expresa como una combinación lineal de los ejemplos de entrenamiento esto es $\mathbf{w} = \sum_{i=1}^l \alpha_i \phi(\mathbf{x}_i)$ entonces:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^l \alpha_i k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) + b$$

donde $k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i)$ se define como función kernel que para todo los $\mathbf{x}, \mathbf{z} \in X$ viene dada por:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = \phi(\mathbf{x})^T \phi(\mathbf{z})$$

Algunas funciones kernel comunes son:

1. kernel lineal:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{x}_i$$

2. kernel polinómico de grado d :

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = (\gamma \mathbf{x}^T \cdot \mathbf{x}_i + r)^d \quad \text{con } \gamma > 0$$

3. Función básica radial (RBF):

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{x}_i) = e^{-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2} \quad \text{con } \gamma > 0$$

7. Procedimiento metodológico

El procedimiento utilizado para diagnosticar fallas en los rodamientos del motor de inducción consta de cuatro pasos a saber: adquisición de los datos, extracción de rasgos, selección de rasgos y clasificación, esto se muestra en la Figura 4.

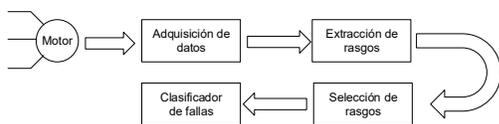


Figura 4: Arquitectura de diagnóstico de falla en cojinetes

Se adquirieron los datos de dos motores de inducción, trifásicos, jaula de ardilla de 220 V; 60 Hz; 1,2 kW 1700 rpm

La técnica que se utilizó para la recolección de datos está constituida por la medición de la corriente estatórica de un motores de inducción trifásico jaula de ardilla, el cual se encuentra ubicado en el laboratorio de mantenimiento predictivo de la Universidad de Carabobo, tal señal de corriente fue acondicionada por medio de transformadores de corriente, de tensión y arreglos de resistencia, para luego ser recolectadas a través de una tarjeta de adquisición de datos modelo USB-1208FS desarrollado por la empresa National Instruments usando el software LabView 7.0.

Para la simulación de las fallas en las pistas interna y externa se tomaron dos cojinetes en buen estado y se realizó una perforación en la pista interna de uno y en la pista externa del otro cojinete. Por otro lado la falla en los elementos rodantes se obtiene tomando un cojinete en buen

estado y lubricarlo con una grasa especial que contiene virutas de hierro, lo cual genera roce y desgaste en el cojinete a medida que el motor aumenta su velocidad.

De los parámetros de métricas estadísticas, nombradas entre las ecuaciones 3 a la 12, que se pueden tomar de la señal de corriente de armadura en el dominio del tiempo se seleccionaron: la mediana, valor medio, valor rms, varianza, desviación estándar, valor pico, curtosis, asimetría, factor de cresta, máximo valor y rango; mientras que: la media cuadrática, el error estándar, el mínimo valor y la suma se descartaron por ser combinación lineal de las anteriores.

En esta fase se entrenan las Máquinas de Vectores Soporte. El kernel escogido es la función básica radial gaussiana o por sus siglas en ingles RBF, la constante de penalización C y el parámetro de la función kernel γ se obtienen usando la técnica de validación cruzada. Para este fin se dividen los datos de entrenamientos en p subconjuntos y se hacen p pruebas, en cada una se toman $p - 1$ subconjuntos para entrenar y se deja uno como validación y para optimizar los parámetros [8, 13]. Todo esto se realiza usando la librería (gratuita para fines académicos) “libsvm”

8. Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos en esta investigación en el siguiente orden: datos adquiridos, transformación de los datos y clasificación.

8.1. Datos adquiridos

Se hicieron mediciones de la corriente de armadura al motor con tres niveles de carga: vacío, con carga nominal y con una carga intermedia. En el caso de carga nominal la corriente de armadura es de 7 A y con la carga intermedia es de 5 A. Se hicieron pruebas con el motor sin fallas y luego se procedieron a hacer pruebas con las distintas fallas en cojinetes

Para cada estado del motor (sin falla, falla en bola, en pista interna y en pista externa) y por razones de logística se realizaron 90 mediciones de la corriente de armadura las cuales se dividen en:

Tabla 1: Rasgos extraídos en cada condición de operación.

Características	Vacío	Sano		Falla en Bola(FB)		
		5 A	7 A	Vacío	5 A	7 A
Media	0,0321	0,0306	0,0164	0,0282	0,0246	0,0192
FC	1,4318	1,4214	1,4149	1,4393	1,4164	1,4098
Curtosis	1,5245	1,5033	1,4999	1,5181	1,503	1,4992
Mediana	0,0367	0,0275	0,0917	0,0642	0,0184	0
RMS	3,8573	4,9966	7,0261	3,9741	5,0485	7,0549
Asimetría	-0,0054	-0,0002	0,0032	-0,0128	0,0019	0,0011
Desv Est	3,8581	4,9978	7,0278	3,975	5,0497	7,0566
Varianza	14,8851	24,9779	49,3902	15,8007	25,4993	49,7955
Max Val	5,6150	7,193	10,0739	5,7434	7,2114	10,0556
Rango	11,2024	14,3219	20,0653	11,5327	14,3953	20,0469
Val Pico	5,5229	7,102	9,9412	5,72	7,1508	9,9461

Tabla 2: Datos normalizados.

Características	Vacío	Sano		Falla en Bola(FB)		
		5 A	7 A	Vacío	5 A	7 A
Media	0,1786	0,5000	0,2321	-2,3036	-0,1964	-0,8393
FC	0,3333	1,1222	-0,0333	-0,7556	1,9556	-0,5889
Curtosis	0,8214	2,0833	-0,4405	-0,8452	1,3214	-0,4762
Mediana	-0,1711	0,5247	0,1749	2,6160	1,5703	-0,1711
RMS	-1,1291	-1,1318	-0,2556	1,3053	-1,0420	-0,2157
Asimetría	-0,2241	-1,0000	-0,1034	0,4828	-2,2759	0,2586
Desv Est	-1,1290	-1,1319	-0,2555	1,3054	-1,0420	-0,2156
Varianza	-1,0493	-1,0513	-0,3537	1,3336	-0,9880	-0,3177
Max Val	-1,1327	-1,1327	-0,2619	1,3280	-1,0618	-0,2517
Rango	-1,1336	-1,1235	-0,2627	1,3223	-1,0323	-0,2424
Val Pico	-1,1423	-1,1300	-0,2569	1,3128	-1,0210	-0,2299

Tabla 3: Componentes principales y sus coeficientes.

	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8
PC_1	0,0095	-0,322	-0,314	0,0029	0,3653	-0,010	0,3653	0,3623
PC_2	0,4597	0,0047	-0,004	0,6586	-0,005	-0,595	-0,005	-0,006
PC_3	0,8475	-0,01	-0,029	-0,127	-0,007	0,5136	-0,007	-0,012

30 mediciones en vacío, 30 con la carga intermedia y 30 con carga nominal. En total se realizaron 360 mediciones de la corriente de armadura.

La medición de la corriente de armadura consiste en la adquisición de su magnitud en el dominio del tiempo, específicamente en 1 segundo y para una frecuencia de 2000 muestras/s se obtuvieron 2000 puntos. Para cada medición se extraen 11 rasgos: la mediana, valor medio, valor rms, varianza, desviación estándar, valor pico, curtosis, asimetría, factor de cresta, máximo valor y rango. En la Tabla 1 se muestran los rasgos extraídas en seis mediciones de corriente.

De las 360 mediciones de corriente se tomaron 135 para entrenar a las máquinas de vectores soporte y 135 distintas para probarla.

8.2. Transformación de los datos

Se utilizó un preprocesamiento de los datos, específicamente la normalización con desviación estándar; para ello se creó una matriz 11x360 en donde cada fila representa una característica y cada columna una medición. El primer paso entonces es determinar la media y la desviación estándar de cada característica. Una vez obtenidos los valores anteriores se procede a normalizar los datos según

Tabla 4: Varianza y porcentaje de varianza de cada componente.

Componente	Varianza	Porcentaje de Varianza	Porcentaje acumulado
PC_1	7,3834	67,1218	67,1218
PC_2	1,8746	17,0421	84,1639
PC_3	0,8090	7,3542	91,5181
PC_4	0,5477	4,9791	96,4972
PC_5	0,3140	2,8544	99,3516
PC_6	0,0691	0,6279	99,9795
PC_7	0,0022	0,0197	99,9992
PC_8	0,0001	0,0007	99,9999
PC_9	0,0000	0,0001	100
PC_{10}	0,0000	0,0000	100
PC_{11}	0,0000	0,0000	100

ecuación (3).

$$v'_i = \frac{v_i - \text{media}(v)}{\text{sd}(v)} \quad (3)$$

En la Tabla 2 se muestran los valores normalizados

A estos valores se les realizó el PCA obteniéndose una matriz de 11x11 en donde las filas son las componentes principales ($PC_1, PC_2, \dots, PC_{11}$) y las columnas son los coeficientes respectivos (a_1, a_2, \dots, a_{11}), en la Tabla 3 se muestran las tres primeras componentes y ocho coeficientes de cada una.

El propósito de las componentes principales es proyectar los datos en otro espacio que, en principio, tiene las mismas dimensiones (componentes) de los datos originales. Como hay componentes que presentan mayor información que otra, se pueden descartar algunas y reducir la dimensión del nuevo espacio. En la Tabla 4 se observa, en la columna Porcentaje de Varianza, que la primera componente tiene un 67,12 % de la información y la segunda un 17,04 %, entre las dos se tiene un 84,16 % de la información. Si se toman las primeras cuatro componentes el porcentaje acumulado es de 96,5 %, esto indica que se pueden retener las dos primeras componentes y descartar el resto sin perder prácticamente información ya que el intervalo de confianza es mayor al 95 %.

Para proyectar los datos normalizados en las componentes principales se debe multiplicar cada rasgo por su coeficiente respectivo, véase

ecuación (2), por ejemplo la Tabla 5 tiene los rasgos extraídas de un motor sano en vacío (primera columna Tabla 2), los coeficientes de la componente PC_1 (primera fila Tabla 3) y la multiplicación del valor de cada característica por el coeficiente asociado. Luego, al sumar cada uno de estos productos se obtiene que el valor de la componente PC_1 es -2,8103.

Tabla 5: Tabla de peso de la primera componente.

Rasgos	Datos	Coefficientes	Datos*Coeficientes
Media	0,1786	0,0095	0,0017
FC	0,3333	-0,322	-0,1074
Curtosis	0,8214	-0,314	-0,2583
Mediana	-0,1711	0,0029	-0,0005
RMS	-1,1291	0,3653	-0,4124
Asimetría	-0,2241	-0,010	0,0023
Desv Est	-1,1290	0,3653	-0,4124
Varianza	-1,0493	0,3623	-0,3802
Max Val	-1,1327	0,3646	-0,4130
Rango	-1,1336	0,3647	-0,4134
Val Pico	-1,1423	0,3648	-0,4167

Si se observa en la Tabla 5 la media, mediana y asimetría no tienen un peso importante en comparación con el del resto de los rasgos. Valores altos de la primera componente corresponderán, entonces, a datos con valores RMS, desviación estándar, varianza, Máximo Valor, Rango y Valor Pico que sean altos y, Factor de Cresta y Curtosis bajos.

8.3. Clasificación

Para la clasificación de los datos se usaron máquinas de vectores soporte con kernel RBF. Los valores de C y γ se obtuvieron utilizando la técnica de validación cruzada. Primero se clasificó con los rasgos extraídos normalizados, seguidamente con los mismos normalizados pero excluyendo la información obtenida con el motor operando en vacío, y finalmente, con las dos primeras componentes principales.

8.3.1. Clasificación con las rasgos extraídos normalizados

Se tomaron 270 mediciones de corrientes, 135 se utilizaron para entrenar a las SVM y 135 para probarlas. Se extrajeron 11 rasgos de la corriente, la Tabla 6 resume el resultado de la clasificación de

esta información. Por medio de validación cruzada se obtuvieron $C = 32$ y $\gamma = 0,5$.

Tabla 6: Resultado de la clasificación.

Condición	Carga	Cantidad Datos	Cantidad Aciertos	Porcentaje Aciertos
Sano	Vacío	15	6	40,0 %
	5 A	15	14	93,3 %
	7 A	15	13	86,7 %
Falla en Bola	Vacío	10	10	100,0 %
	5 A	10	10	100,0 %
	7 A	10	10	100,0 %
Falla en Pista Externa	Vacío	10	9	90,0 %
	5 A	10	10	100,0 %
	7 A	10	9	90,0 %
Falla en Pista Interna	Vacío	10	10	100,0 %
	5 A	10	10	100,0 %
	7 A	10	10	100,0 %
Total		135	121	89,6 %

Se observa que los niveles más bajos de aciertos se obtuvieron cuando el motor no tiene fallas y sobre todo cuando el motor opera en vacío.

Tabla 7: Clasificación sin considerar la operación en vacío.

Condición	Carga	Cantidad Datos	Cantidad Aciertos	Porcentaje Aciertos
Sano	5 A	15	15	100,0 %
	7 A	15	13	86,7 %
Falla en Bola	5 A	10	10	100,0 %
	7 A	10	10	100,0 %
Falla en Pista Externa	5 A	10	10	100,0 %
	7 A	10	9	90,0 %
Falla en Pista Interna	5 A	10	10	100,0 %
	7 A	10	10	100,0 %
Total		135	121	89,6 %

8.3.2. Clasificación con los rasgos extraídas normalizadas y el motor operando con carga

Se tomaron 180 mediciones de corrientes, 90 se utilizaron para entrenar a las SVM y 90 para probarlas. La Tabla 7 resume el resultado de la clasificación de estos datos. Por medio de validación cruzada se obtuvieron valores de $C = 8$ y $\gamma = 0,5$. Estos resultados ratifican la conclusión anterior, que los porcentajes de aciertos mejoran si no se toma en cuenta la operación del motor con carga.

8.3.3. Clasificación usando las componentes principales

Se tomaron 180 mediciones de corrientes, 90 se utilizaron para entrenar a las SVM y 90 para probarlas. Los datos se cambiaron de espacio por medio de la técnica de PCA. Se clasificó tomando las dos primeras componentes principales, luego las tres primeras componentes y por último cuatro. La Tabla 8 resume el resultado de la clasificación de esta información. Por medio de validación cruzada se obtuvieron los valores de $C = 2$ y $\gamma = 8$.

Tabla 8: Clasificación con las componentes principales.

Condición	Carga	Cantidad Datos	Componentes por aciertos		
			2	3	4
Sano	5 A	15	4 (26,7 %)	0 (0,0 %)	13 (86,7 %)
	7 A	15	9 (60,0 %)	8 (53,3 %)	7 (46,7 %)
Falla en Bola	5 A	10	9 (90,0 %)	10 (100,0 %)	9 (90,0 %)
	7 A	10	10 (100,0 %)	10 (100,0 %)	7 (70,0 %)
Falla Pista Externa	5 A	10	5 (50,0 %)	10 (100,0 %)	8 (80,0 %)
	7 A	10	7 (70,0 %)	8 (80,0 %)	10 (100,0 %)
Falla Pista Interna	5 A	10	5 (50,0 %)	10 (100,0 %)	10 (100,0 %)
	7 A	10v	10 (100,0 %)	10 (100,0 %)	10 (100,0 %)

En la Tabla 8 se observa que al aumentar el número de componentes mejora el porcentaje de aciertos pero, con solo 4 componentes se obtiene un resultado de clasificación alto. Adicionalmente los peores resultados se obtienen al clasificar los datos obtenidos cuando el motor opera en vacío.

9. Conclusiones

El análisis de la corriente de armadura es una técnica efectiva para detectar fallas en cojinetes en estado incipiente. La ventaja de esta técnica es que es de alta sensibilidad a bajo costo. En este trabajo se realizaron pruebas al motor de inducción en tres condiciones de carga. En cada condición se hicieron mediciones con cuatro estados de cojinetes: sano, falla en bola, falla en

pista externa y falla en pista interna. Se realizó una limpieza y transformación de los datos, en donde se normalizó y luego se utilizó análisis de componentes principales.

Los datos se utilizaron para entrenar las máquinas de vectores soportes. La función Kernel escogida fue RBF los valores de C y γ se obtuvieron utilizando la técnica de validación cruzada. Al tomar métricas estadística de la señal de corriente en dominio del tiempo se pueden utilizar como indicadores del estado en cojinetes del motor obteniéndose porcentajes de clasificación cercanos al 90 %.

Referencias

- [1] Li Ruoyo, Sopon Ponrit, and He David. Fault features extraction for bearing prognostics. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 23(2):213–221, 2012.
- [2] Mehla Neelam and Dahiya Ratna. An approach of condition monitoring of induction motor using MCSA. *International Journal of Systems Applications, Engineering & Development*, 1(1):13–17, 2007.
- [3] Won-Pyo Hong, Chung-Sup Yoon, and Dong-Hwa Kim. Stator current processing-based technique for bearing damage detection in induction motor. In *ICCAS 2005: International Conference on Control, Automation, and Systems*, 2005.
- [4] M. Sin, W. Soong, and N. Ertugrul. Induction machine on-line condition monitoring and fault diagnosis—a survey. In *Australasian Universities Power Engineering Conference*, pages 1–6, Christchurch, New Zealand, 2003.
- [5] M El Hachemi Benbouzid. A review of induction motors signature analysis as a medium for faults detection. *IEEE transactions on industrial electronics*, 47(5):984–993, 2000.
- [6] Xin Wen. *A hybrid intelligent technique for induction motor condition monitoring*. Doctoral Thesis, University of Portsmouth, 2011.
- [7] C. Jiménez y J. Jiménez. Clasificación de señales de voz utilizando transformada de wavelet y máquinas de vectores de soporte. Trabajo de Ascenso, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, 2010.
- [8] M. M. A. Bin Hasan. *Current based condition monitoring of electromechanical systems. Model-free drive system current monitoring: faults detection and diagnosis through statistical features extraction and support vector machines classification*. Doctoral Thesis, Universidad de Bradford, 2012.
- [9] César Pérez y Daniel Santín. *Minería de datos: técnicas y herramientas*. Ediciones Paraninfo, S.A., 2007.
- [10] Achmad Widodo and Bo-Suk Yang. Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 21(6):2560–2574, 2007.
- [11] Asa Ben-Hur and Jason Weston. A user’s guide to support vector machines. *Data Mining Techniques for the Life Sciences*, pages 223–239, 2010.
- [12] Steve R Gunn et al. Support vector machines for classification and regression. Technical report, Science and Mathematics School of Electronics and Computer Science, Faculty of Engineering, University of Southampton, 1998.
- [13] Alex J Smola and Bernhard Schölkopf. Learning with kernels: support vector machines regularization optimization and beyond. In *Adaptive computation and machine learning*. The MIT Press, 2002.

Evaluation of expanded polystyrene with cement mortar covering under fire exposition

Francesco Rogontino^a, Javier López^a, Edson Martínez^{*b}, Salvador Scola^c

^aEscuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bLaboratorio de Materiales y Ensayos, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^cInstituto Autónomo Municipal Cuerpo de Bomberos de Valencia, Valencia, Venezuela

Abstract.-

The use of expanded polystyrene in the construction sites is widely disseminated, and it is important to know his behavior under the action of diverse phenomena. This monograph evaluated the performance of expanded polystyrene partition walls under the action of fire. The investigation has a field experimental design, and the sample was defined by 12 pieces, six of which had a resistant mortar covering and the remaining ones had tile finished covering on the mortar. These samples were evaluated 28 days after the mortar curing, for 25 minutes, using two fire simulators. The results indicate that the cement mortar covering presented only a slight cracking and good adhesion to the wire mesh, whereas the expanded polystyrene panel was easily consumed releasing toxic gases and liquids. On the other hand the tile finished was quickly fractured and separated under the action of fire, whereby it doesn't generate a significant difference in terms of performance.

Keywords: expanded polystyrene; fire; mortar; resistance.

Evaluación del poliestireno expandido con mortero de cemento expuesto al fuego

Resumen.-

El uso del poliestireno expandido se ha diseminado en la construcción, por lo que es importante conocer su comportamiento bajo la acción de diversos fenómenos. En este trabajo se evalúa la resistencia y desempeño de tabiques de poliestireno expandido sometidos a la acción del fuego. El diseño de la investigación es experimental de campo, evaluando una muestra conformada por doce piezas, seis con recubrimiento de mortero resistente y las restantes con recubrimiento de baldosa sobre el mortero. Las piezas se evaluaron pasados los 28 días de vaciado, durante 25 minutos, en dos simuladores de incendio. Los resultados indican que el recubrimiento de mortero de cemento solo presentó agrietamiento leve y una buena adherencia a la malla electrosoldada, mientras que el panel de poliestireno expandido se consumió con facilidad liberando gases y líquidos tóxicos. Por otro lado la baldosa colocada se fracturo y se separó rápidamente ante la acción del fuego, por lo cual no genera una diferencia significativa en el desempeño.

Palabras clave: poliestireno expandido; fuego; mortero; resistencia.

Recibido: junio 2016

Aceptado: febrero 2017

1. Introducción

A lo largo de la historia, en el área de la ingeniería civil se han utilizado diversos materiales para la construcción de tabiques; la utilización del EPS trae como beneficios una optimización de los costos y reducción en los tiempos de

* Autor para correspondencia

Correo-e: edsontmartinez@gmail.com (Edson Martínez)

ejecución de la obra [1]. Tradicionalmente su utilización se limitó a tabiquería de tipo liviano como división de espacios particularmente en oficinas y comercios, sin embargo su uso se ha ampliado a bloques para entrepisos, e incluso tabiques que conforman sistemas de carga. Por otro lado dicho material posee un bajo consumo energético debido a su excelente comportamiento térmico [2], en este sentido el uso del poliestireno expandido se ha tornado frecuente en la edificación de viviendas de interés social dentro del ámbito constructivo venezolano, lo cual trae la incógnita de su comportamiento al momento de ser expuesto a la acción de diversos fenómenos tanto naturales como generados por el ser humano.

En Venezuela la única normativa que regula las especificaciones para el uso de paneles de EPS tanto estructurales como no estructurales es la norma COVENIN 3808 Edificaciones. Paneles aligerados y reforzados. Requisitos [3], donde se puntualizan parámetros como: dimensiones y espesor del panel, características del material, el cual, debe ser certificado bajo la normativa COVENIN 2358 Espumas rígidas de poliestireno expandido. Determinación de la velocidad de propagación y facilidad de ignición [4], como autoextinguible y no debe generar gases tóxicos para el ser humano.

Una de las acciones a las cuales puede verse sometida una edificación la constituye el fuego generado por incendios, por lo que es indispensable conocer el comportamiento de los materiales, a fin de establecer soluciones que brinden las mejores condiciones de seguridad a los usuarios de dichas estructuras, información que también puede ser de mucha utilidad para los cuerpos de bomberos así como los organismos competentes, en lo que respecta a prevención, desalojo y extinción de incendios.

Es importante destacar que las temperaturas a que se elevan los incendios reales de edificios generalmente llegan a los 1000°C o superiores, y son muy pocos los materiales que conservan una resistencia estructural de importancia a dichas temperaturas [5]; el concreto, así como, el mortero de cemento, poseen excelentes y ampliamente demostradas propiedades de resistencia al fuego, que

proporcionan niveles excepcionales de protección y seguridad, resguardando vidas, propiedades y el medio ambiente en caso de incendio; siendo el mortero de cemento el material más utilizado como revestimiento tanto de elementos estructurales como de tabiquería [6]. Su comportamiento ante el fuego viene dado por complejas transformaciones físico-químicas durante el calentamiento, las cuales, dependen directamente de las proporciones de mezcla y la calidad de los agregados [7].

En cuanto a los tabiques de poliestireno expandido y su resistencia al fuego puede mencionarse que, es un material poco inflamable, se requieren de grandes cantidades de aire comburente para poder destruirlo, necesitando de aproximadamente 150 veces su volumen [8].

En este trabajo se analizaron tabiques de poliestireno expandido, revestidos con mortero resistente de cemento y otro grupo de tabiques con un revestimiento de cerámica adicional al mortero, los cuales fueron sometidos a la acción del fuego, simulando un incendio real. Comparando de manera cualitativa el comportamiento de los mismos. La selección de estos dos revestimientos se fundamentó en el hecho de constituir los materiales más utilizados para esta función en las viviendas de carácter popular en Venezuela.

2. Procedimiento experimental

Con el fin de simular los tabiques utilizados en sistemas de muros con EPS revestidos con mortero resistentes para luego someterlos a fuego y evaluar su desempeño se llevo a cabo un procedimiento que consistió en las siguientes fases:

Preparación de muestras. Se elaboraron 12 probetas consistentes en paneles de poliestireno expandido de las siguientes dimensiones: 50 cm x 30 cm x 8cm, las cuales fueron revestidas con un revestimiento de mortero de cemento resistente, elaborado de acuerdo a las dosificaciones de la norma COVENIN 484-93Cemento Portland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en probetas cúbicas de 50,8 mm de lado [9]. De estas probetas, un grupo de 6 se revistieron con cerámica de pasta blanca de 50 mm de espesor como acabado final.

Curado. las muestras se resguardaron protegidas de la acción del medio ambiente, hasta cumplir la edad de 28 días de fraguado del mortero, simulando el proceso en seco que se lleva a cabo en obra.

Ensayo de exposición al fuego. los ensayos fueron realizados en el Campo de Prueba de la Estación Central del Cuerpo de Bomberos de Valencia. El ensayo consistió en la exposición de las probetas con ambos revestimientos a dos formas de incidencia al fuego, la directa y a una envolvente, utilizando simuladores (ver figuras 1 y 2), cuya fuente de combustible es gas metano, por un lapso de tiempo de 25 minutos para cada ensayo, tiempo recomendado por el personal de la estación debido a que este es el tiempo promedio requerido para el arribo al sitio de ocurrencia de un incendio y su eventual control.



Figura 1: Simulador Uno.

De cada tipo de revestimiento se colocaron 3 probetas en el simulador uno, tal y como se muestra en la figura 3, para lo cual se utilizó una base metálica, utilizando una presión de gas metano de 20 psi, para luego inducir la llama haciendo uso de una chispa externa, controlando el tiempo establecido mediante la utilización de un cronómetro.

Para el estudio de la exposición a la envolvente, se utilizó el Simulador 2, ubicando las muestras en el suelo, a una distancia muy cercana a las zonas de escape de las llamas, de igual manera se utilizó una presión de gas metano de 20 psi, originando la



Figura 2: Simulador Dos.



Figura 3: Realización de ensayo en Simulador Uno.

llama gracias a la utilización de una chispa externa, ver figura 4.



Figura 4: Realización de ensayo en Simulador Dos.

3. Resultados y discusión

Luego de haber realizado cada ensayo, se tomó nota de variables tales como: desprendimiento del mortero de cemento, tanto en la parte frontal como en los laterales del mismo, tiempo requerido para la degradación del poliestireno expandido, coloración del mortero y la cantidad de grietas existentes.

3.1. Resultados obtenidos del simulador Uno

Aspecto

En todas las muestras analizadas, se evidenció agrietamiento, siendo más notorio en las muestras con recubrimiento de mortero. El total de las muestras analizadas presentó una coloración rosácea en su superficie, y algunas de ellas presentaron ennegrecimiento en el mortero. Tal como se muestra en las figuras 5 y 6.



Figura 5: Muestra Tres (3).

Desprendimiento del mortero

En ninguna de las muestras ensayadas se evidenció el desprendimiento del mortero correspondiente al recubrimiento frontal, asimismo se observó la buena adherencia entre la malla de acero electrosoldada y la mezcla de mortero.

Desprendimiento de baldosas

El tiempo máximo para la ocurrencia del desprendimiento de la baldosa en las tres muestras ensayadas fue de 3 minutos, sufriendo una falla de tipo explosivo.



Figura 6: Muestra Cuatro (4).

3.2. Resultados obtenidos del simulador dos

Aspecto

Las muestras sometidas al Simulador Dos presentaron en toda su superficie frontal la presencia de grietas, tanto por la expansión de aquellas ya existentes, así como las generadas por el ensayo en sí.

En lo correspondiente a la coloración, las muestras revestidas con mortero mostraron una coloración rosácea a lo largo de toda su superficie, mientras que en las muestras revestidas con baldosa esta coloración se observó en la zona descubierta del material aglomerante luego de la pérdida del recubrimiento

Desprendimiento del recubrimiento

De forma similar a los resultados obtenidos por medio de la utilización del Simulador Uno, en ninguna de las muestras evaluadas se desprendió fracción alguna del recubrimiento de mortero. Siguiendo el mismo lineamiento para el simulador anterior, es conveniente resaltar la buena adherencia entre las mallas electrosoldadas y la mezcla de mortero, ya que la misma no se desprendió.

Desprendimiento de baldosa

En todas las muestra con recubrimiento de baldosa evaluadas, se presentó agrietamiento en la baldosa, sin embargo, debido al riesgo que suponía estar a una posición cercana al simulador, no se pudo determinar el tiempo requerido para la eventual fractura de la baldosa. Las mismas no se

desprendieron al momento de realizar el ensayo producto de la posición en sí de las muestras. Una vez culminada la prueba, se encontró que la muestra número 10 (ver figura 7), al momento de procurar retirar la baldosa agrietada, esta se desprendió por completo, restando solo el material adherente en la muestra, mientras que al momento de hacer lo propio para la muestra número 11 (ver figura 8), solo se pudo retirar una pequeña parte.



Figura 7: Muestra 10.



Figura 8: Muestra 11.

3.3. *Discusión de los resultados obtenidos para el poliestireno expandido para ambos simuladores*

El tiempo de degradación total del eps oscilo entre tres y seis minutos, siendo mayor en las muestras expuestas en el simulador uno, Para

ambos simuladores y para todos los recubrimientos se obtuvo degradación total del poliestireno expandido, a excepción de la muestra número cinco (5), correspondiente al Simulador Uno y, cuyo revestimiento correspondía a baldosa, en cuyo caso la muestra sufrió degradación parcial conservándose parte del material en su interior (ver figura 9).



Figura 9: Muestra cinco (5), remanente del poliestireno expandido.

4. Conclusiones

Se obtuvo un buen comportamiento el mortero de cemento ante la acción al fuego, bajo las condiciones experimentales establecidas, ya que el mismo no se desprendió en lo más mínimo, mantuvo su integridad y los cambios mencionados con anterioridad referentes a su aspecto no resultaron significativos, ni fueron lo suficientemente severos como para afectar su desempeño. De igual forma y debido al desprendimiento del recubrimiento lateral del mortero de cemento en cada una de las muestras, así como también por el bajo espesor del mismo, el poliestireno expandido fue consumido en su totalidad por la llama actuante para ambos tipos de exposición, y su desempeño ante el fuego fue pobre una vez que estuvo expuesto directamente a la llama, ya que fue consumido en poco tiempo. Es importante resaltar que el mortero de cemento funciona como defensa al poliestireno expandido en caso de un incendio, si se garantiza

que el fuego no entra en contacto directo con las piezas de EPS.

Las muestras recubiertas con baldosa resultaron con mejor desempeño que aquellas con mortero de cemento como recubrimiento, sin embargo, por el rápido desprendimiento de estas, la protección adicional no fue duradera, a priori, se puede mencionar que para incendios con mayor duración esta protección adicional puede no resultar determinante en la resistencia al fuego del material en estudio.

Reconocimiento

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2016.

Referencias

- [1] Alfonso Moreno, Alejandro C. Moreno, Lucio Guzmán Mares, Alejandro Águila Reyes y Salvador Capuz Rizo. Innovación al sistema constructivo de paneles de espuma de poliestireno expandido, para incorporación de elementos estructurales, en construcción de vivienda. In *Actas de XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos*, pages 715–730, Huesca, México, 2011.
- [2] Alfredo Esteves y Daniel Gelardi. Técnicas constructivas y materiales de bajo costo energético en la arquitectura sustentable. caso proyecto y construcción de vivienda en centro-oeste de Argentina. In *Actas del XI Encontro Nacional de Tecnología no Ambiente Construido (ENTAC 2006)*, pages 3629–3638, 2006.
- [3] COVENIN 3808-2003, Edificaciones. Paneles aligerados y reforzados. Requisitos. COVENIN, 2003.
- [4] COVENIN 2358-1986, Espumas rígidas de poliestireno expandido. Determinación de la velocidad de propagación y facilidad de ignición. COVENIN, 1986.
- [5] Jesús Alonso Acosta Ayala. Aspectos fundamentales para evaluar estructuras expuestas al fuego. Trabajo Especial de Grado, Universidad de Sonora, México, 2001.
- [6] Joan Formosa Mitjans. *Formulaciones de nuevos morteros y cementos especiales basadas en subproductos de magnesio*. Tesis Doctoral, Facultat de Química, Universitat de Barcelona, España, 2012.
- [7] Gabriel Alexander Khoury. Effect of fire on concrete and concrete structures. *Progress in Structural Engineering and Materials*, 2(4):429–447, 2000.
- [8] Franklin Danilo Orozco Ronquillo. Módulo de elasticidad estático de un panel de poliestireno expandido revestido de mortero, hormigón, y reforzado con alambre galvanizado. Trabajo Especial de Grado, Carrera de Ingeniería Civil, Facultad De Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2015.
- [9] COVENIN 484-93, Cemento Portland. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en probetas cúbicas de 50,8mm de lado. COVENIN, 1993.

Logical-Mathematical Model of Encoder 2D-RS for Hardware Description in VHDL

Cecilia E. Sandoval-Ruiz

Facultad de Ingeniería, Dirección de Postgrado, Universidad de Carabobo, Venezuela.

Abstract.-

In this research, a logical-mathematical model of the Reed Solomon encoder is developed in two-dimensions, based on the optimized model of the LFSR components (linear feedback shift registers) and RS coders, considering the fractal structure of these circuits and their extrapolation to code concatenation schemes. This is for the purpose of generating the hardware descriptor code in VHDL, applying concepts of iterated functions. The methods considered correspond to the mathematical interpretation of the circuits and identification of correspondence between the equations that describe the mathematical behavior of these elements. In this way, we obtain as a result the model of equations of the constitutive circuits of the 2D-RS, recognizing a highly efficient solution, due to the optimization of circuit stages. This model is a contribution in the design of complex encoders with free hardware, since it simplifies the VHDL description of the encoder and promotes its updating over time.

Keywords: Logical-mathematical model; free hardware design; reconfigurable 2D-RS codes; Reed Solomon; VHDL; FPGA.

Modelo lógico-matemático del Codificador 2D-RS para descripción de hardware en VHDL

Resumen.-

En esta investigación se desarrolla un modelo lógico-matemático del codificador Reed Solomon en dos dimensiones, basada en el modelo optimizado de los componentes LFSR (registros desplazamientos con realimentación lineal) y codificadores RS, considerando la estructura fractal de estos circuitos, y su extrapolación a los esquemas de concatenación de códigos. Esto con el propósito de generar el código descriptor de hardware en VHDL, aplicando conceptos de funciones iteradas. Los métodos considerados corresponden a la interpretación matemática de los circuitos e identificación de correspondencia entre las ecuaciones que describen el comportamiento matemático de estos elementos. De esta manera, se obtiene como resultado el modelo de ecuaciones de los circuitos constitutivos del 2D-RS, reconociendo una solución altamente eficiente, debido a la optimización de etapas del circuito. Este modelo constituye un aporte en el diseño de codificadores complejos con hardware libre, ya que simplifica la descripción VHDL del codificador y promueve su actualización en el tiempo.

Palabras clave: Modelo lógico-matemático; diseño hardware libre; códigos 2D-RS reconfigurable; Reed Solomon; VHDL; FPGA.

Recibido: octubre 2016

Aceptado: febrero 2017

1. Introducción

Entre las actuales tendencias en codificadores de canal compuestos, los cuales buscan garantizar la transmisión de datos con potencia mínima y fidelidad de la información, se han abordado modelos de n-dimensiones, donde se hace indis-

* Autor para correspondencia

Correo-e: cecisandova@yahoo.com (Cecilia E. Sandoval-Ruiz)

pensable el estudio de los codificadores base. Al momento de seleccionar estos se han considerado factores de vigencia tecnológica, teniendo presente que si bien existen actualmente alternativas de codificación con buenas prestaciones, es el código Reed Solomon uno de los más competitivos, definidos como codificadores concurrentes.

En tal sentido, que el codificador Reed Solomon [1] resulta interesante de acuerdo a las prestaciones y grado de complejidad del decodificador, siendo necesaria una investigación acerca del modelado y optimización de éste, donde su desarrollo se ha visto definido por las tecnologías disponibles, en este momento los dispositivos reconfigurables FPGA (Field Programmable Gates Arrays), tienen un conjunto de ventajas como: el análisis del consumo de potencia en la etapa de diseño, flexibilidad y capacidad de actualización, propiciando que la adopción de esta tecnología continúe creciendo, convirtiéndose así en la solución para estos desarrollos.

De esta manera el diseñador debe cumplir con la sintaxis del lenguaje estándar de descripción de hardware VHDL (VHSIC Hardware Description Language), lo que ofrece portabilidad del diseño, a diversas plataformas o gamas de dispositivos SoPC (System on Programmable Chip), a la vez que soporta operaciones en la configuración de hardware, tal es el caso del operador denominado 'concatenación', el cual permite ordenar estructuras sin necesidad de una señal de reloj para su manejo. A partir de estos modelos VHDL, se han estudiado los métodos de optimización de la descripción de hardware, esto facilita la adaptabilidad de los productos finales, aspecto importante en los procesos continuos de actualización a las nuevas tecnologías, lo que los hace diseños con características de sostenibilidad.

Estos aspectos demuestran la relevancia de desarrollar modelos lógicos-matemáticos, que permitan extrapolar el diseño a aplicaciones específicas, a través de ecuaciones de comportamiento de hardware resulta más eficiente, a la vez que por ser tratado bajo la filosofía de hardware libre, ofrece a los diseñadores una base importante para desarrollos futuros. Permitiendo el desarrollo de modelos optimizados de codificadores elementales, con

procesamiento eficiente y paralelo de los datos de información, que pueden ser concatenados en estructuras 2D, a fin de obtener codificadores compuestos con las mismas características de eficiencia que sus componentes.

El objetivo de esta investigación es obtener un modelo matemático de código híbrido reconfigurable, que permita la adaptación del modelo de concatenación, a fin de establecer las mejores prestaciones, conmutando entre posibles alternativas de codificación multidimensional, dado por ecuaciones con operadores lógico-matemáticos soportados por el lenguaje descriptor de hardware VHDL, a través del cual se pueda generar el código de un codificador multidimensional, bajo el enfoque de hardware libre y orientado a alto rendimiento.

El modelo aplica como técnica de desarrollo la extrapolación de los modelos de componentes auto-similares identificados en el estudio, aplicando los desarrollos de hardware eficiente para codificadores RS y la generalización de las estructuras de concatenación de códigos, a fin de establecer correspondencia entre los codificadores elementales y el codificador 2D. Esta propuesta se presenta como un esquema de concatenación novedoso, que permite avanzar en la descripción de estos sistemas de manera eficiente, orientados a hardware reconfigurables, sobre esta base se plantea estudiar los modelos matemáticos auto-similares entre los esquemas circuitales, y definir las ecuaciones del modelo de descripción lógica para VHDL.

El artículo está organizado desde la revisión de los esquemas de codificación concatenada en dos dimensiones, realizando una identificación del tipo de procesamiento de las secuencias, seguido de la descripción metodológica, donde se interpretan las ecuaciones matemáticas, se establece un método de modelado que considera la extrapolación de los modelos de los componentes, bajo un enfoque generalizado, hasta obtener como resultado un modelo lógico-matemático del codificador concatenado híbrido 2D-RS, que permite establecer conclusiones sobre los aportes del modelo desarrollado.

Antecedentes

El área de estudio de códigos compuestos, comprende codificadores 3DH [2], Turbo Code [3] y Product Code (cuya descripción se presenta en IEEE 802.16 Compatible Turbo Product Code Enconder v1.0 de Xilinx), estos realizan la codificación en dos o más dimensiones, requiriendo alta velocidad de cómputo, a fin de procesar de manera eficiente los datos de información, generando así los símbolos de redundancia. Por este motivo, presentan entre sus requerimientos mayor capacidad y velocidad de procesamiento, a fin de implementarse como un sistema de cómputo de alto rendimiento, donde el consumo energético es uno de los criterios de eficiencia a considerar.

En este orden de ideas, se han desarrollado investigaciones sobre modelos de procesamiento paralelo de los codificadores elementales, y el diseño de módulos para la implementación de códigos concatenados paralelos sobre FPGA [4], en los cuales se puede realizar el procesamiento de los datos a alta velocidad por parte de codificador compuesto. Igualmente, se han estudiado variables como la eficiencia energética en el proceso de codificación [5], donde se compara la estimación de recursos y potencia dinámica de los codificadores, realizando variaciones en la sintaxis de descripción VHDL, se han investigado técnicas de disminución del consumo de potencia para codificadores Reed Solomon sobre hardware reconfigurable [6], que consideran la tesis del modelado concurrente optimizado de las estructuras del codificador [7, 8], en la cual se ha identificado una estructura auto-similar en los componentes LFSR (Linear Feedback Shift Register) del codificador Reed Solomon, característica que se ha tomado como punto de partida para la obtención del modelo 2D-RS.

2. Fundamentos del Codificador 2D RS

Para la implementación de códigos concatenados con tecnología FPGA, se procesa un arreglo de datos que alimentará a un par de codificadores. En investigaciones previas se describen las características de los códigos productos aplicados sobre codificadores Reed Solomon como componentes,

dado que un código producto es una concatenación de códigos de bloque lineales sistemáticos, éste hereda las propiedades de los códigos elementales que lo componen [9, 10, 11, 12]. Así, partiendo de los códigos de bloque lineal sistemáticos C_1 y C_2 con parámetros (n, k, d_{min}) , que representan la longitud del código, el número de símbolos de información y distancia mínima respectivamente. El código producto $P = C_1 \otimes C_2$, consiste en una matriz de $n_1 \times n_2$. Los parámetros del código producto resultante se dan por: $n_p = n_1 n_2$, $k_p = k_1 k_2$ y $d_{min_p} = d_{min_1} d_{min_2}$, por lo tanto, es posible construir potentes códigos de producto.

Cuando un código C es un código RS (n, k) sobre el campo de Galois $GF(2^m)$, se obtiene un código producto Reed Solomon $RS - PC(n_1 n_2, k_1 k_2)$ sobre $GF(2^m)$. De esta manera, una de las aplicaciones de los codificadores RS (n, k) más interesantes por su arquitectura corresponde a los Reed-Solomon Product-Code (RS-PC) [13, 14]. En el caso de los códigos Reed-Solomon, desarrollados por los ingenieros – matemáticos Irving S. Reed y Gustave Solomon, estos son códigos no binarios, que están clasificados como códigos BCH (por las siglas de sus autores: Bose, Chaudhuri y Hocquenghem), estos son códigos lineales y cíclicos, cuya particularidad consiste en el tratamiento de los datos a través de bloques de longitud fija. El proceso de decodificación debe cumplir que la palabra de código sea divisible de forma exacta entre el polinomio generador, para su comprobación se cuenta con técnicas de decodificación altamente eficientes, incluso con características adaptativas [15], donde la eficiencia del codificador es una variable de interés, en tal sentido los codificadores optimizados – CESR [5], emplean técnicas de optimización para modelos VHDL.

Partiendo de los códigos producto [16] o códigos iterados, concatenados de forma serial [17], donde el codificador funciona sobre una matriz de símbolos de información mediante la codificación de los datos organizados en filas (inner code), seguido de otro codificador concatenado (outer code), que procesará los datos organizados en columnas. Esta configuración se puede interpretar como una operación no lineales de secuencias,

siendo la función $F(x1, x2)$, donde se realizan combinaciones no lineales de secuencias de salida de los LFSRs [18] del codificador RS. La codificación de la columna está formada tanto por los símbolos de información originales, como los símbolos de redundancia generados en la primera codificación [5], tal como se muestra en la Figura 1, donde se genera una matriz de $n1 \times n2$ símbolos.



Figura 1: Codificador Concatenado Serial.

La codificación concatenada paralela [19], en el cual se realiza una codificación solo sobre los $k1 \times k2$ símbolos de datos, sin generar símbolos de chequeo de los símbolos de redundancia de uno de los codificadores del Turbo block code [3], esta concatenación puede compararse con estructuras de procesamiento de Registros desplazamiento de Realimentación Lineal [20], Registros desplazamiento de Realimentación Dinámica [21], 2D-LFSR [22], Registros desplazamiento de realimentación no lineal [23], bajo el esquema de Multiplexado de secuencias aleatorias, obtenidas a través de estructuras LFSR, el cual se corresponde con la concatenación paralela, sustituyendo los LFSR por codificadores RS(n,k), su esquema de implementación se presenta en la Figura 2.

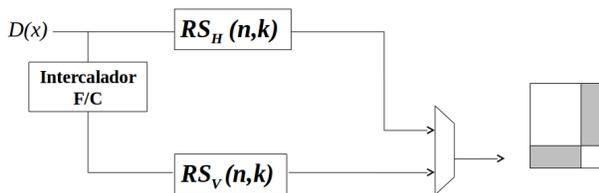


Figura 2: Codificador Concatenado Paralelo.

La estructura de datos de un RS-TPC (Turbo Code Product) de dos dimensiones, compuesto por un codificador de vectores de datos horizontal RS (n_1, k_1) y un codificador de vectores de datos vertical RS (n_2, k_2) , viene dada por una matriz $n_1 \times n_2$, que comprende $k_1 \times k_2$ símbolos de datos, un primer bloque de símbolos de redundancia de dimensiones $(n_1 - k_1) \times k_2$, resultado del

proceso de codificación interno, quedando una matriz de $n_1 \times k_2$, sobre la cual actúa el codificador externo generando un arreglo de redundancia de dimensiones $n_1 \times (n_2 - k_2)$, la matriz de salida se presenta en la Figura 3.

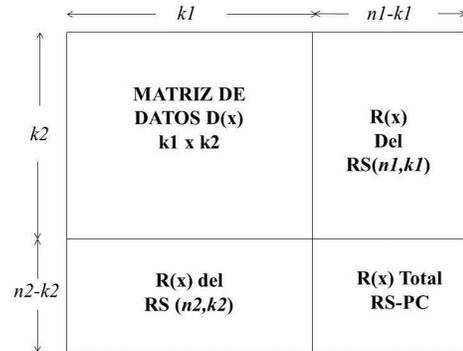
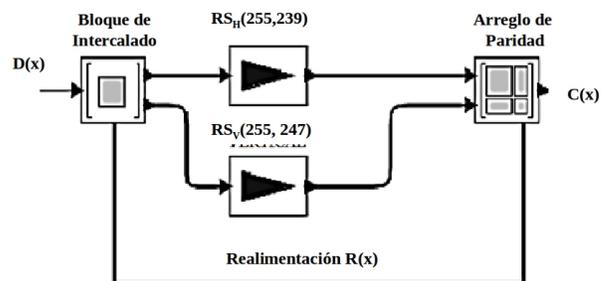


Figura 3: Esquema Matricial de Códigos 2D-RS.

3. Metodología

3.1. Interpretación del Comportamiento del Circuito 2D-RS

Un ejemplo de éste, puede ser un arreglo compuesto por un codificador horizontal $RS_H(255,239)$ para el procesamiento de las filas y un codificador vertical $RS_V(255,247)$ para el procesamiento de las columnas [24], donde la codificación realimentada depende de los resultados de los símbolos de redundancia generados por la primera codificación, como se muestra en la Figura 4.



a) Esquema circuital.

RS 247	7	241	48	172	84	143	66	243								
RS 239	1	126	147	48	155	224	3	157	29	226	40	114	61	30	244	75

b) Salidas $RS_V(255,247)$ y $RS_H(255,239)$.

Figura 4: Modelo del Codificador 2D-Reed Solomon.

A partir de estos esquemas o arreglos de códigos concatenado se estudia un esquema mixto, en el cual se pueda seleccionar la configuración de forma selectiva, la concatenación paralela o concatenación serial, con procesamiento paralelo de los datos $D(x)$, por ambos codificadores RS y una realimentación de los símbolos de redundancia selectiva, la cual se puede habilitar al codificador correspondiente, manejada a través de habilitadores, partiendo de una generalización del modelo, por medio de la concatenación de las salidas de los codificadores RS, esto implementado de forma matricial, como se muestra en la Figura 5.

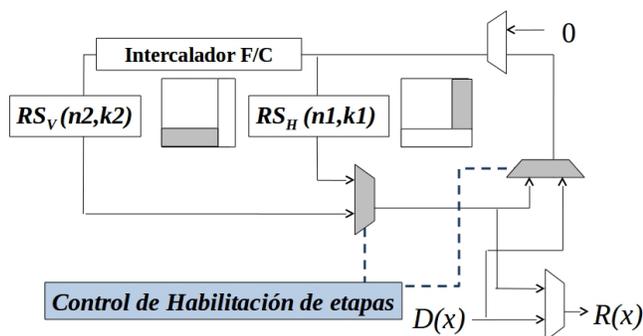


Figura 5: Codificador con método de Concatenación Selectivo 2D-RS.

Es de hacer notar, que para el caso del codificador concatenado paralelo se puede sustituir el multiplexor de salida, por un elemento lógico que permita la concatenación matricial de la salida de cada codificador RS componente, expresado como $R(x) = D_x \& RS_H(D_x) \& RS_V(D_x) \& RS_V(RS_H(D_x))$, igualmente a través de la operación xor entre las matrices resultantes, a fin de adaptar la estructura circuital a un LFSR, el mismo esquema puede ser asumido para la operación de la matriz de datos, con las matrices de redundancia parcial de cada codificador.

3.2. Interpretación Matemática de los componentes del 2D-RS

Partiendo del codificador Reed Solomon, en la definición de la palabra de código Reed Solomon $C(x)$, cada palabra debe ser múltiplo del polinomio generador $G(x)$, expresada ésta en su forma sistemática, corresponde al bloque de información

$D(x)$ adicionando los símbolos de redundancia calculados sobre el bloque de información. Este cálculo es el bloque resultante como residuo de la operación de división entre el polinomio generador $G(x)$, dada como $R_{G(x)}[arg]$ aplicada sobre los símbolos de datos. Tal como se expresa en la Ecuación (1).

$$C(x) = x^{n-k}D(x) + R_{G(x)}[D(x)x^{n-k}] \quad (1)$$

La expresión matemática corresponde a ensamblar dos polinomios con desplazamiento, definido como: $c = (D \ll (n-k)) + (D \ll (n-k)) \% g$; donde se desplaza el polinomio de datos de información $n - k$ posiciones a la izquierda, y los $n - k$ símbolos menos significativos son completados con el residuo de la operación mod del polinomio $G(x)$. De manera tal que la expresión polinomial de la palabra de código queda definida, como la suma de los polinomios mencionados, presentada en la Ecuación (2).

$$C(x) = x^{n-k}D(x) + x^{n-k}D(x) \text{ mód } G(x) \quad (2)$$

Encontrando así la expresión matemática del generador de símbolos de redundancia, dada por la Ecuación (3), correspondiente a la reducción modular del polinomio de datos, entre el polinomio generador $G(x)$.

$$R(x) = x^{n-k}D(x) \text{ mód } G(x) \quad (3)$$

Similar a la expresión de los polinomios generados como residuos parciales en la operación de multiplicación en campos finitos, definida por la Ecuación (4), que se expresa en función de los i desplazamientos x^i , que se realizan en el proceso de multiplicación para la operación con el coeficiente B_i correspondiente.

$$a_m(x) = x^i A(x) \text{ mód } p(x) \quad (4)$$

Donde $a_m(x)$ corresponde a la reducción modular, del polinomio $A(x)$ respecto al polinomio irreducible del campo de Galois $p(x)$. Lo que permite evidenciar una definición matemática similar, entre ambas estructuras. Seguidamente se analiza la implementación de las ecuaciones, las cuales corresponden a la salida de un generador de secuencia LFSR, en su representación de

Galois. Partiendo de la ecuación de convolución, se sustituye la salida de datos, por el vector de símbolos de redundancia $R(x)$, la entrada de datos, por los datos a codificar (compuesto con la realimentación) $d(x)$, y los coeficientes de la función de transferencia, por los coeficientes del polinomio generador del código $g(n - k)$, obteniendo así la Ecuación (5).

$$R(x) = \sum_{k=0}^n d(x)g(n - k) \quad (5)$$

para los $n - k$ símbolos generados

Para dicha expresión se ha empleado un término $d(x)$ que corresponde a un arreglo compuesto entre $d(k)$ y la realimentación del residuo en la posición menos significativa del polinomio $r_{k-1}(0)$, esto con el propósito de conservar la similitud de la expresión matemática (sin realimentación), al sustituir en función de la entrada del codificador $d(k)$, correspondiente a una muestra k del vector de datos, se obtiene así la Ecuación (6).

$$R(x) = \sum_{k=0}^n (d(k) \oplus r_{k-1}(n - k))G(x) \quad (6)$$

Del mismo modo, la ecuación que define el producto de $A(x)$ (correspondiente al primer operando) *mod* el polinomio generador del campo $p(x)$. Se puede expresar como la convolución, mostrada en la Ecuación (7).

$$a(x) \text{ mód } p(x) = \sum_{k=0}^m A(x)p(m - k) \quad (7)$$

Donde $a_m(x)$ se sustituye de igual modo, se puede expresar en correspondencia con la Ecuación (8).

$$a_m(x) = \sum_{k=0}^m (a(k) \oplus a(m))p(x) \quad (8)$$

Siendo $a_m(x)$ el polinomio de la reducción modular, $a(k)$ y $a(m)$ los elementos k y m respectivamente del polinomio $A(x)$ y $p(x)$ el polinomio irreducible del campo finito. En este punto, una vez establecida la similitud de los modelos matemáticos entre ambos componentes,

se considera la descripción matemática de un codificador concatenado serie, descrito por la Ecuación (9), en el cual se expresa el procesamiento del codificador interno sobre las k_2 y el codificador externo sobre las n_1 filas.

$$2D - R(x) = \sum_{i=0}^{n_1} \left(\sum_{j=0}^{k_2} D(x_{i,j}) \cdot f_C(x) \right) f_F(x) \quad (9)$$

Donde $D(x)$ será la entrada de datos, operada en función de la codificación Reed Solomon sobre filas $f_F(x)$ y la función Reed Solomon sobre columnas $f_C(x)$. Dada la similitud entre los modelos matemáticos de los tres circuitos, se consideran los avances desarrollados en las etapas del codificador concatenado [7], con el objetivo de realizar un modelo iterado, la descripción del codificador Reed Solomon (255, k) con el parámetro k configurable, y así permite la descripción de ambos codificadores en la estructura 2D-RS, donde elementos de memoria corresponden a arreglos matriciales.

3.3. Métodos de optimización aplicados al circuito 2D-RS

Las consideraciones realizadas partieron de los postulados que los *circuitos más rápidos consumen menor potencia* [25] y al igual que la reducción de la complejidad lógica, para la implementación de un codificador altamente eficiente en cuanto a velocidad de procesamiento. El método de modelado concurrente de las estructuras LFSR se presenta en la investigación del codificador RS(n,k) basado en LFCS - Linear Feedback Concurrent Structure [8], donde se realizó el cálculo de los símbolos en función de variables tiempo-espacio, para la descripción de los componentes LFSR del codificador Reed Solomon de forma concurrente. Se obtiene como resultado un conjunto de términos correspondientes a la descripción tiempo - espacio de los elementos del modelo, para su descripción en hardware paralelo la cual ha sido abordada en [7].

Por otra parte, *la habilitación selectiva de módulos* para el procesamiento paralelo permite manejar a través de tri-estados la configuración de etapas de forma óptima, con el menor consumo de

potencia. Esto corresponde a habilitar el número de codificadores Reed Solomon en paralelo, de acuerdo a la configuración de la concatenación.

Finalmente, considerar que los circuitos tienen un *consumo de energía proporcional a la complejidad computacional y la profundidad lógica del diseño*, por lo tanto la optimización de los recursos de hardware en el diseño, resultará en un consumo de energía proporcional.

En este sentido, se estableció la ecuación de estimación del consumo de potencia del diseño propuesto, basado en los elementos lógicos de las operaciones del circuito, considerando el modelo de estimación presentado por [26] para el componente multiplicador $P_M = 0,4(m^2 + 3(m - 1)^2/2)$. A partir de esta se definió la potencia del multiplicador optimizado $P_{M_OPT} = 0,4(m^2 + (pm - p - 2m + 2)(m - 1))$, se adaptó a la configuración propuesta, resultando la potencia estimada P_E dada por la Ecuación (10).

$$P_E = P_{M_OPT}(n_2 - k_2)k_1 D \quad (10)$$

Donde m , es el número de bits por símbolo; p , el número de bits no nulos del polinomio generador de campo GF; $n_2 - k_2$, los estados del generador de redundancia para el codificador RS2 multiplicado por el número de filas/columnas a procesar k_1 , siendo éste el número de símbolos de datos para el codificador RS1; y D , la dimensión del codificador concatenado, de esta manera la optimización desarrollada para los codificadores RS, cuyos reportes de eficiencia están documentados en [5, 6], es extrapolada para el modelo de codificador concatenado 2D-RS.

3.4. Método de Modelado de Generalización Estructural

El método de modelado está basado en el análisis de la similitud entre los circuitos componentes del sistema, asociado con modelos fractales de codificadores RS [27], en este caso se realizó la descripción en VHDL del comportamiento del codificador bajo un tratamiento de concreción, a fin de describir las ecuaciones espacio – temporal involucradas en la configuración del hardware, lo que se ha considerado un método aplicable

para el modelado del circuito, con los resultados obtenidos se han generado las ecuaciones en forma de funciones iteradas. El análisis matemático de los circuitos generadores de códigos Reed-Solomon, permite un nuevo enfoque en el modelado de sistemas con características auto-similares, así como algoritmos recurrentes. Así pueden ser extrapolados para la generalización de circuitos. En el cual, el tratamiento del modelo optimizado se puede desarrollar en base a la algoritmia característica de las estructuras fractales identificadas.

4. Resultados

4.1. Estructura LFSR del Codificador Concatenado Híbrido 2D-RS

En este caso se identificó que el generador de símbolos de redundancia del codificador Reed Solomon y el componente de reducción modular del multiplicador en el campo GF, presentan la misma estructura LFSR, y las funciones que definen su comportamiento matemático, como un sistemas de funciones iteradas, de manera tal que el codificador concatenado puede aprovechar esta característica, a fin de obtener un modelo simplificado. Así, considerando el principio de correspondencia permitió extender el diseño del multiplicador desarrollado, hacia la aplicación del codificador Reed Solomon, donde aplican los fundamentos para la paralelización del circuito LFSR y a su vez definir un esquema circuital similar para el codificador concatenado 2D-RS. En la Tabla 1 se presenta la correspondencia entre los elementos del LFSR de los circuitos estudiados, donde se identifican las dimensiones de los elementos de memoria, las operaciones que se realizan en las ramas del circuito y el polinomio que identifica la función de realimentación del LFSR.

Donde el polinomio generador del campo $p(x)$, el polinomio generador del código $g(x)$ y el polinomio generador de concatenación $f(x)$, definen los coeficientes para cada caso. Es de hacer notar que la definición de un polinomio $f(x)$, cuyos coeficientes controlan el procesamiento paralelo de codificación RS en cada rama del codificador concatenado, a través de la habilitación

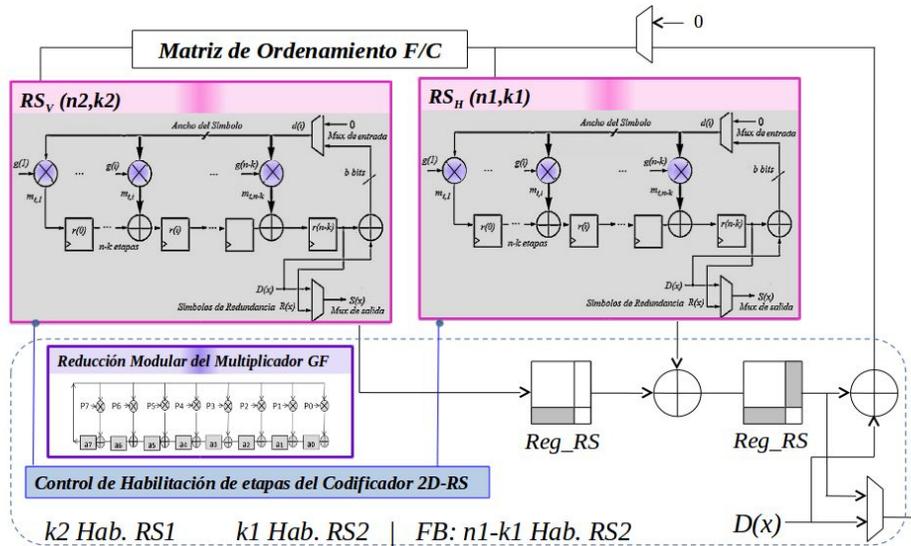


Figura 6: Estructura generalizada del codificador RS-2D.

Tabla 1: Identificación de Componentes de los Modelos propuestos.

Componente LFSR	RS-PC	Codificador RS	Mult. GF
Elemento de memoria	Bloque $(n \times k)$ símbolos	Símbolos (m bits)	bit
Operador de ramas	RS(n,k)	Mult.GF	and
Polinomio Generador	$f(x)$	$g(x)$	$p(x)$

de codificación en procesamiento paralelo y en realimentación. Esto corresponde a un enfoque novedoso, este polinomio permite el diseño de códigos RS-PC más complejos y con mayor ganancia, como los presentados en [11].

En este punto se realizó una generalización, a fin de adaptar el modelo del codificador concatenado a la estructura LFSR de los componentes internos, multiplicador GF y codificador RS, motivo por el cual la selección (implementada a través de los multiplexores de salida de datos codificados, se ha remplazado por habilitadores de los componentes codificadores) y concatenación matricial simple (presentada en la Figura 5) se ha reacomodado en la expresión de suma módulo2 de segmentos de la matriz, para obtener la concatenación del arreglo de datos con los arreglos de redundancia resultante, como se muestra en la Figura 6.

A partir de la estructura, se puede obtener una función de transferencia similar en los tres casos, así se puede observar la relación entre los LFSR del componentes reducción modular del multiplicador GF (la vista del esquema detallado se observa en términos de $a7...a0$, estado del LFSR y $p7...p0$, elementos del polinomio irreducible del campo), en una estructura anidada con relación al LFSR dpl codificador RS, y éste con el 2D-RS, donde se reconoce una arquitectura fractal. Finalmente, se adapta la concatenación a la estructura LFSR, integrando un componente de control de habilitadores, que permite la selección de etapas de codificación, a fin de deshabilitar los módulos en alta impedancia, mientras no se estén utilizando.

En el primer ciclo se emplean los codificadores paralelos para k vectores de datos, definidos estos por los habilitadores k_1 y k_2 respectivamente, en el ciclo de realimentación se habilitarán solo $n - k$ codificadores para la matriz de símbolos de redundancia parcial, habilitado por FB. De manera selectiva se puede habilitar uno ambos bloques de codificación, teniendo la paridad compuesta como el resultado de paridad de los símbolos de redundancia de uno de los codificadores o la operación xor entre la paridad de cada uno.

Una vez definido el esquema del codificador RS-2D generalizado en la estructura base LFSR,

se ha realizado la descripción VHDL, a través de la operación VHDL “concatenación”, el cual permite el manejo de los fragmentos de datos y la composición de la matriz total codificada, el código de descripción del RS-2D se presenta en la Figura 7.

```

architecture Behavioral of nDRS is
component Codificador_RS is
--Codificador paralelo como un procesador matricial
Port ( Mdato : matriz is array (0 to k1)
of std_logic_vector(width-1 downto 0);
Mred : matriz is array (k1+1 to n1)
of std_logic_vector(width-1 downto 0);
end component;
begin
process (clk)
C1: Codificador_RS port map (Mdato, Mred_hor);
--Codificación horizontal paralelo
C2: Ordenador_mat port map (Mdato, Mdato_vert);
--Ordenador fila/columna
C3: Codificador_RS port map (Mdato_vert, Mred_vert);
--Codificación vertical paralelo
if (clk'event and clk='1') then
dato <= Mdato & Mred_hor
-- equivalente a suma matricial estructurada
end if;
C4: Ordenador_mat port map (dato, Mdato_vert);
--Ordenador f/c de redundancia
C5: Codificador_RS port map (Mdato_vert, Mred_total);
--Codificación vertical de redundancia
2D-RS <= Mdato & Mred_hor & Mred_ver & Mred_total;
--Concatenación matricial 2D-RS <= dato & Mred_total
end process;
end Behavioral;

```

Figura 7: Descripción VHDL del Codificador 2D-RS.

4.2. Modelo del Codificador Concatenado Híbrido 2D-RS

Una vez definido el modelo a partir de los términos particularizados, y considerando las variables estudiadas, se generaliza el modelo de forma condensada, partiendo de la descripción que modela el componente multiplicador, dada por la Ecuación (11)

$$m_{i,x} = \bigoplus_{t=1}^m (a_m(x) b_i) \quad (11)$$

siendo:

$$a_m(x) = \&_{i=0}^{m-1} a_{t-1}(i-1) \oplus (a_{t-1}(m-1) p(i))$$

La cual corresponde a la reducción modular de $a(x)$ con respecto al polinomio irreducible $p(x)$, por el coeficiente i de $b(x)$. La ecuación del modelo

del codificador paralelo, se puede expresar a través de la Ecuación (12).

$$r_t = \&_{i=0}^{n-k} r_{t-1}(i) \oplus [(D(i) \oplus r_{t-1}(n-k)) \otimes g(x)] \quad (12)$$

Donde r_t corresponde al elemento actual generado en la posición i , el cual es el resultado de la operación xor entre el elemento en la posición anterior con un retardo de tiempo $r_{t-1}(i-1)$ y el término generado por la operación entre la xor del dato de entrada $x(t)$ y el elemento de mayor peso un instante de tiempo anterior $r_{t-1}(n)$ con el coeficiente de la función $g(i)$. Al sustituir el modelo del codificador Reed Solomon desarrollado en el modelo del codificador concatenado n -dimensional, para $n = 2$ se tiene como salida la concatenación de símbolos dada por: $f_1(D(x)) \& f_0(D(x)) \& [f_1(rs_{t-1}(0) \oplus f_0(rs_{t-1}(1))]$, se obtiene así el modelo presentado en la ecuación 13, para un $nD - RS$, siendo éste similar a los componentes.

$$nD - RS = \&_{i=0}^{n-1} rs_{t-1}(i) \oplus [(D(x) \oplus rs_{t-1}(i)) \otimes f(x)] \quad (13)$$

Donde $f(x)$ corresponde a la operación Reed Solomon sobre los datos de información, para cada rama en paralelo del codificador concatenado (con habilitación de la etapa correspondiente y el número de arreglos a procesar), y $rs_{t-1}(i)$ los símbolos de redundancia generados en la operación anterior. El modelo optimizado para funciones iteradas, acá propuesto será útil en estas aplicaciones, ya que permite mejorar el desempeño del RS-PC, lo que justifica la paralelización de los codificadores RS que lo componen. De modo que, este desarrollo podrá servir de insumo para futuras aplicaciones de codificadores híbridos con características adaptativas, basados en la capacidad de reconfiguración dinámica de los FPGAs y las características que estos dispositivos presentan [32]. Todo esto con el fin de reducir el tiempo de desarrollo y optimizar el desempeño de las etapas de los sistemas compuestos por codificadores concatenados en sus diversas combinaciones y aportando un cambio de paradigma en el diseño.

5. Conclusiones

Gracias a la naturaleza del código Reed Solomon, “cíclico de bloques” y la definición del producto en campos finitos GF, en trabajos previos [7], se analizó la realimentación en ciclos iterados para la paralelización de sus componentes, definiendo el procesamiento por bloques para un tratamiento concurrente del conjunto de datos. En esta investigación se han considerado estos avances para definir un nuevo modelo, al que hemos llamado “Código Concatenado Híbrido 2D-RS”, por permitir la configuración de concatenación serial/paralelo, a través del polinomio generador de la concatenación $f(x)$, siendo éste un elemento nuevo que se ha incorporado para optimizar el modelado. En este esquema de codificación se aplica el procesamiento optimizado de los datos en los códigos Reed Solomon definidos en VHDL, incorporándolos como códigos elementales en este modelo multidimensional 2D.

De esta manera, se evidencia la similitud entre las estructuras circuitales LFSR, con operadores de diferentes dimensiones, lo que permite observar el Isomorfismo estructural entre los componentes, y la correspondencia de los modelos matemáticos. En tal sentido, se aplica el modelo optimizado de los componentes RS [7], partiendo de su análisis temporal e interpretación del comportamiento del LFSR para la obtención de las ecuaciones, este tratamiento es un enfoque del Principio Holográfico, de coexistencia en el espacio de resultados secuenciales. En este análisis se reconoce la presencia de (i) Funciones Iteradas, las cuales se pueden modelar para la implementación concurrente del circuito secuencial, (ii) Auto-similitud entre los componentes LFSR de las estructuras del multiplicador GF y del codificador RS, de las mismas características, pero a diversas escalas, por lo que se puede identificar la posibilidad optimizar la aplicación, como un circuito fractal en VHDL.

Igualmente, la trascendencia científica corresponde al logro de la optimización del modelo de una aplicación compleja, a través de un método de concatenación de elementos eficientes, cuyos modelos para configuración en VHDL, comprende la descripción circuital de circuitos concurren-

tes, generados haciendo uso de la operación de concatenación “&”, soportada en las nuevas tecnologías de diseño de hardware. Esta técnica para la reducción del consumo de potencia mediante el procesamiento paralelo, simplificación de variables, concatenación para ordenamiento de símbolos, etc., permitió desarrollar un modelo para la generación de código VHDL, enfocado en hardware libre por ofrecer las ecuaciones para la descripción del codificador, sobre tecnología FPGA.

Obteniendo en el método de modelado un avance significativo en la descripción de las ecuaciones para VHDL por extrapolación de optimizaciones de los módulos componentes, donde se busca el equilibrio entre (a) el procesamiento paralelo, mediante la codificación paralela de la matriz de datos en filas/columnas), (b) la eficiencia energética, esto a través de la deshabilitación de etapas para ahorro de energía, y (c) el menor número de recursos de los dispositivos FPGA, reutilizando componentes diseñados mediante la realimentación selectiva de resultados previos, como es el caso de la matriz de redundancia parcial. Destacando, la obtención de las ecuaciones del código concatenado, que aporta un método de configuración de hardware en VHDL, basado en modelado matemático-lógico, aprovechando la correspondencia matemática-circuitual, en las estructuras de realimentación LFSR, de los componentes del código RS(n,k), el elemento multiplicador y el codificador 2D-RS.

Se presenta el modelo desarrollado con características innovadoras, tanto en el método abordado como en los resultados, a la vez de promover la investigación en el área de cómputo de alto rendimiento, donde se extrapola el modelo del codificador $RS(n, k)$, a través del método de modelado lógico-matemático, para alcanzar la optimización de rendimiento, sobre hardware reconfigurable. Lo que representa un aporte a la comunidad científica, donde los avances pueden ser aplicados en futuras actualizaciones, sirviendo de insumo en la generación de nuevo conocimiento en el área de hardware reconfigurable aplicado en comunicaciones digitales. Este proyecto pretende dar continuidad a desarrollos previos en el

área, cuyo aporte está dado por el tratamiento matemático-lógico de las funciones iteradas reconocidas, dentro de la aplicación objeto de estudio, tomando como base la investigación en modelado optimizado, a través de estructuras LFSR [7], para las estructuras afines.

Referencias

- [1] Johnny Phuong Nguyen. *Applications of Reed-Solomon codes on optical media storage*. Doctoral Thesis, San Diego State University, USA, 2011.
- [2] Chagun Basha Basheer Ahmed. *Fault mitigation strategies for reliable FPGA architectures*. Thèse de Doctorat, Université De Rennes 1, France, 2016.
- [3] Todd K. Moon. *Error correction coding: mathematical methods and algorithms*, chapter 14. Turbo codes, pages 581–633. John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- [4] Cecilia Sandoval. Diseño de módulos funcionales para implementación de códigos concatenados paralelos sobre FPGA. In *VI Congreso de Investigación Universidad de Carabobo. La investigación en el siglo XXI: oportunidades y retos*, pages 535–539, Venezuela, 2008.
- [5] Cecilia Esperanza Sandoval Ruiz and Antonio S. Fedón Rovira. Efficient RS (255, k) encoder over reconfigurable systems. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería Universidad del Zulia*, 37(2):151 – 159, 08 2014.
- [6] C. Sandoval. Power consumption optimization in Reed Solomon encoders over FPGA. *Latin American Applied Research*, 44:81–85, 2014.
- [7] C. E. Sandoval Ruiz. *Modelo optimizado del codificador Reed-Solomon (255, k) en VHDL a través de un LFSR paralelizado*. Tesis Doctoral, Dirección de Postgrado, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2013.
- [8] Cecilia Sandoval-Ruiz. Codificador rs (n, k) basado en lfcfs: caso de estudio rs (7, 3). *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (64):68–78, 2012.
- [9] C. Leroux, G. Le Mestre, C. Jégo, P. Adde, and M. Jezequel. A 5-Gbps FPGA prototype of a (31,29)₂ Reed-Solomon turbo decoder. In *2008 5th International Symposium on Turbo Codes and Related Topics*, pages 67–72, Sept 2008.
- [10] Raphaël Le Bidan, Camille Leroux, Christophe Jégo, Patrick Adde, and Ramesh Pyndiah. Reed-Solomon turbo product codes for optical communications: from code optimization to decoder design. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2008:14, 2008.
- [11] Bingrui Wang, Xiaofei Yang, Xingzhong Yao, Hongzhi Zhang, and Yue Zhang. Highly reliable product code for error correction. *International Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 10(8):277–286, 2015.
- [12] Jorge Castiñeira Moreira and Patrick Guy Farrell. *Essentials of error-control coding*. John Wiley & Sons, 2006.
- [13] Hsie-Chia Chang, C. Bernard Shung, and Chen-Yi Lee. A Reed-Solomon product-code (RS-PC) decoder chip for DVD applications. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 36(2):229–238, 2001.
- [14] C. Kim, S. Rhee, J. Kim, and Y. Jee. Product Reed-Solomon codes for implementing NAND flash controller on FPGA chip. In *2010 Second International Conference on Computer Engineering and Applications*, volume 1, pages 281–285, March 2010.
- [15] Jonathan D. Allen. Energy efficient adaptive Reed-Solomon decoding system. Master's thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Massachusetts Amherst, USA, 2008.
- [16] Shu Lin and Daniel J. Costello. *Error control coding*. Pearson Education International, 1983.
- [17] Ramesh Mahendra Pyndiah. Near-optimum decoding of product codes: block turbo codes. *IEEE Transactions on Communications*, 46(8):1003–1010, 1998.
- [18] Patrik Ekdahl. *On LFSR based Stream Ciphers - analysis and design*. PhD thesis, Lund University, Sweden, 2003.
- [19] Ken Harima. Decodificación de salida suave para códigos Reed-Solomon y su aplicación a códigos concatenados. Tesis de Maestría, Decanato de Estudios de Postgrado, Universidad Simón Bolívar, Venezuela, 2006.
- [20] Claudio Mucci, Luca Vanzolini, Ilario Mirimin, Daniele Gazzola, Antonio Deledda, Sebastian Goller, Joachim Knaeblein, Axel Schneider, Luca Ciccarelli, and Fabio Campi. Implementation of parallel lfsr-based applications on an adaptive dsp featuring a pipelined configurable gate array. In *Design, Automation and Test in Europe, 2008. DATE'08*. IEEE, 2008.
- [21] A. Peinado, J. Munilla, and A. Fúster Sabater. Diseño de cifradores en flujo DLFSR con alta complejidad lineal para implementación hardware. In *Actas de la XIII Reunión Española sobre Criptología y Seguridad de la Información*, pages 63–68, Alicante, España, 2014.
- [22] Chien-In Henry Chen. Synthesis of configurable linear feedback shifter registers for detecting random-pattern-resistant faults. In *Proceedings of the 14th International Symposium on Systems Synthesis, ISSS '01*, pages 203–208, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [23] Elena Dubrova, Maxim Teslenko, and Hannu Tenhunen. On analysis and synthesis of (n, k)-non-linear feedback shift registers. In *Design, Automation and Test in Europe, 2008. DATE'08*, pages 1286–1291. IEEE, 2008.
- [24] J. Lee and K. A. Schouhamer Immink. An efficient

decoding strategy of 2D-ECC for optical recording systems. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 55(3):1360–1363, August 2009.

- [25] Andreas Genser, Christian Bachmann, Christian Steger, Jos Hulzink, and Mladen Berekovic. Low-power asip architecture exploration and optimization for reed-solomon processing. In *Application-specific Systems, Architectures and Processors, 2009. ASAP 2009. 20th IEEE International Conference on*, pages 177–182. IEEE, 2009.
- [26] Lionel Biard and Dominique Noguét. Reed-Solomon Codes for low power communications. *Journal of Communications*, 3(2):13, 2008.
- [27] A. Astarloa. *Reconfiguración dinámica de sistemas modulares multi-procesador en dispositivos SoPC*. Tesis Doctoral, Universidad del País Vasco, España, 2005.

Determination of the effect of a normalized thermal treatment on the fatigue life by rotating flexion of an AISI 1045 steel

Hernán Ulloa^a, Dessireé Scope^a, Argel Porrello^{*,b}, Carlos Alfonzo^b, Franklin Camejo^b

^aEscuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

^bCentro de Investigaciones en Mecánica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela

Abstract.-

In this research, the effect of a normalized thermal treatment on the fatigue life by rotating flexure of an AISI 1045 steel was determined. For this, the mechanical properties of the normalized steel were defined by tensile tests and five groups of specimens were studied under fatigue at the same level of alternating stress exceeding the fatigue limit of the material. A control group was used in which it was tested until fracture to determine the failure probability interval by the Maennig method. The other groups were tested with an interruption to perform a normalized, three of them were cycled values lower than the 1 % probability of failure and one slightly above it. Each group was determined the failure probability interval and compared to the control group, a variation of the same was found. With the quantification of these results, we can talk about the possibility of reversion of accumulated fatigue damage, at a number of cycles lower than the 1 % probability of failure, which could be used to extend life fatigue AISI 1045 steel.

Keywords: Maennig method; fatigue; AISI 1045; cumulative damage; normalized.

Determinación del efecto de un tratamiento térmico de normalizado sobre la vida a fatiga por flexión rotativa de un acero AISI 1045

Resumen.-

En esta investigación se determinó el efecto de un tratamiento térmico de normalizado sobre la vida a fatiga por flexión rotativa de un acero AISI 1045. Para ello se definieron las propiedades mecánicas del acero normalizado mediante ensayos de tracción y se estudiaron a fatiga cinco grupos de probetas a un mismo nivel de esfuerzo alternante superior al límite de fatiga del material. Se usó un grupo de control en el cual se ensayó hasta la fractura para determinar el intervalo de probabilidad de falla mediante el método de Maennig. Los otros grupos se ensayaron con una interrupción para realizar un normalizado, tres de ellos fueron ciclados unos valores menores que el de 1 % de probabilidad de falla y uno ligeramente por encima del mismo. A cada grupo se le determinó el intervalo de probabilidad de falla y se comparó con el grupo de control, encontrándose una variación del mismo. Con la cuantificación de estos resultados, se puede hablar de la posibilidad de la reversión del daño acumulado por la fatiga, a un número de ciclos inferior que el de 1 % de probabilidad de falla, lo cual pudiera utilizar para extender la vida una fatiga de acero AISI 1045.

Palabras clave: Método Maennig; fatiga; AISI 1045; daño acumulado; normalizado.

Recibido: diciembre 2016

Aceptado: marzo 2017

1. Introducción

El deterioro de los materiales bajo esfuerzos fluctuantes se conoce como daño acumulado por fatiga, concepto introducido por Palmgren [1] en los años veinte. En la actualidad la

*Autor para correspondencia

Correo-e: ajporrello@uc.edu.ve (Argel Porrello)

industria requiere elementos como ejes, árboles de transmisión de potencia, bielas, ruedas, engranajes, entre otros; los cuales son fabricados en su mayoría de materiales metálicos, generalmente de aceros; dichos elementos son sometidos a los efectos de la fatiga, en ocasiones minimizando su vida útil sin poder predecir la falla, causando la ejecución de mantenimientos correctivos, así como también paradas de planta que incrementan los costos operacionales y disminuyen la producción.. En esta investigación se evaluó el efecto producido por un normalizado sobre el daño acumulado, antes de la iniciación de la micro grieta, utilizando el método de Maennig [2, 3] y escogiendo un acero de gran utilidad para la fabricación de piezas relevantes en el funcionamiento de la industria en general, las cuales frecuentemente se encuentran bajo el efecto de la fatiga. Este método permitió definir la vida a fatiga para un esfuerzo alternante “S” con probabilidades de falla del 1 % y 99 % llamadas $N(1\%)$ y $N(99\%)$ respectivamente, definiendo un intervalo de ciclos de probabilidad de falla, como se muestra en la Figura 1.

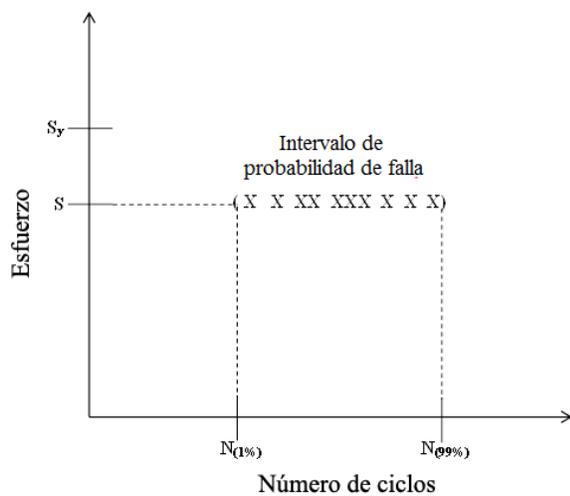


Figura 1: Representación esquemática del intervalo de probabilidad de falla.

2. Metodología

Para el presente trabajo se utilizó un acero AISI 1045 suministrado en barras de 6 metros

de longitud y 12,7 mm de diámetro, con una composición química de [0,43-0,50] % C, [0,60-0,90] % Mn, 0,04 % P máx. y 0,05 % S máx., (tomado del catálogo de SUMINDU 2013). Para la obtención de las propiedades mecánicas se mecanizaron las muestras de acuerdo a la norma ASTM E-8M [4], y se ensayaron en una máquina universal marca Galdabini, modelo CTM 20. Obteniéndose: Resistencia a la fluencia, resistencia a la tracción, porcentaje de alargamiento y porcentaje de reducción de área.

Para los ensayos de fatiga se fabricaron sesenta (60) muestras con las dimensiones especificadas en la norma ASTM E-606 [5]. Posteriormente, se pasó a un proceso de lijado, con los papeles abrasivos de números: 240, 280, 360, 400 y 600 hasta garantizar que la rugosidad promedio (R_a) se encontraba por debajo de $0,2 \mu\text{m}$, dando cumplimiento a las especificaciones de la norma ASTM E-606 [5]. Una vez preparadas las probetas, se procedió a tratarlas térmicamente por normalizado calentándolas a $850 \text{ }^\circ\text{C}$ en un horno marca TEMCO durante 30 minutos, para luego enfriarlas al aire tranquilo hasta temperatura ambiente.

Los ensayos de fatiga fueron realizados en una máquina de flexión rotativa modelo RDF-200 MT, la cual está diseñada para aplicar cargas totalmente invertidas en voladizo. Se utilizó una velocidad de giro de 5000 rpm.

2.1. Determinación del intervalo de probabilidad de falla

El método de Maennig [6, 3] contempla el rango de transición y de vida finita, como antes fue mencionado. Sin embargo, para el presente trabajo sólo se llevó a cabo el estudio del intervalo de vida finita, debido al interés presente en la evaluación de la variación del intervalo de probabilidad de falla al practicar un tratamiento térmico después de haber sometidos a ciclos de fatiga inferiores al 1 % de probabilidad de falla para luego continuar ciclando hasta la fractura. En la evaluación del intervalo de vida finita la variable independiente es la carga y la variable dependiente el número de ciclos. Para la estimación de la probabilidad de fractura de cada probeta, se utilizó la ecuación (1),

de acuerdo a lo descrito por Mosalve [7].

$$P_f = \frac{i - 0,417}{n + 0,166} \quad (1)$$

Donde P_f es la probabilidad de fractura en tanto por uno, i es el orden correlativo que correspondiente a la probeta al ordenarlas de manera ascendente de acuerdo al número de ciclos para la fractura y n es el número de probetas ensayadas.

Posteriormente se calculó las transformadas del número de ciclos para la fractura y de la probabilidad de fractura, utilizando las ecuaciones (2) y (3), respectivamente.

$$X = \ln(N) \quad (2)$$

$$\psi = \sqrt[3]{\ln(P_f)} \quad (3)$$

Donde X es la transformada del número de ciclos de fractura N y ψ es la transformada de la probabilidad de fractura P_f (todas adimensionales)

Al graficar todos los puntos (X, ψ) , y hacer un ajuste por mínimo cuadrados a una función lineal, se puede determinar el número de ciclos para probabilidades de fractura de 1% y 99% al hallar los valores de X correspondientes a los valores de ψ para dichos valores de probabilidad de fractura. En la Figura 2 se puede observar una representación esquemática del proceso.

Se estudiaron cinco grupos de probetas, uno de los cuales fue establecido como de control al determinarse el intervalo de probabilidad de falla sin interrupción del ensayo en cada probeta (cómo normalmente se lleva a cabo un ensayo de fatiga); luego en otros tres grupos, las probetas fueron ensayadas hasta un número de ciclos menor al de 1% de probabilidad de falla determinado para el grupo de control, se detuvo el ensayo, una vez cicladas todas las probetas se les realizó un normalizado calentando a 850°C y durante media hora y luego enfriando al aire libre quieto. y el restante grupo se ensayó a un número de ciclos ligeramente superior al de 1% de probabilidad de falla del grupo de control.

Todos los grupos fueron ensayados a un mismo nivel de esfuerzo e igual rpm, cada grupo con 8 probetas, manteniendo las sobrantes de respaldo

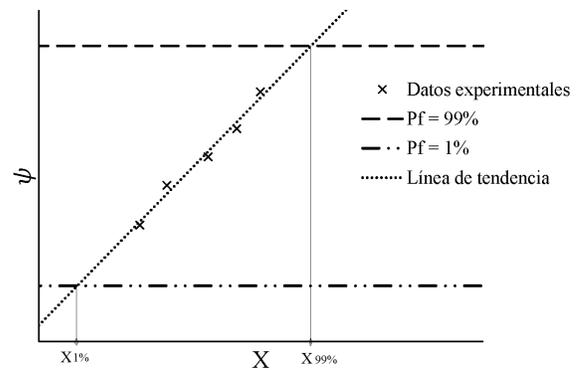


Figura 2: Determinación del intervalo de probabilidad de falla.

por cualquier eventualidad durante los ensayos. Para los grupos con tratamiento térmico intermedio, el número de ciclos para la fractura fue la suma de los ciclos antes y después del normalizado (ecuación (4))

$$N = N_t + N_f \quad (4)$$

Donde N es la vida a fatiga de la probeta, N_t y N_f los ciclos realizados antes y después del tratamiento de normalizado, respectivamente.

Inicialmente se realizó una prueba con un nivel de esfuerzo (S) de 300 MPa, menor al valor de fluencia y mayor al límite de fatiga, presentado por Marín [8]. Luego de ensayadas dos primeras probetas del primer grupo, se observó que los valores de número de ciclos de fractura (N_f) fueron muy bajos y cercanos entre sí, por lo que se decidió tomar un valor de esfuerzo de 290MPa, cuidando que siguiera siendo mayor al límite de fatiga, esto con la finalidad de garantizar la falla de las probetas y obtener un intervalo de probabilidad de falla suficientemente amplio para realizar el estudio.

3. Resultados y discusión

Mediante los ensayos de tracción realizados se determinó un esfuerzo de fluencia promedio de 461,7 MPa (S_y) con una desviación estándar de 1,15 MPa; un esfuerzo máximo de 738,4 MPa (S_u) con una desviación estándar de 1,5 MPa; el porcentaje de alargamiento a la rotura fue de 20,6% con una desviación estándar de 1,69%

y el porcentaje de reducción de área fue de 41,7% con una desviación estándar de 3,47%. El esfuerzo de fluencia determinado fue un 5,4% mayor al obtenido por Marín [8] lo cual dio sustento al uso del límite de fatiga determinado en esa investigación como valor de referencia para determinar el esfuerzo de estudio en este trabajo.

Respecto a los ensayos de fatiga, en la Tabla 1 se muestran los resultados de vida a fatiga de cada una de las ocho probetas ensayadas, así como el correlativo al ordenarlas en orden ascendente y los cálculos de probabilidad de falla y la transformada de ésta y de la vida a fatiga.

Tabla 1: Vida a la fatiga, probabilidad de fractura y sus transformadas para el grupo de control.

Probeta	N(ciclos)	X	i	P_f	ψ
1	298.000	12,605	8	0,929	-0,420
2	278.200	12,536	6	0,684	-0,724
3	206.700	12,239	2	0,194	-1,179
4	213.100	12,270	3	0,316	-1,048
5	218.000	12,292	4	0,439	-0,937
6	291.600	12,583	7	0,806	-0,600
7	120.900	11,703	1	0,071	-1,382
8	232.800	12,358	5	0,561	-0,833

En la Figura 3 se representan gráficamente los valores de transformada de la probabilidad de fractura (ψ), y de la transformada del número de ciclos de falla (X) junto con el ajuste lineal mediante mínimos cuadrados y las líneas horizontales que representan las transformadas de probabilidad para 1% y 99%.

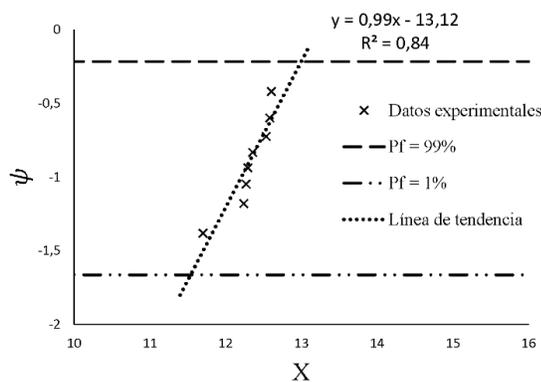


Figura 3: Intervalo de probabilidad falla mediante el método de Maennig.

Al intersectar la línea de ajuste hecha para los valores experimentales con las líneas horizontales de transformada de la probabilidades de 1% y 99%, se obtuvieron los valores de transformada del número de ciclos de vida a fatiga correspondientes a los mismos. En la Tabla 2 se resumen los valores de transformada obtenidos y de vida a fatiga para cada probabilidad de falla (intervalo de probabilidad de falla) para el grupo de control.

Tabla 2: Intervalo de probabilidad de falla del grupo de control.

P_f	$\psi = \sqrt[3]{\ln(P_f)}$	$X = \frac{\psi+13,11}{0,992}$	$N = e^X$ (ciclos)
0,01	-1,664	11,544	103.205
0,99	-0,216	13,004	444.154

Como puede observarse en la Tabla 2, el número de ciclos para una probabilidad de falla de 1% a 290 MPa es de 103.205 ciclos, de manera que los siguientes grupos estudiados tuvieron cantidades de ciclos de 40000, 80000, 100000 y 120000 antes de detener el ensayo para luego normalizar y nuevamente ensayar hasta la fractura. En la Tabla 3 se muestran los resultados obtenidos del intervalo de probabilidad de falla para cada grupo estudiado.

Tabla 3: Intervalo de probabilidad de falla para los diferentes grupos estudiados.

GRUPO	Ntt (ciclos)	$N_{1\%}$	$N_{99\%}$
Control	0	103.205	444.154
grupo 1	40.000	124.826	703.737
grupo 2	80.000	115.146	816.886
grupo3	100.000	94.088	639.215
grupo 4	120.000	59.283	500.081

En la Figura 4 se representan los intervalos de probabilidad de falla de los diferentes grupos estudiados, observándose su comportamiento para las probetas de acero AISI 1045 bajo condiciones de ciclaje acumulado, con un normalizado intermedio antes de la fractura, a un nivel de esfuerzo fluctuante de 290 MPa.

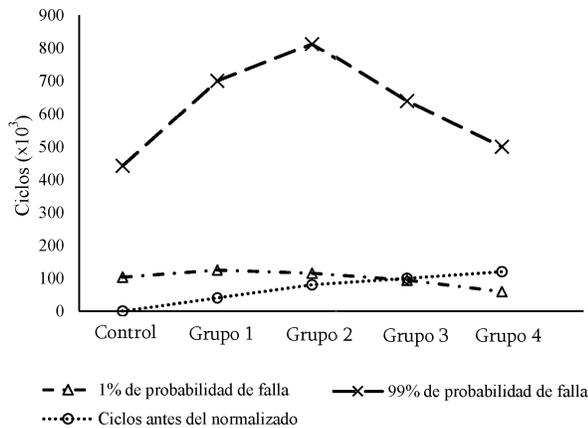


Figura 4: Intervalos de probabilidad de falla de los grupos estudiados.

Como se puede observar en la Figura 4, todos los intervalos de probabilidad de falla se expandieron al aplicar un normalizado al acero AISI 1045 luego de haber sido sometido a condición de carga durante un número de ciclos determinado. En los grupos 1 y 2 con 40000 y 80000 ciclos antes del normalizado, respectivamente, mostraron un aumento del número de ciclos para una probabilidad de fractura de 1 % (20,9 % y 11,6 %, respectivamente), lo cual se pudiera interpretar como una ganancia en la vida a fatiga del material respecto al grupo de control, sugiriendo una posible reversión del daño acumulado antes del normalizado, para una cantidad de hasta 80.000 ciclos previos, que representa el 77,5 % de los ciclos para 1 % de probabilidad de falla. Por otro lado, los grupos 3 y 4 mostraron una disminución del número de ciclos para una probabilidad de fractura de 1 % (-8,8 % y -42,6 %, respectivamente), a pesar de que el grupo tres fue ciclado a un valor inferior, pero muy cercano, al del grupo de control, lo cual pudiera sugerir la existencia de un umbral para la reversión del daño por fatiga, el cual estaría a un nivel de ciclos inferior al de 1 % de probabilidad de fractura.

Respecto al límite superior del intervalo de probabilidad de falla (99 %), se puede observar en la Figura 4 que todos los grupos presentaron aumento en dicho valor, reforzando esto la suposición de la posibilidad de revertir el daño acumulado por fatiga y de la existencia de un umbral más allá del

cual el daño será irreversible, de acuerdo con el siguiente planteamiento:

Supóngase que existe un valor N_u de ciclos hasta el cual el daño acumulado por fatiga es reversible (umbral de daño acumulado), el cual estaría por debajo del número de ciclos para una probabilidad de fractura de 1 %. Ahora supóngase que se cuenta con un número de probetas (4 por ejemplo) de las cuales se conoce, para un determinado esfuerzo cíclico, la vida a fatiga y el umbral de fatiga. Como son conocidas las vidas a fatigas, entonces se puede determinar el intervalo de probabilidad de falla para ese nivel de esfuerzo mediante el método de Maennig, representado por la intersección del ajuste lineal (inicial) y las horizontales de 1 % y 99 % de probabilidad de falla de la Figura 5.

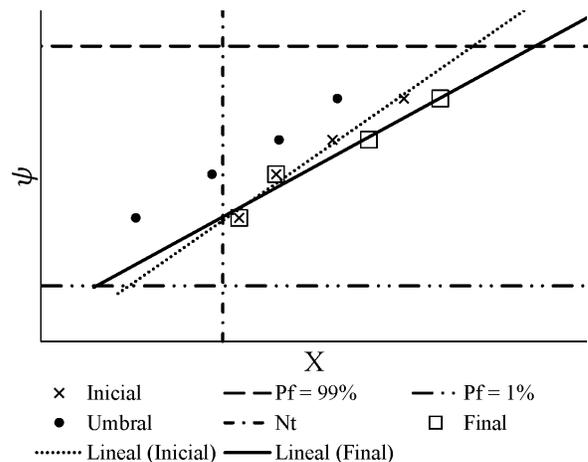


Figura 5: Representación de la expansión del intervalo de probabilidad de falla.

Lo que pasaría con ese grupo de probetas, si fuesen cicladas hasta una cantidad N_i de ciclos, que como puede observarse en la Figura 5, sería mayor que el umbral de dos de las probetas, entonces para esas el daño acumulado es irreversible. Si después de cicladas fuesen sometidas, como en el caso de este estudio, a un normalizado, la muestras cuyo umbral no fue superado entonces extenderían su vida; mas no aquellas en las que se superó el umbral, este nuevo grupo está representado en la Figura 5 con el nombre de Final (Nótese que sólo dos vieron incrementada su vida a fatiga).

Puede observarse claramente en la Figura 5, que en el planteamiento hecho se observaría una

expansión del intervalo de probabilidad de falla, con disminución del número de ciclos para 1 % de probabilidad de falla respecto al grupo de probetas inicial, debido a que el ciclaje inicial superó el umbral de daño acumulado por fatiga.

Finalmente, se observa con los resultados mostrados, que el tratamiento de normalizado influye en el comportamiento a fatiga del material con un ciclaje acumulado, observándose que para las muestras con ciclaje acumulado menor al correspondiente a Pf de 1 %, la repuesta del material normalizado es favorable, ya que los puntos que representan este daño en la gráfica, fueron desplazados hacia una zona de mayor número de ciclos por encima de la del intervalo de referencia. Sin embargo, este comportamiento no puede aseverarse en su totalidad, pudiéndose atribuir también a la elevada dispersión obtenida en los resultados.

4. Conclusiones

El tratamiento térmico de normalizado aplicado al acero 1045 con ciclaje acumulado, influye en el aumento del número de ciclos para la probabilidad de fractura de 1 % traduciéndose en una ganancia en la vida a la fatiga.

El producido por el T.T. Normalizado en un acero AISI 1045 sobre el daño acumulado antes de la iniciación de grieta utilizando método de Maening en un ensayo de fatiga por Flexión rotativo con ciclaje menor correspondiente a la probabilidad de fractura de 1 % (PF) es favorable.

Los intervalos de probabilidad de falla 1 % se expandieron luego de haber sido sometido a la condición de carga durante un número de ciclos determinado en comparación al grupo de control, lo cual puede sugerir un umbral para la reversión del daño por fatiga alrededor de la probabilidad de falla 1 %.

En cuanto al límite superior del intervalo de probabilidad de fractura del 99 % aumentaron también reforzando la suposición de la posibilidad de revertir el daño acumulado por fatiga y de la existencia de un umbral del cual el daño sea irreversible.

Referencias

- [1] A Palmgren. Die lebensdauer von kugellagern. *Veifahrenstechnik, Berlin*, 68(14):339–341, 1924.
- [2] W. W. Maennig. *ASM Handbook. Fatigue and fracture*, volume 19, chapter Planning and Evaluation of Fatigue Tests, pages 303–313. ASM International, 1976.
- [3] Jürgen Jahn and Wolfgang-Werner Maennig. Safe evaluation of fatigue data in the range of finite endurance. *International journal of fatigue*, 19(4):335–344, 1997.
- [4] ASTM E-08(2004), E-08 Standard test methods for tension testing of metallic materials, 2012.
- [5] ASTM E-606(2012), E-606 Standard practice for strain-controlled fatigue testing, 2012.
- [6] W. W. Maennig. Planning and evaluation of fatigue tests. *ASM International, Member/Customer Service Center, Materials Park, OH 44073-0002, USA, 1996.*, pages 303–313, 1996.
- [7] A. Monsalve, N. Valencia, M. Páez y Y. Sepúlveda. Evaluación a fatiga rotatoria de aluminio 2024-t3. *Anales de Mec. de la Fractura*, 20:450–455, 2003.
- [8] Marirey Marín, Argel Porrello, Carlos Alfonso y Sandra Cabello-Sequera. Determinación de la curva snp a través del método Maennig para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado. *Revista Ingeniería UC*, 21(3):38–44, 2014.

Performance on construction operations

Genesis A. Hernández C., Dayana A. Morales P., Francisco Soto*

Departamento de Estructuras, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela.

Abstract.-

The objective of this research was to evaluate the yields in construction operations based on the taking of probabilistic times of execution of the tasks that compose these operations and their analysis with a manual simulation. To achieve this objective, three construction operations were studied, corresponding to formwork of columns, casting of concrete with hopper in columns and casting of concrete in ribbed slabs. The execution times of the tasks that compose each operation were measured and then statistically analyzed by goodness-of-fit tests by the Chi-Square and Kolmogorov-Smirnov techniques, thus identifying which of the typical frequency distributions best fit the Times of each task. These are the Normal, Exponential, Lognormal, Beta and Uniform Distribution. The statistical parameters of the adjusted distributions to each task were then determined and from there can be generated random times that allow to perform simulations of the construction operations and to study the yields of each one as a very important tool for the planning and administration of construction operations.

Keywords: construction operations; simulation; random times; cyclical construction activities.

Análisis de rendimientos en operaciones de construcción

Resumen.-

El objetivo de esta investigación fue evaluar los rendimientos en operaciones de construcción tomando como base la toma de tiempos probabilísticos de ejecución de las tareas que componen dichas operaciones y su análisis con una simulación manual. Para lograr esta objetivo se estudiaron tres operaciones de construcción que corresponden a encofrado de columnas, vaciado de concreto con tolva en columnas y vaciado de concreto en losas nervadas. Se midieron los tiempos de ejecución de las tareas que componen cada operación y luego se analizaron estadísticamente mediante pruebas de bondad de ajuste por las técnicas de Chi Cuadrado y Kolmogorov-Smirnov, y así identificar a cuál de las distribuciones de frecuencia típicas se ajustan mejor los tiempos de cada tarea. Estas son la Distribución Normal, Exponencial, Lognormal, Beta y Uniforme. Se determinaron entonces los parámetros estadísticos de las distribuciones ajustadas a cada tarea y de allí se pueden generar tiempos aleatorios que permitan realizar simulaciones de las operaciones de construcción y estudiar los rendimientos de cada una como una herramienta muy importante para la planificación y administración de obras.

Palabras clave: operaciones de construcción; simulación; tiempos aleatorios; actividades de construcción cíclicas.

Recibido: junio 2016

Aceptado: febrero 2017

1. Introducción

La administración de una obra de construcción es un factor predominante en su desarrollo; y

a su vez, la planificación de las operaciones de campo representa una herramienta útil que permite al ingeniero civil llevar a cabo correctamente los planes de trabajo y el análisis del rendimiento más confiable de los recursos [1]. Es por esto que se hace necesario que el Ingeniero cuente con métodos que le permitan realizar la planificación de campo de una manera eficiente, donde los

* Autor para correspondencia

Correo-e: fjsoto@uc.edu.ve (Francisco Soto)

datos que utilice sean realistas y pueda llevar a cabo simulaciones de las distintas operaciones de construcción a desarrollar en cada obra, así podrá obtener un aprovechamiento óptimo de los recursos, evitar atrasos en las actividades, prever imprevistos que puedan generarse y estimar correctamente la relación de rendimientos y costos en el uso de los recursos.

El ingeniero civil cuenta con modelos de uso general para realizar los análisis de precios unitarios y la planificación y control de la obra de manera general, pero pocos modelos permiten determinar el rendimiento de cada operación de construcción el cual es un factor clave en función a las condiciones particulares de cada obra, de tal manera que una variación del rendimiento estimado producirá distorsiones significativas en los costos, presupuestos y rentabilidad de la misma [1]. Una herramienta para el control y gerencia de las operaciones de construcción es el sistema CYCLONE (Cyclic Operations Network System), el cual bajo su metodología de simulación de operaciones cíclicas de construcción, permite realizar un análisis completo del rendimiento de las actividades de construcción, basado en los tiempos probabilísticos de ejecución de las tareas en el entorno real de la obra [2].

En esta investigación se midieron los tiempos de ejecución de operaciones típicas en la construcción de edificios tales como: encofrar columnas, vaciar el concreto en columnas y vaciar el concreto en las losas nervadas de cada piso las cuales son actividades repetitivas que se ejecutan en cada nivel y consumen una importante cantidad de recursos en mano de obra, materiales y equipos. Si estas actividades se desarrollan de manera inadecuada se producen retrasos y dispersión de estos recursos, trayendo como consecuencia costos adicionales no previstos y retrasos en la ejecución. Tradicionalmente se piensa que estas operaciones son diseñadas por los gerentes de campo de manera repetitiva y por costumbre, pero pocas veces se analiza la dinámica de las mismas para poder optimizarlas. Una vez que se midieron los tiempos de ejecución de las tareas que componen cada una de estas operaciones de construcción se le realizaron pruebas de bondad de ajuste conocidas

como la prueba de Chi-Cuadrado y Kolmogorov-Smirnof que sirven para determinar el mejor ajuste de una cantidad de datos observados a distribuciones de probabilidad seleccionadas para su análisis estadístico y así finalmente obtener los verdaderos rendimientos de los recursos, en las tareas y actividades de construcción en la obra.

2. Desarrollo de la investigación

2.1. Metodología de la investigación

La recolección de datos para procesarlos estadísticamente se realizó en dos obras de construcción de tipo residencial en la ciudad de Valencia, Edo. Carabobo, una de 10 niveles y la otra de 23 niveles con dos sótanos, de sistemas estructurales aporticados de concreto armado, conformados por columnas, vigas y losas nervadas, utilizando encofrados de madera y metálicos.

Se realizaron las observaciones, toma de los tiempos y registros en el momento de realización de las operaciones de construcción, para tener una información apropiada de los resultados obtenidos. De la investigación se pudieron determinar las distribuciones de probabilidad de mejor ajuste en los tiempos de ejecución de las tareas de encofrado de columnas, vaciado de concreto en columnas y vaciado de concreto en losas nervadas a nivel de entresijos y así calcular los rendimientos y confiabilidad del proceso de investigación sobre las actividades seleccionadas [3].

La investigación se divide en fases que van desde la especificación de cada tarea y la toma de tiempos en campo hasta el procesamiento estadístico de los datos para posteriormente simular las operaciones de construcción.

2.2. Fases de la investigación

Fase 1. Identificación de actividades cíclicas en la obra.

Se seleccionaron las operaciones de construcción con mayor continuidad y repetitividad en la obra, para así garantizar una cantidad suficiente de mediciones, y estas a su vez se dividieron en las tareas fundamentales de ejecución de cada una [2].

Fase 2. Medición de los tiempos de las tareas de cada actividad.

Luego de seleccionar las operaciones de construcción, e identificar cada tarea de la misma, se establece la secuencia de trabajo y se realiza la toma y registro de tiempos.

Fase 3. Realización de la Prueba de Bondad de Ajuste a cada tarea.

La prueba de bondad de ajuste se condiciona en esta investigación por el tamaño de la muestra seleccionada (N). Para $N < 50$ el ajuste se realiza por la Prueba Kolmogorov-Smirnov, y para $N \geq 50$ se ajustan por la prueba Chi Cuadrado, como condicionantes de ambos métodos.

En ambas pruebas, se calculan los parámetros estadísticos básicos: Media (μ), Desviación Estándar (σ) y Moda; adicionalmente el valor mínimo y máximo de la muestra [4].

Fase 4. Simulación de las actividades de construcción.

Una vez realizada la prueba de bondad de ajuste a cada tarea y comprobada la hipótesis nula, se pueden generar tiempos de ejecución de las tareas ajustados a la mejor distribución de probabilidad [5], y así para la distribución Normal los tiempos aleatorios se determinan mediante el Método Directo, mientras que en las distribuciones Exponencial, Lognormal, Beta, Triangular y Uniforme se aplica el Método de la Transformada Inversa [6].

3. Resultados

3.1. Análisis estadístico de las tareas por el método Chi Cadrado

Fase I. siguiendo la metodología propuesta se procede primero a identificar las tareas que componen la operación de construcción seleccionada. En esta caso se muestra la operación de vaciado de concreto en losas nervadas de entrepiso que se compone de seis tareas: Descargar el concreto en la Tolva, elevar la Tolva hasta el piso del vaciado, desplazarla horizontalmente hasta el lugar donde espera la cuadrilla de vaciado, abrir la tolva y descargarla, regresar horizontalmente y luego bajar la tolva hasta el camión.

Fase 2. se miden los tiempos de ejecución de las Tareas. Se presenta como ejemplo la tarea: Llenar la tolva

Estos tiempos se toman a pie de obra con la llegada de cada camión y se ordenan de menor a mayor para proceder a la fase siguiente que es la de calcular los estadísticos representativos de la muestra.

Fase 3. Siguiendo el orden de la metodología se obtienen los parámetros estadísticos para realizar la prueba de bondad y ajuste, en este caso por Chi-cuadrado como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Parámetros estadísticos calculados a partir de los tiempos tomados en obra.

Tamaño de la muestra (N)	80
Media (μ)	19,8
Desviación estándar (σ)	10,86
Número de intervalos de clase (NIC)	7
Rango de intervalos	71
Amplitud de intervalos (A)	10
Varianza (S^2)	117,93
Moda de la muestra	14
Valor máximo de la muestra	81
Valor mínimo de la muestra	10

Se ordenan los tiempos por Intervalos de Clase como se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Frecuencias de los datos a partir de los intervalos creados.

Intervalos		P_m	f_{ob}	f_r	f_{racum}
LI	LS				
10	20	15	55	0,69	0,69
20	30	25	16	0,2	0,89
30	40	35	4	0,05	0,94
40	50	45	3	0,04	0,98
50	60	55	0	0	0,98
60	70	65	1	0,01	0,99
70	81	75,5	1	0,01	1

El único cálculo intermedio que se tiene que realizar antes de la prueba de Bondad y Ajuste está relacionado con la Distribución Lognormal, ya que se debe calcular el Logaritmo Natural de los tiempos observados.

Se realizan las pruebas de bondad y ajuste por Chi-cuadrado para cada distribución seleccionada,

empezando con la Distribución Normal, como se muestra en la Tabla 3 como ejemplo.

Tabla 3: Análisis estadístico aplicado a la Distribución Normal mediante el ajuste por χ^2 .

Prueba de Bondad de Ajuste χ^2 a la Distribución Normal								
LI	LS	P_s	P_i	F_{esp}	F_{esp_c}	F_{obs}	F_{obs_c}	W
0,00	10,00	0,51	0,51	40,44	40,44	55	55	5,24
10,00	20,00	0,83	0,32	25,56	25,56	16	16	3,58
20,00	30,00	0,97	0,14	11,46	11,46	4	4	4,85
30,00	40,00	1,00	0,03	2,32	2,32	3	3	0,20
40,00	50,00	1,00	0,00	0,21	0,21	0	0	0,21
50,00	60,00	1,00	0,00	0,01	0,01	1	1	114,70
60,00	136,57	1,00	0,00	0,00	0,00	1	1	6476,09
$\chi^2 = 6604,87$								
Rechazar $\chi^2_{4;0,95} = 9,49$								

LI: Límite inferior del intervalo LS: Límite superior del intervalo
 P_s : Probabilidad Superior P_i : Probabilidad del Intervalo
 F_{esp} : Frecuencia Esperada F_{esp_c} : Frecuencia Esperada corregida
 F_{obs} : Frecuencia observada F_{obs_c} : Frecuencia observada corregida
 W: $(F_{obs} - F_{esp})^2 / F_{esp}$

La prueba de bondad de ajuste Chi cuadrado es aplicada para la misma tarea, en las distribuciones exponencial, lognormal, beta, triangular y uniforme, generando tablas similares a la Tabla 3 donde es aceptada o rechazada la hipótesis nula.

Una vez realizada la prueba a todas las distribuciones seleccionadas se presenta un resumen de los cálculos realizados en la Tabla 4 y se verifica que la Distribución de Probabilidades que mejor se ajusta por la técnica de Chi-cuadrado a la Tarea de descargar la Tolva en la Distribución Exponencial

Tabla 4: Resumen del resultado de la Hipótesis Nula de cada distribución aplicando la prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado.

Distribución	Hipótesis Nula	% de Ajuste
Normal	RECHAZAR	
Exponencial	ACEPTAR	41,98
Lognormal	RECHAZAR	
Beta	RECHAZAR	
Triangular	RECHAZAR	
Uniforme	RECHAZAR	
Los datos se ajustan a una distribución		Exponencial
Parámetros	μ (seg)	19,85
	σ (seg)	10,86

Cuando la hipótesis nula se acepta, es porque el Chi-Cuadrado estadístico es igual o menor que el Chi-Cuadrado crítico, $\chi^2 \leq \chi^2(\alpha, gl)$,

Donde:

$\alpha=1$ - %Confiability

gl: Grados de libertad = NIC – k -1

k: cantidad de parámetros utilizados por la distribución probabilística.

Es decir, la hipótesis nula se puede aceptar con un ajuste perfecto cuando $\chi^2=0$, y un ajuste imperfecto si $\chi^2 = \chi^2(\alpha,gl)$. Por tal motivo se calcula el porcentaje de ajuste con la Ecuación (1),

$$\%_{ajuste} = \left[\frac{\chi^2_{(\alpha,gl)} - \chi^2}{\chi^2_{(\alpha,gl)}} \right] 100 \tag{1}$$

Si los datos se ajustan a más de una distribución, se escoge aquella que tenga mayor porcentaje de ajuste.

Se repiten los cálculos para cada distribución de probabilidades y se presentan en la Tabla 5 los resultados obtenidos por la prueba de bondad de ajuste Chi-Cuadrado para la Operación de construcción Vaciado de Concreto en losas Nervadas por piso dividida en sus 6 tareas fundamentales.

Tabla 5: Resultados de la Prueba de Bondad y Ajuste por la metodología de Chi-Cuadrado para las tareas de la Operación de Vaciado de losas nervadas por piso.

Tarea	Piso 3 N = 80	Piso 13 N = 54	Piso 14 N = 58
(1)	Exponencial $\mu = 19,85$ $\sigma = 10,86$	Normal $\mu = 23,22$ $\sigma = 4,62$	Normal $\mu = 21,08$ $\sigma = 3,90$
	Normal $\mu = 16,56$ $\sigma = 3,48$	Normal $\mu = 45,67$ $\sigma = 3,59$	Normal $\mu = 53,71$ $\sigma = 4,52$
(3)	Normal $\mu = 22,48$ $\sigma = 8,84$	No se ajusta $\mu = 33,57$ $\sigma = 13,98$	Normal $\mu = 34,54$ $\sigma = 13,34$
	Normal $\mu = 10,01$ $\sigma = 2,71$	No se ajusta $\mu = 13,35$ $\sigma = 4,29$	Exponencial $\mu = 17,52$ $\sigma = 14,22$
(5)	Normal $\mu = 14,79$ $\sigma = 5,72$	Normal $\mu = 24,09$ $\sigma = 7,81$	Normal $\mu = 24,23$ $\sigma = 10,32$
	Normal $\mu = 18,85$ $\sigma = 4,86$	No se ajusta $\mu = 48,62$ $\sigma = 4,50$	Normal $\mu = 55,06$ $\sigma = 3,81$

(1) Llenar la tolva (2) Subir la tolva
 (3) Desplazar la tolva (4) Vaciar la tolva
 (5) Regresar la tolva (5) Bajar la tolva

La prueba de bondad de ajuste Chi Cuadrado se aplicó a aquellas actividades cuyo tamaño de muestra fue mayor o igual a 50.

Antes de pasar a la Fase 4, se muestra el análisis de Bondad de ajuste por el método de Kolmogorov-Smirnof para la actividad de vaciar el concreto en columnas del piso 11, como ejemplo de aplicación de las dos técnicas

3.2. Análisis estadístico de las tareas por el método KolmogorovSmirnof

Fase 1. Nuevamente y bajo la metodología propuesta se identifican la tareas que componen la operación de construcción vaciar concreto en columnas: llenar la Tolva, subir la tolva, subir al obrero, esto se realiza para que pueda abrir la tolva y descargar, descargar la tolva, bajar al obrero y finalmente bajar la tolva.

Fase 2. Se miden los tiempos de ejecución de la tarea llenar la tolva para calcular sus estadísticos representativos.

Fase 3. Siguiendo el orden de la metodología se obtienen los parámetros estadísticos para realizar la prueba de bondad y ajuste, en este caso por Kolmogorov-Smirnof y se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Parámetros estadísticos calculados a partir de los datos observados en la toma de tiempos.

Tamaño de la muestra (N)	21
Media (μ)	20,48
Desviación estándar (σ)	6,80
Número de intervalos de clase (NIC)	5
Rango de intervalos	30
Amplitud de intervalos (A)	6
Varianza (S^2)	46,26
Moda de la muestra	18
Valor máximo de la muestra	44
Valor mínimo de la muestra	14

Igualmente y siguiendo la metodología propuesta se realiza el análisis estadístico para la Distribución Normal como se muestra en la Tabla 7

La prueba de bondad de ajuste KolmogorovSmirnof es aplicada para la misma tarea, de igual manera, para las distribuciones exponencial, lognormal, beta, triangular y uniforme, generando la Tabla 8, donde es aceptada o rechazada la hipótesis nula para cada distribución.

Tabla 7: Análisis estadístico aplicado a la Distribución Normal mediante el ajuste por Kolmogorov-Smirnof (K-S).

Parámetros				Hipótesis Nula (Ho)	
μ	20,48	n	%C	α	ACEPTAR
σ	6,8	21	95	0,05	ACEPTAR
Prueba de Bondad de Ajuste K-S a la Distribución Normal					
i	Xi	FDA	FDE	D+	D-
1	14	0,17	0,05	0,12	0,17
2	15	0,21	0,1	0,11	0,16
3	15	0,21	0,14	0,07	0,11
4	15	0,21	0,19	0,02	0,07
5	15	0,21	0,24	0,03	0,02
6	16	0,26	0,29	0,03	0,02
7	17	0,3	0,33	0,03	0,02
8	18	0,36	0,38	0,02	0,02
9	18	0,36	0,43	0,07	0,02
10	18	0,36	0,48	0,12	0,07
11	18	0,36	0,52	0,17	0,12
12	18	0,36	0,57	0,21	0,17
13	21	0,53	0,62	0,09	0,04
14	22	0,59	0,67	0,08	0,03
15	22	0,59	0,71	0,13	0,08
16	23	0,64	0,76	0,12	0,07
17	23	0,64	0,81	0,16	0,12
18	23	0,64	0,86	0,21	0,16
19	24	0,7	0,9	0,21	0,16
20	31	0,94	0,95	0,01	0,03
21	44	1	1	0	0,05

Tabla 8: Resumen del resultado de la hipótesis nula obtenida al aplicar la prueba K-S a cada distribución, además de un porcentaje de ajuste basado en el mismo análisis realizado en el análisis estadístico de las tareas por el método Chi Cuadrado.

Distribución	Hipótesis Nula	% de Ajuste
Normal	ACEPTAR	25,58
Exponencial	RECHAZAR	
Lognormal	ACEPTAR	29,86
Beta	RECHAZAR	
Triangular	RECHAZAR	
Uniforme	RECHAZAR	
Los datos se ajustan a una distribución		Lognormal
Parámetros		μ (seg)
		2,98
		σ (seg)
		0,27

Se repiten los cálculos para cada distribución de probabilidades y para cada tarea de la operación y se presentan en la Tabla 9 los resultados obtenidos por la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnof para la Operación de construcción: Vaciado de Columnas por piso dividido en sus 6 tareas fundamentales.

Tabla 9: Resultados de la operación de Vaciado de concreto con tolva en columnas.

Tarea	Piso 3 N = 80	Piso 13 N = 54	Piso 14 N = 58
(1)	LOGNORMAL $\mu = 2,98$ $\sigma = 0,27$	NORMAL $\mu = 24,05$ $\sigma = 4,98$	LOGNORMAL $\mu = 3,01$ $\sigma = 0,24$
(2)	LOGNORMAL $\mu = 4,08$ $\sigma = 0,14$	NORMAL $\mu = 56,38$ $\sigma = 6,46$	LOGNORMAL $\mu = 4,22$ $\sigma = 0,11$
(3)	LOGNORMAL $\mu = 3,80$ $\sigma = 0,26$	LOGNORMAL $\mu = 4,08$ $\sigma = 0,31$	LOGNORMAL $\mu = 3,79$ $\sigma = 0,28$
(4)	LOGNORMAL $\mu = 2,91$ $\sigma = 0,27$	LOGNORMAL $\mu = 3,03$ $\sigma = 0,36$	LOGNORMAL $\mu = 2,74$ $\sigma = 0,30$
(5)	LOGNORMAL $\mu = 2,79$ $\sigma = 0,30$	NORMAL $\mu = 21,00$ $\sigma = 4,67$	LOGNORMAL $\mu = 3,15$ $\sigma = 0,30$
(6)	LOGNORMAL $\mu = 4,12$ $\sigma = 0,09$	NORMAL $\mu = 65,29$ $\sigma = 10,12$	NORMAL $\mu = 61,54$ $\sigma = 7,99$
(1) Llenar la tolva	(2) Subir la tolva		
(3) Subir obrero	(4) Vaciar la tolva		
(5) Bajar obrero	(6) Bajar la tolva		

3.3. La última Fase de la metodología consiste en la generación de tiempos aleatorios no uniformes de las distribuciones de mejor ajuste a la muestra de los tiempos

Se toma como ejemplo para la generación de tiempos aleatorios la tarea de Colocación del primer tablero de la operación de construcción: Encofrado de Columnas y la Distribución a la que se ajustaron los datos se muestra en la Tabla 10.

Tabla 10: Tipo de distribución a la que se ajustaron los datos con sus parámetros estadísticos.

Parámetros Estadísticos	Tipo de Distribución
μ (seg)	5,02
σ (seg)	0,29
	Lognormal

A partir de estos datos estadísticos se generaron un conjunto de números aleatorios utilizando el programa Excel y como esta tarea se ajusta a una distribución Lognormal, el método correspondiente es el Método de la Transformada inversa, para realizar la generación de los tiempos aleatorios [5].

El formato de Excel para esto es:
DIST.LOG.INV(probabilidad;media;desv_estándar)

Donde la probabilidad, es el número aleatorio generado, y la media y desv_estándar son los parámetros estadísticos de la distribución a la que se ajusta la tarea.

Una vez que se pueden generar estos tiempos aleatorios entonces se puede realizar la simulación de cualquier operación de construcción para medir estadísticamente los rendimientos de las tareas y los posibles conflictos por asignación de los recursos.

4. Conclusiones

La generación de los tiempos aleatorios, completa el estudio de las actividades seleccionadas, y permiten diseñar un modelo de simulación respetando la secuencia de tareas, distribuciones de probabilidad definidas y los recursos utilizados.

En esta investigación se logra una metodología efectiva de cómo estudiar la duración de las operaciones de construcción para crear modelos bajo el sistema Cyclone y así analizar diferentes escenarios respecto a cantidad, tipo de recursos o interacciones de los mismos, y poder determinar los rendimientos más efectivos mediante la simulación de estas operaciones.

La simulación de procesos constructivos puede aplicarse como una herramienta para la gestión del conocimiento en construcción, ya que se pueden generar modelos de procesos constructivos con datos actuales y analizados con una herramienta simple como la estadística, y pueden ser desarrollados en proyectos futuros, tomando en consideración las variables propias del entorno de cada obra que se analice.

Reconocimiento

Este artículo fue seleccionado por la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, como uno de los mejores Trabajos Especiales de Grado del año 2016.

Referencias

- [1] Francisco Soto. Administración de obras. Trabajo de Ascenso, Escuela de Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2016.

- [2] Daniel Halpin. *MicroCYCLONE. User's manual for constructions operations. Version 2.5.* Learning Systems, Inc., 1992.
- [3] Douglas C. Montgomery y George C. Runger. *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería.* McGraw Hill, 1996.
- [4] Ninoska Maneiro y Agustín Mejías. *Estadística para ingeniería: una herramienta para la gestión de la calidad.* Dirección de Medios y Publicaciones, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2010.
- [5] Mariangel Romero. *Evaluación estadística de los rendimientos de actividades de construcción del urbanismo.* Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2006.
- [6] Dayana Abreu y Miguel Dakak. *Metodología para la simulación de operaciones de construcción.* Trabajo Especial de Grado, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Venezuela, 2007.

A cooperative method for image segmentation based on cellular automata

Jorge Parra, Niriaska Perozo*

Unidad de Investigación en Inteligencia Artificial, Decanato de Ciencias y Tecnología, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado, Barquisimeto 3001-Venezuela.

Abstract.-

A very important stage in the artificial vision process consists in segmenting images for extracting data of interest and reducing their complexity and processing time. A simple way to segment an image is by edge detection. In this paper, a cooperative method based on cellular automata is proposed for detecting edges in images, where cells compare neighboring RGB components to determine the existence of edges. In this sense, an application was implemented using the object-oriented paradigm and tests were performed to compare the segmentation's quality achieved by the proposed method, yielding better results in more scenarios than other existing edges detection methods.

Keywords: Computer vision; image segmentation; edge detection; cellular automata.

Un método cooperativo para la segmentación de imágenes basado en autómatas celulares

Resumen.-

Una fase muy importante para el proceso de visión artificial es la segmentación de las imágenes, debido a que en esta fase se puede reducir la cantidad de datos de la imagen y obtener sólo los datos de mayor interés acerca de los objetos que la componen, lo que permite disminuir la complejidad de la imagen y el tiempo de cómputo para su procesamiento. Una manera sencilla de segmentar una imagen es mediante el proceso de detección de bordes. En el presente trabajo, se propone un método cooperativo para detectar bordes en imágenes basándose en autómatas celulares, en el que las células comparan los componentes RGB de la vecindad cooperando entre ellas para determinar si existen bordes. En este sentido, se implementó una aplicación utilizando el paradigma orientado a objetos, con la que se realizaron pruebas para comparar la calidad de segmentación lograda por el método propuesto, mostrando en la mayoría de los escenarios mejores resultados que los obtenidos con otros métodos de detección de bordes.

Palabras clave: visión artificial; segmentación de imágenes; detección de bordes; autómata celular.

Recibido: noviembre 2015

Aceptado: febrero 2017

1. Introducción

La detección de bordes es el primer paso en la segmentación de imágenes: un método que

se utiliza para determinar la composición de una imagen. Los bordes de una imagen suelen contener mucha información sobre la imagen y describen dónde se encuentran los objetos, sus formas y tamaños, e información sobre su textura. El estudio de los bordes se ha convertido en una tarea muy importante en el procesamiento de imágenes médicas o biológicas, ya que se puede reducir significativamente la cantidad de

*Autor para correspondencia

Correo-e: nperozo@ucla.edu.ve (Niriaska Perozo)

datos de una imagen, filtrar la información inútil y preservar las características importantes de la misma, lo que permite acelerar su procesamiento. En base a esto, en el presente trabajo se propone la implementación de un método para la segmentación de imágenes basado en autómatas celulares, que se puede utilizar para mejorar el proceso de visión artificial. Específicamente, este método permite la detección de bordes en las imágenes, ya que las células del autómata pueden determinar cooperativamente junto con las células vecinas cambios en las tonalidades de color, comparando los componentes RGB de la imagen con respecto a un umbral de reconocimiento establecido. Este umbral puede ser ajustado para obtener una mejor calidad de detección de los bordes en las imágenes analizadas, según se verificó en los diferentes escenarios de prueba planteados.

2. Trabajos Relacionados

A continuación, se presentan algunos trabajos donde se implementan sistemas de visión artificial utilizando autómatas celulares.

Pritan et al [1] proponen el diseño y desarrollo de una aplicación para el procesamiento de imágenes basado en una unidad de procesamiento de gráficos (GPU, *Graphics Processing Unit* en inglés) en lugar de utilizar una unidad central de procesamiento (CPU, *Central Processing Unit* en inglés), para alcanzar un gran incremento en la velocidad del procesamiento de imágenes. Adicionalmente para aprovechar la memoria gráfica del computador utilizan una arquitectura unificada de dispositivos de cómputo (CUDA, *Compute Unified Device Architecture* en inglés), el lenguaje C++, principios de ingeniería de software, patrones de diseño y Qt Framework. De acuerdo con este planteamiento podemos ver que un problema frecuente en el procesamiento de las imágenes es la velocidad, y que los autores intentan dar una solución a nivel de hardware. El método propuesto en esta investigación trata de dar una solución a nivel de software basado en los autómatas celulares, ya que estos poseen una gran rapidez al momento de realizar operaciones de cómputo según [2].

En [3], Cifuentes y colaboradores proponen una técnica para la segmentación de imágenes digitales por textura operando sobre una rejilla de píxeles, basándose en el método de Lattice-Boltzmann, un autómata celular que representa el estado de cada celda (pixel) con 9 escalares que representan poblaciones de partículas transportándose entre celdas vecinas. La población de partículas por celda viene definida por una función de densidad que define la probabilidad de que las partículas se transporten a una dirección específica, representando una regla de evolución del estado de la celda. A través de la experimentación con texturas en imágenes sintéticas y naturales, lograron alcanzar una calidad de segmentación entre 85 % y 95 % .

De forma similar, en [4] se presenta un método para segmentar imágenes satelitales generadas por el sensor de un radar de apertura sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar* en inglés), para ello proponen un algoritmo, el cual combina la información sobre la intensidad y la entrada de la textura de la imagen a través del aprendizaje de los autómatas celulares. Para la detección de bordes, las celdas del autómata deben calcular la distancia euclídeana entre los componentes RGB de cada uno de los píxeles de color y de todos sus vecinos. El estudio demostró que con la realización de dos segmentaciones, una simple y otra compleja, se puede utilizar el autómata celular para adaptar su comportamiento al entorno, modelando un comportamiento asociado a la textura. En el método propuesto en esta investigación, a diferencia del método antes descrito, se determina la distancia de cada uno de los componentes RGB por separado, y cada uno es comparado con un umbral diferente.

Por otro lado, en [5] y [6] los autores realizan pruebas con diferentes métodos demostrando que aquellos basados en autómatas celulares, se comportan mejor en casi todos los escenarios que otros métodos para la segmentación y detección de bordes en imágenes, entre los cuales se encuentran Priors Label, GrowCut, Watershed, el método de Otsu, el detector de bordes Prewitt, y los operadores de Sobel, Roberts y Canny. Similarmente, en el presente trabajo se realizó una comparación de los resultados obtenidos con el método planteado y los obtenidos por [5] para evaluar la efectividad

del método propuesto.

Finalmente, en [7] se presenta un método basado en autómatas celulares difusos, que aplica 32 reglas generadas por un motor de inferencia, a cada una de las células, estudiando su vecindad de 8 celdas, para determinar la pertenencia a alguno de los 3 tipos de píxeles estudiados (ruido, borde o fondo). Este método es utilizado para eliminar el ruido en las imágenes y para la detección de bordes, demostrando eficiencia en la clasificación de los píxeles de la imagen a través de las reglas difusas definidas para tal fin. A diferencia de dicho método, las células del autómata propuesto en este trabajo evalúan una vecindad de 4 celdas, y las reglas para detección de bordes que lo rigen no son generadas por un motor de inferencia, sino que dependen de los cambios en los componentes RGB de las celdas comparadas para dar un mejor tiempo de respuesta.

3. Aspectos Teóricos Relevantes

3.1. Autómatas Celulares

Un autómata celular (AC) se define según [3] como un modelo matemático para un sistema dinámico, compuesto por un conjunto de células que adquieren distintos estados o valores que son alterados de un instante a otro en intervalos regulares de tiempo.

Un AC está caracterizado por los siguientes elementos básicos:

- Arreglo regular: constituye el espacio de evolución en un plano 2D o en un espacio n -dimensional, donde cada división homogénea de arreglo es llamada célula.
 - Conjunto de estados: un conjunto finito de valores o colores, también denominado alfabeto, del que las células del arreglo toman sus valores.
 - Configuración inicial: son los valores de estado asignados inicialmente a las células del espacio inicial de evolución del sistema.
 - Vecindades: define el conjunto contiguo de células y sus posiciones relativas entre sí;
- Función local: regla de evolución que determina el comportamiento del AC. Está conformada por una célula central y sus vecindades. Define el cambio de estado de cada célula dependiendo de los estados anteriores de sus vecindades, y puede ser una expresión algebraica o un grupo de ecuaciones.

a cada vecindad diferente corresponde un elemento del conjunto de estados.

3.2. Sistema de Visión Artificial

La visión por computador comprende la obtención, caracterización e interpretación de las imágenes. En concordancia, un sistema de visión artificial está compuesto por un sensor óptico para capturar la imagen, y un computador para almacenar las imágenes y ejecutar los algoritmos de pre-procesamiento, segmentación y reconocimiento [8].

Fases de un Sistema de Visión. De acuerdo a Ortiz [8], tenemos que las fases más importantes de un sistema de visión son las siguientes:

- Captación: obtención de una imagen mediante una cámara o dispositivo de captura.
- Pre-procesamiento: aplicación de técnicas que facilitan el procesamiento posterior; incluye la reducción de ruido y realce de detalles.
- Segmentación: división de una imagen en regiones de interés.
- Descripción: caracterización y diferenciación de distintos tipos de objetos.
- Reconocimiento: identificación de objetos pertenecientes a una escena.
- Interpretación: asignación de significado a un conjunto de objetos reconocidos en una imagen.

4. Descripción del Método Propuesto

En el presente trabajo se propone inicializar cada célula del autómata con un pixel de la imagen, de tal manera que un pixel en la posición (x, y) es asignado a la célula en la posición (x, y) del autómata. Posteriormente, cada una de las células evalúa de forma simultánea su vecindad para determinar si existen bordes, de acuerdo con el algoritmo mostrado en la Figura 1.

```

si cambioColor vArrCen o vCenIzq entonces
| marcar borde;
en otro caso
| si cambioColor vArrIzq o vArrDer entonces
| | marcar borde diagonal;
| en otro caso
| | no hay borde;
| fin
fin

```

Figura 1: Algoritmo para determinar si existen bordes cada una de las células.

Cada una de las células del autómata recibe un píxel de la imagen seleccionada y evalúa, a través de los umbrales establecidos, si existe o no un borde dentro de la imagen al comparar con los píxeles de las células vecinas, asignando un color según la pertinencia y tipo de borde: si no existe un píxel asignado a la célula el color mostrado es el azul, para bordes horizontales o verticales la célula es de color negro, y gris para bordes diagonales; en caso de que no se detecte ningún borde, la célula será de color blanco (ver Figura 2).

Sin Píxel Asignado (Azul)	Borde Horizontal o Vertical (Negro)
Sin Borde Detectado (Blanco)	Borde Diagonal (Gris)

Figura 2: Colores mostrados por la célula de acuerdo a la evaluación de los píxeles.

Para evaluar la existencia de bordes en una célula, se toma en cuenta los valores RGB que tiene el píxel asignado a la célula, y se compara de acuerdo a los valores establecidos para cada umbral. Los umbrales indican la diferencia mínima que debe existir en los componentes RGB de dos células para determinar si existe o no un borde. Existen 3 umbrales diferentes, uno para cada componente RGB: el umbral R representa la

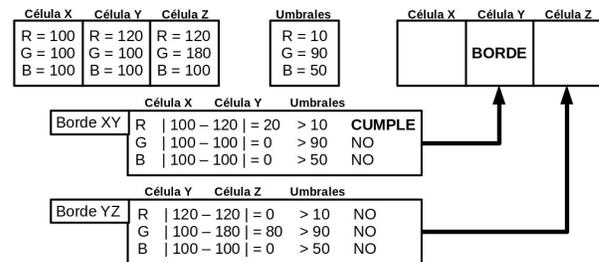


Figura 3: Detección de borde a partir de la comparación de los componentes de los píxeles evaluados.

diferencia para el componente R (red - rojo), el umbral G para el componente G (green - verde) y el umbral B para el componente B (blue - azul). Para determinar si existe o no un borde, la célula compara cada uno de los componentes RGB de su píxel con el de su célula vecina y si la diferencia entre los valores de alguno de los componentes supera el umbral para dicho componente, se determina la existencia de un borde (ver Figura 3). Un borde existe si para al menos uno de los componentes RGB entre una célula X y una célula Y se cumple la ecuación(1)

$$|A - B| \geq U \quad (1)$$

donde:

$$\begin{aligned}
 A &= \text{Célula}X_{(R,G,B)}, \\
 B &= \text{Célula}Y_{(R,G,B)} \text{ y} \\
 U &= \text{Umbral}_{(R,G,B)}
 \end{aligned}$$

La comparación se realiza tomando en cuenta para la evaluación solamente 4 células de su vecindad (ver Figura 4.a): la célula superior izquierda, la superior central, la superior derecha y la célula izquierda. Esta vecindad fue elegida debido a que al ser aplicada sobre todas las células, se obtienen las comparaciones de forma cooperativa desde las 8 direcciones posibles (ver Figura 4.b), de tal manera que no se realiza la comparación más de una vez como sucede en los métodos clásicos (ver Figura 4.c y 4.d). El algoritmo utilizado para verificar si existe un cambio de color entre una Célula X y una Célula Y es mostrado en la Figura 5.

5. Interfaz de la Aplicación

Para el desarrollo del método propuesto se implementó una aplicación basada en autómatas

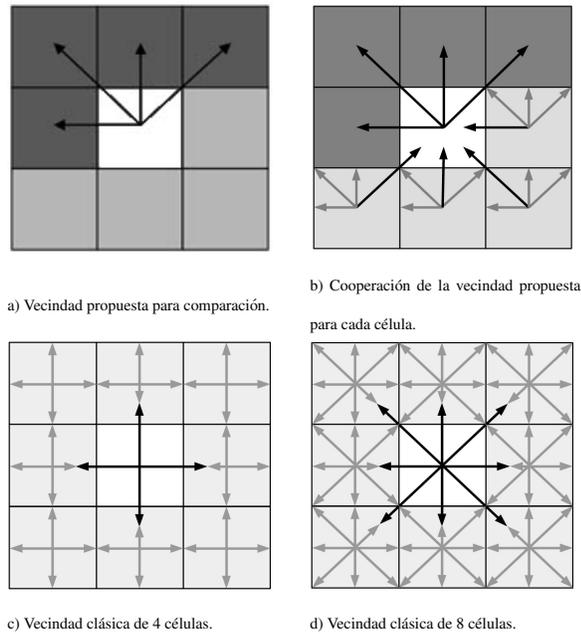


Figura 4: Vecindades.

```

Entrada: CelulaX, CelulaY
Salida: Hay cambio de color
difR = abs(CelulaX.cR - CelulaY.cR);
si difR ≥ umbralR entonces
    | devolver Verdadero
en otro caso
    | difG = abs(CelulaX.cG - CelulaY.cG);
    | si difG ≥ umbralG entonces
    | | devolver Verdadero
    | en otro caso
    | | difB = abs(CelulaX.cB - CelulaY.cB);
    | | si difB ≥ umbralB entonces
    | | | devolver Verdadero
    | | fin
    | fin
fin
devolver Falso
    
```

Figura 5: Algoritmo para verificar si existe un cambio de color entre una Célula X y una Célula Y.

celulares, para segmentar imágenes. Específicamente, cada célula del autómata debe ser capaz de leer un pixel de la imagen, evaluar su vecindad y de acuerdo con los umbrales establecidos, definir las diferentes regiones dentro de la imagen y los bordes detectados en las mismas.

La aplicación se programó con el lenguaje Java, siguiendo el paradigma orientado a objetos y definiendo una interfaz gráfica a través de la librería Swing para la selección de la imagen, la personalización del proceso de segmentación y

renderizado de la imagen.

El primer paso para el proceso de segmentación consiste en elegir la imagen que se desea segmentar, utilizando las opciones definidas en la interfaz de usuario (Figura 6). Los umbrales definidos para la evaluación de cada uno de los componentes RGB de la imagen, pueden ser modificados en cualquier momento por cada color o de manera conjunta (umbral general). Los botones de movimiento permiten cambiar la posición de la imagen con respecto al área de dibujo (canvas), es decir asigna otros píxeles a las células del autómata para observar otra región de la imagen, lo cual es útil cuando la imagen mostrada tiene grandes dimensiones.

6. Resultados Obtenidos

Para evaluar la capacidad de detección del método propuesto, se experimentó con imágenes de diferente nivel de detalle para calibrar los valores de los umbrales, analizar los tiempos de cómputo del algoritmo y determinar visualmente la calidad de la segmentación obtenida. De igual manera, se realizó una comparación de los resultados obtenidos con respecto a los proporcionados por otros métodos existentes.

6.1. Calibración inicial de umbrales

Se utilizó una imagen compuesta por círculos en los que varía sólo uno de sus componentes RGB con respecto a sus vecinos, para calibrar el valor de los umbrales (ver Figura 7).

En el primer caso, la aplicación detectó sin problema los bordes utilizando la imagen original para cada componente RGB con un umbral igual a 40. Sin embargo, al variar el umbral de alguno de los componentes, la aplicación obvia la detección de bordes entre colores con componentes comunes. Como ejemplo, para el segundo caso (umbral R=255) se evita la detección de bordes entre el rojo (255, , 0) y el negro (0, 0, 0), y entre el cyan (0, 255, 255) y el blanco (255, 255, 255); en el tercer caso (umbral B = 255), no se detecta bordes entre el azul (0, 0, 255) y el negro (0, 0, 0), y entre el amarillo (255, 255, 0) y el blanco (255, 255, 255).

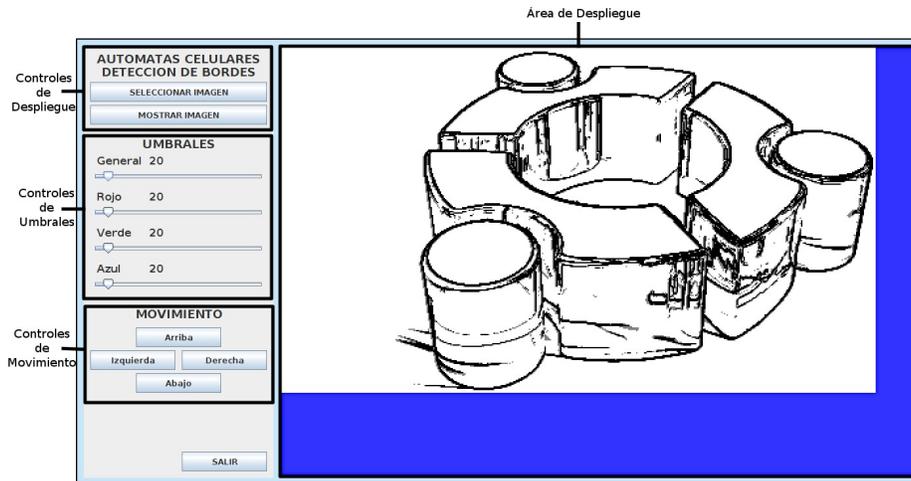
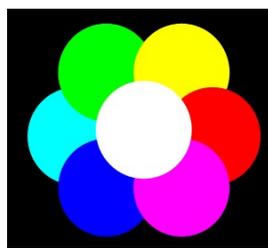
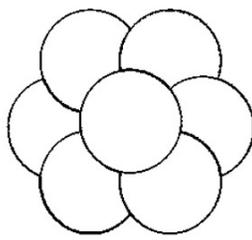


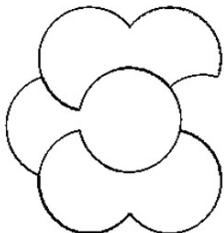
Figura 6: Vista de la Interfaz de Usuario de la Aplicación.



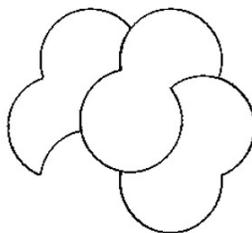
a) Original.



b) R=40, G=40 y B=40.



c) R=255, G=40 y B=40.



d) R=40, G=40 y B=255.

Figura 7: Calibración de los valores de umbrales por componentes.

6.2. Segmentación de formas sencillas

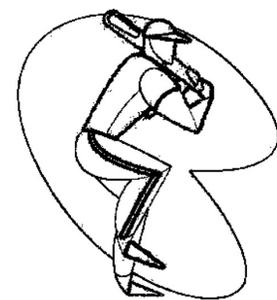
Se utilizó una imagen constituida por formas sencillas (ver Figura 8); los resultados demuestran que el autómata celular puede segmentar los bordes de figuras simples con gran precisión.

6.3. Disminución progresiva de umbrales (calibración 2)

Para evaluar la segmentación, se ejecutó una prueba en una imagen con sombras y gradiente de colores (ver Figura 9), disminuyendo progresivamente el valor de los umbrales.



a) Original.



b) R=10, G=10 y B=10.

Figura 8: Detección de bordes en figuras formadas por formas básicas.

Se experimentó con valores de umbral general igual a 60, 15 y 5 respectivamente. A través del resultado obtenido, se puede determinar que a medida que el umbral es mayor se pueden detectar bordes sólo cuando existe gran diferencia entre los componentes de los colores de la imagen, mientras que cuando el umbral es menor se detectan cambios pequeños entre los colores.

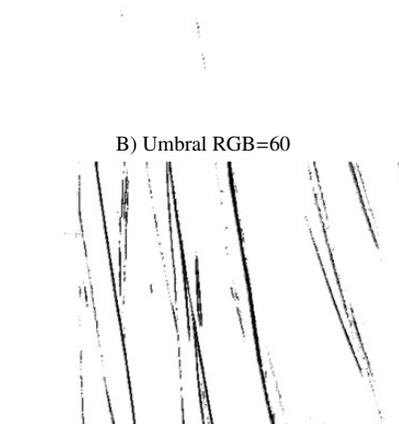
6.4. Segmentación de formas complejas

En esta sección se evaluó el reconocimiento de bordes en imágenes complejas con gran nivel de detalle (ver Figura 10). Se experimentó colocando los valores del umbral general en 2, 10 y 50 respectivamente.

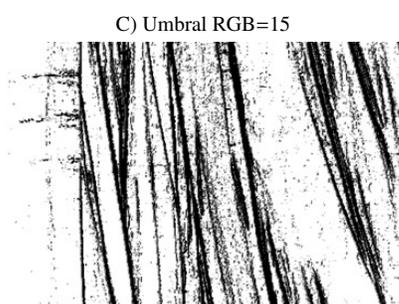
En los siguientes escenarios, se realizan comparaciones entre el método planteado en la presente investigación y los resultados obtenidos en la investigación realizada por [5], donde a su vez



A) Original



B) Umbral RGB=60



C) Umbral RGB=15



D) Umbral RGB=5

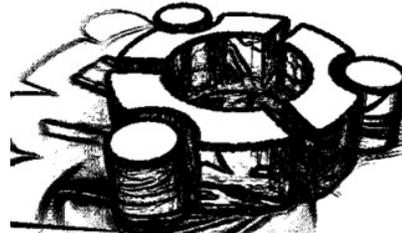
Figura 9: Detección de bordes en imagen con gradientes y sombras con umbral general igual a 60, 15 y 5.

se compara un método de detección de bordes basado en autómatas celulares con los métodos de Roberts, Prewitt, Sobel y Canny. Se adicionó a sus resultados aquellos obtenidos en este trabajo, utilizando el método planteado con autómatas celulares pero comparando los componentes RGB entre las células vecinas no más de una vez, como sucede en los métodos clásicos.

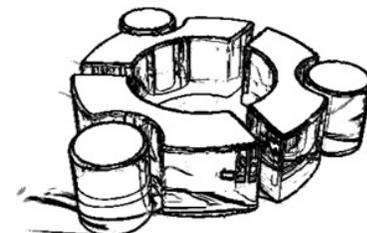
Para esta tarea, se realizaron algunos cambios al método planteado en cuanto a la presentación de la



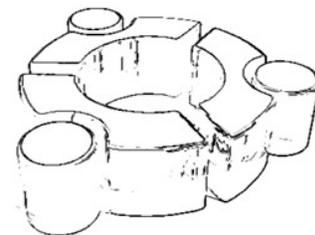
A) Original



B) Umbral RGB=2



C) Umbral RGB=10



D) Umbral RGB=50

Figura 10: Detección de bordes en imágenes con alto nivel de detalle con umbral general igual a 2, 10 y 50.

imagen segmentada para poder realizar una mejor comparación de los resultados entre los trabajos. Anteriormente se utilizaba el color negro para representar los bordes horizontal y verticalmente, gris para bordes diagonales y blanco para indicar que no se detecto ningún borde, pero en los siguientes experimentos se utilizará el color negro para indicar ausencia de bordes, gris para bordes diagonales y blanco para bordes horizontales y verticales. Sin embargo, el método para la detección de los bordes sigue el mismo procedimiento ya planteado en la sección 4 de esta investigación.

6.5. Imagen del fotógrafo, comparación de resultados

En este experimento se tomó para segmentar la imagen del fotógrafo (ver Figura 11) y comparar los resultados obtenidos con el método propuesto en este trabajo y otros métodos existentes.

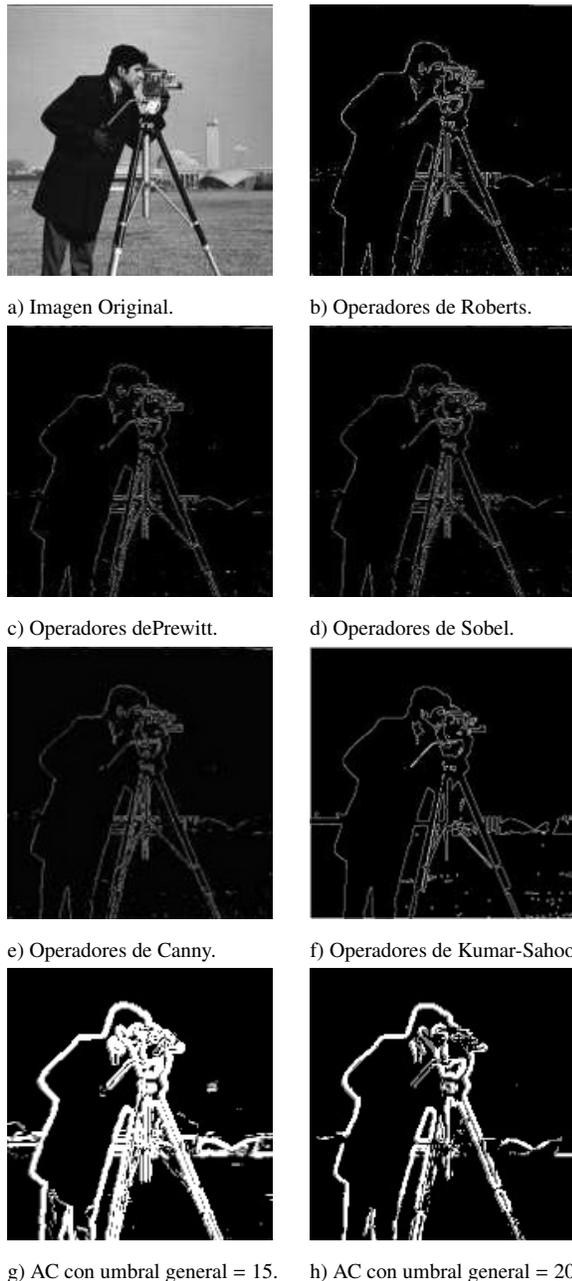


Figura 11: Resultados de detección de bordes fotógrafo.

En la segmentación obtenida se puede apreciar la figura principal a través de los bordes detectados. Además, el hecho de que los componentes

RGB cercanos a los bordes presentan una diferencia mayor al umbral permite generar bordes con un grosor mayor al de los otros métodos, lo que contribuye a una mejor segmentación de los objetos que componen la imagen; sin embargo, este grosor evita que se puedan detectar bordes en pequeños detalles de la imagen. Igualmente como en los otros trabajos, la diferencia entre los componentes de los píxeles del fondo de la imagen es muy pequeña y por tanto no se diferencian los objetos ubicados al fondo.

6.6. Imagen de Lena, comparación de resultados

Finalmente, se segmentó la imagen Lena (ver Figura 12) para comparar el comportamiento de los métodos de detección de bordes de forma similar a la sección 6.5.

A través de este escenario, se puede observar que el método propuesto define mayor número de zonas en la imagen analizada, permitiendo reconocer otros objetos que no se pueden diferenciar en los resultados obtenidos en los otros trabajos. También se puede ver que existe mayor continuidad en los bordes detectados y una mejor definición de las zonas debido al grosor de los bordes en los resultados obtenidos. Para esta comparación se aplicó nuestro método de detección de bordes utilizando 3 umbrales generales diferentes (10, 15 y 20), como se aprecia en los resultados mostrados en la Figura 12 literales (g), (h) e (i), respectivamente. En las secciones 6.5 y 6.6 se evaluaron los tiempos computacionales al ejecutar el algoritmo para la detección de bordes. Para obtener los tiempos de ejecución del algoritmo planteado se ejecutaron las pruebas en una PC con un CPU de 400 MHz y el tiempo se midió solamente sobre el algoritmo sin incluir las operaciones de entrada y salida, al igual que en la investigación realizada por [5]. La Tabla 1 y Figura 13 muestran los tiempos obtenidos por el algoritmo propuesto al evaluar las imágenes Camarógrafo (sección 6.5) y Lena (sección 6.6) con un tamaño de 256 x 256 píxeles en comparación con los de otros métodos evaluados (Roberts, Prewitt, Sobel, Canny y Kumar-Sahoo).

Del análisis realizado sobre los tiempos de cómputo, se puede destacar que los métodos en

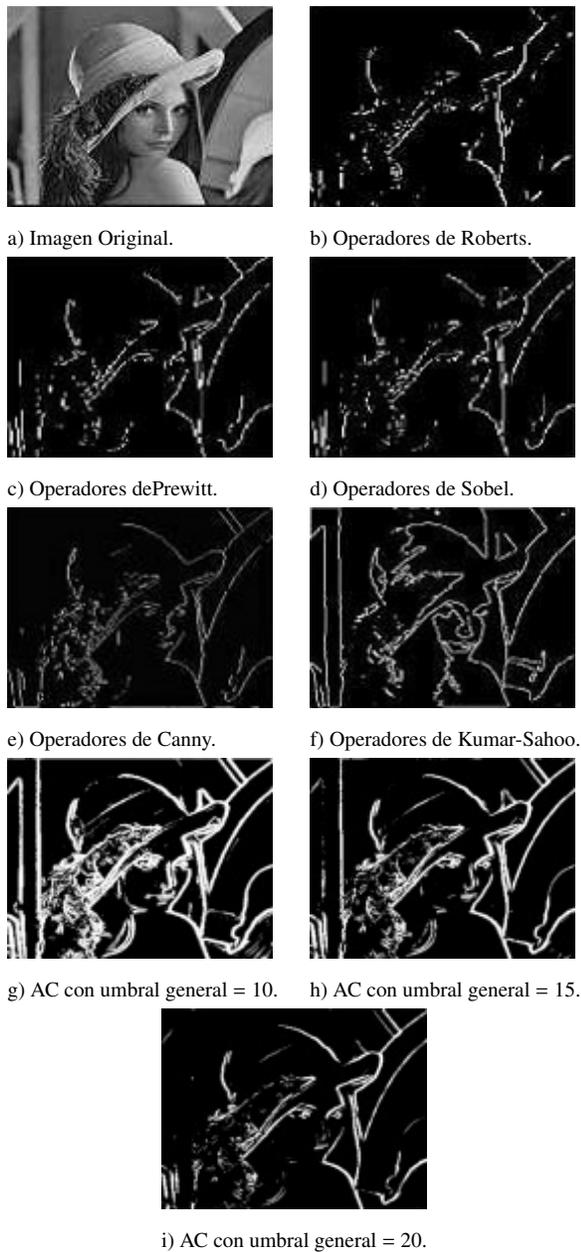


Figura 12: Resultados de detección de bordes Lena.

Tabla 1: Comparación de los tiempos de cómputo obtenidos por los métodos de detección de bordes.

	Métodos: Tiempo de Cómputo(seg)					
	Roberts	Prewitt	Sobel	Canny	Kumar-Sahoo	Método Propuesto
(1)	0.1804	0.2149	0.2306	0.2803	0.1406	0.0687
(2)	0.2006	0.2105	0.2505	0.2906	0.1506	0.0824

(1) Imagen Lena
(2) Imagen fotógrafo

los cuales se utilizan autómatas celulares (método

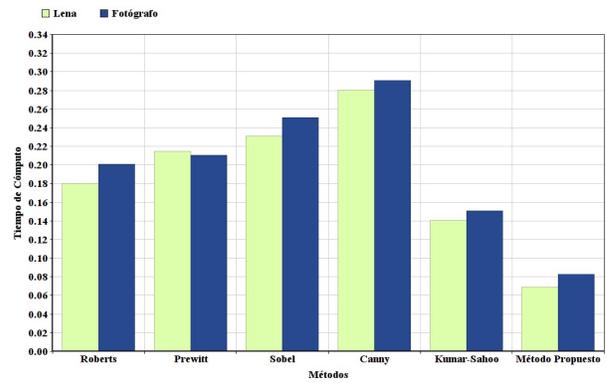


Figura 13: Gráfico comparativo de tiempos de cómputo obtenidos por los métodos de detección de bordes.

propuesto y método de Kumar-Sahoo) permiten obtener tiempos más bajos que el resto de los métodos. Sin embargo, los tiempos de cómputo obtenidos con el método propuesto son menores en un factor cercano a la mitad que los del método de Kumar-Sahoo. Esto se debe a que el trabajo cooperativo de las células vecinas en nuestra propuesta disminuye la cantidad de comparaciones realizadas por cada célula, trabajando con una vecindad formada por 4 células en lugar de 8 como lo hace el método de Kumar-Sahoo.

7. Conclusiones y trabajo futuro

El uso de autómatas celulares para la detección de bordes, es un método muy eficiente para realizar la fase de segmentación de imágenes, ya que permiten disminuir notablemente los tiempos de cálculo. Aunque se podría perder un poco el nivel de detalle, aún se sigue cumpliendo el objetivo de dividir la imagen en áreas de interés que finalmente puedan ser procesados y reconocidos como objetos por el computador. Esto puede ser utilizado para permitir al computador el reconocimiento de objetos, e incluso, la detección de texto dentro de las imágenes.

Por otro lado, la detección de bordes permite convertir imágenes con muchos colores y detalles, en imágenes simples con sólo dos o tres colores, donde resaltan los objetos que existen en la realidad, lo cual además de reducir el tamaño de las imágenes, permite disminuir el nivel de complejidad de la misma ya que elimina la

información menos útil de la imagen, y en consecuencia es más sencillo procesarla por el computador.

De acuerdo con las imágenes resultantes del procesamiento se concluye que a mayor valor del umbral se detectan bordes en áreas que resaltan a simple vista por su forma y color, mientras que a medida que el valor del umbral decrece se detectan hasta los más pequeños detalles en cuanto a sombras y degradados de color. Sin embargo, cuando el umbral es muy pequeño, la gran cantidad de bordes encontrados puede causar pérdida en la calidad de la imagen resultante y en consecuencia, dificultad para detectar áreas que representan objetos específicos en la imagen. Dado que los componentes RGB cercanos a los bordes presentan una diferencia mayor al umbral, se generan bordes con un grosor mayor que el obtenido por otros métodos, contribuyendo en general con una mejor segmentación de los objetos contenidos en la imagen.

Adicionalmente, la comparación entre los diferentes métodos de segmentación indica que el método propuesto presenta alta capacidad para la detección de bordes y facilita la personalización de la segmentación al permitir la graduación del umbral de diferencia de los componentes RGB analizados por el autómata celular. Esto ayuda a calibrar el umbral hasta obtener el resultado esperado, eligiendo desde una imagen segmentada con bordes bien definidos y gran cantidad de zonas detectadas, hasta una imagen con bordes menos continuos pero con gran nivel de detalle.

Para futuras investigaciones se propone la calibración del umbral a través de alguna técnica, como por ejemplo un algoritmo genético, que permita elegir de forma óptima y completamente automática el valor del umbral de segmentación que mejor se adapte a cada imagen.

Referencias

- [1] Pritam Prakash Shete, PPK Venkat, Dinesh M Sarode, Mohini Laghate, SK Bose, and RS Mundada. Object oriented framework for cuda based image processing. In *Communication, Information & Computing Technology (ICCICT), 2012 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2012.
- [2] Paul L. Rosin and Xianfang Sun. *Cellular automata in image processing and geometry*, chapter Edge detection using cellular automata, pages 85–103. Springer International Publishing, Cham, 2014.
- [3] Virginia Cifuentes, Emmanuel Larussi y Alejandro Clause. Método de Lattice-Boltzmann para segmentación de texturas de imágenes. *Mecánica Computacional*, XXXI:3027–3036, 2012.
- [4] Gholamreza Akbarizadeh. Segmentation of SAR satellite images using cellular learning automata and adaptive chains. *Journal of Remote Sensing Technology*, 1(2):44–51, 2013.
- [5] Tapas Kumar and G Sahoo. A novel method of edge detection using cellular automata. *International Journal of Computer Applications*, 9(4):38–44, 2010.
- [6] Priyanka Shotrya and Sanjeev Bhardwaj. Image segmentation using cellular automata: A technical survey. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 2(4):1268–1272, 2013.
- [7] Khadijeh Mirzaei, Hodayun Motameni, and Rasul Enayatifar. New method for edge detection and denoising via fuzzy cellular automata. *International Journal of Physical Sciences*, 6(13):3175–3180, 2011.
- [8] Fernando Ortiz Renilla. Creación de mapas visuales panorámicos mediante técnicas de visión artificial. Trabajo especial de grado, Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, Universidad Carlos III de Madrid, España, 2012.

Determination of the adsorption capacity of ibuprofen and diclofenac in agricultural venezuelan soils

Angelina Correia^a, Neudis Subero^b, Lisbeth Manganiello^c, Lily Marcano^{*b}

^aCentro de Investigaciones Ambientales (CIAUC) - Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^bLaboratorio de Investigación y Tecnología de Suelo y Ambiente (LITSA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

^cCentro de Investigaciones Química (CIQ), Laboratorio de HPLC, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.-

The high consumption of non-steroidal anti-inflammatory analgesics and their low removal in wastewater treatment plants origins that their residues can be found in the effluents and the sludge, which constitute an important source of pharmaceutical compounds to the soil. The objective of this study was to determine the adsorption capacity of ibuprofen and diclofenac in two agricultural venezuelan soils through adsorption isotherms, which were developed by batch tests. The remnant pharmaceutical concentration in the aqueous phase was determined by high-resolution liquid chromatography with UV detector. The agitation time needed to reach the equilibrium condition was 8 hours and the soil/solution ratio was set to 1/2. The adsorptions of each pharmaceutical compound was adjusted by the Freundlich's model. The adsorption coefficients were higher in the soil with acid pH because of the increasing in the non-dissociated form of the compounds, which promotes a larger interaction with the organic matter of the soil.

Keywords: soils; sorption; non-steroidal anti-inflammatory analgesics; ionization; HPLC; UV detector

Determinación de la capacidad de adsorción del ibuprofeno y el diclofenac en suelos agrícolas venezolanos

Resumen.-

El alto consumo de analgésicos anti-inflamatorios no esteroideos y su baja remoción en plantas de tratamientos de aguas residuales, trae como consecuencia que residuos de los mismos estén presentes en los efluentes y en los lodos, los cuales son fuentes importantes de introducción de compuestos farmacéuticos al suelo. El objetivo de este trabajo fue determinar la capacidad de adsorción del ibuprofeno y el diclofenac en dos suelos agrícolas venezolanos a través de isothermas de adsorción, las cuales se realizaron mediante pruebas por carga. La concentración del fármaco remanente en la solución acuosa se determinó por cromatografía líquida de alta resolución, con detector UV. El tiempo de agitación para alcanzar la condición de equilibrio fue de 8 horas y la relación suelo/solución se fijó en 1/2. La adsorción de cada compuesto se ajustó al modelo de Freundlich. Se obtuvieron coeficientes de adsorción mayores en el suelo con pH ácido, debido al incremento de la forma no disociada de los compuestos, lo cual favorece un mayor número de interacciones con la materia orgánica del suelo.

Palabras clave: suelos; sorción; analgésicos anti-inflamatorios no esteroideos; HPLC; detector UV

Recibido: diciembre 2016

Aceptado: febrero 2017

*Autor para correspondencia

Correo-e: lily_marcano10@hotmail.com (Lily Marcano)

1. Introducción

El incremento de la población mundial ha originado en las últimas décadas un aumento en la producción de fármacos, ampliamente utilizados en medicina humana y veterinaria. El uso

continuo de compuestos farmacéuticos (CF) trae como consecuencia que residuos de los mismos entren en el ambiente pudiendo alcanzar diferentes compartimientos ambientales, como cuerpos de agua y el suelo. El consumo de los fármacos se considera una de las principales fuentes de entrada de CF al ambiente, ya que después de su absorción en el organismo, los mismos son metabolizados y excretados, lo que lleva a una descarga de mezclas complejas de principios activos y sus productos de degradación en las redes cloacales y finalmente en las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR). Estudios realizados han reportado la presencia de CF en PTAR a nivel internacional [1, 2, 3, 4, 5], donde muchos fármacos no son completamente degradados, distribuyéndose entre los efluentes y los lodos. De igual forma se han detectado fármacos en aguas superficiales [6], agua de mar [7] y agua potable [8].

La reutilización de aguas residuales con fines de riego y la incorporación de lodos y estiércol como enmiendas orgánicas representan vías importantes de introducción de CF al suelo [9, 10], que por escorrentía pueden llegar a las aguas superficiales [11] y según las características del suelo pueden alcanzar las aguas subterráneas [12]. La adsorción es un proceso fundamental en la interacción del fármaco con los constituyentes sólidos del suelo, ya que afecta la concentración del compuesto en la solución, y por tanto, condiciona su transporte y disponibilidad. De esta forma, la partición del fármaco entre las fases líquida y adsorbente puede afectar su transformación química y/o biológica [13], su absorción por las plantas [14] y la contaminación potencial de las aguas subterráneas.

Los ensayos de equilibrio por carga constituye el método más utilizado a escala de laboratorio para describir la adsorción de fármacos en el suelo, así como el uso de modelos de adsorción que relacionan la distribución de los componentes de la fase acuosa a la superficie de las fracciones sólidas del suelo. Investigaciones recientes han estudiado los procesos de adsorción de CF en suelos [13, 15, 16, 17], cuyos resultados muestran que la capacidad del suelo de adsorberlos varían ampliamente en función a sus propiedades (materia orgánica, pH, textura, actividad biológica)

y a las características particulares del fármaco (solubilidad, hidrofobicidad, constante de acidez, toxicidad).

Entre los CF más utilizados en Venezuela destacan los analgésicos anti-inflamatorios no esteroideos, siendo de relevancia ambiental el ibuprofeno y el diclofenac, recientemente detectados en una PTAR nacional [18], los cuales pueden llegar a alcanzar el suelo debido a técnicas de reutilización de aguas y lodos residuales empleadas en el país. Es importante destacar que Venezuela presenta una insuficiencia en las redes de recolección de las aguas servidas, además de un déficit en el tratamiento de las aguas residuales, originando descargas directas de estas aguas sin ningún tratamiento en los cauces naturales y en el suelo.

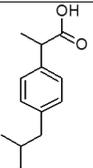
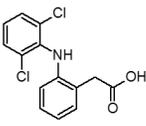
Los pocos estudios internacionales disponibles indican que el ibuprofeno y el diclofenac se han encontrado en suelos [19], donde pueden permanecer adsorbidos [20] o ser tan móviles que alcancen las aguas subterráneas [21]. Tales estudios no se han realizado en Venezuela, por lo que el objetivo de esta investigación fue determinar la capacidad de adsorción del ibuprofeno y el diclofenac en dos suelos venezolanos de uso agrícola, mediante el empleo de isothermas de adsorción.

2. Materiales y métodos

2.1. Reactivos

Se utilizaron patrones de ibuprofeno y el diclofenac sódico de alta pureza (98-99 %, Sigma-Aldrich), reactivos grados analítico (HCl y CH₃COOH, Riedel de Haën) y solventes grado HPLC (metanol y acetonitrilo, Merck). Se usó agua ultra pura (>18 MΩ) obtenida a través de un sistema de purificación de agua Milli-Q (MilliporeCo). Se prepararon soluciones patrones en metanol a 2000 µg mL⁻¹ y 4000 µg mL⁻¹ para el ibuprofeno y diclofenac, respectivamente. Las soluciones de trabajo se prepararon por dilución de la solución patrón en metanol. La Tabla 1 muestra las características físico-químicas de los fármacos en estudio.

Tabla 1: Características físico-químicas de los fármacos

Características	Ibuprofeno [22]	Diclofenac [23]
Fórmula estructural		
Peso molecular (g mol ⁻¹)	206,3	296,2
Solubilidad en agua (mg L ⁻¹), 25°C	10,0	2,4
Constante de disociación (pKa)	5,20	4,15
Constante de partición octanol/agua (log <i>K_{OW}</i>)	3,14	4,51

2.2. Muestreo y caracterización de los suelos

Se seleccionaron dos suelos agrícolas pertenecientes a la cuenca del río Güey, al noreste del Lago de Valencia, estado Aragua, Venezuela. Un suelo presenta un cultivo de algodón (SA) y el otro un cultivo de cítricos (SC). El muestreo se realizó utilizando un patrón en zig-zag a una profundidad de 20 cm desde la superficie. En cada suelo se tomó una muestra compuesta, las cuales se secaron en invernadero a temperatura ambiente, se mezclaron y tamizaron a través de una malla de 2 mm. Posteriormente se realizó la caracterización físico-químicas de los suelos a través de la determinación de los siguientes parámetros: textura, pH (H₂O 1:1; CaCl₂ 1:1), materia orgánica del suelo (MOS), hidrógeno y aluminio intercambiable y capacidad de intercambio catiónico (CIC). Todos los análisis se realizaron por triplicado, empleando metodología estándar [24].

2.3. Isotermas de adsorción

Se realizó mediante pruebas por carga a escala de laboratorio [25], para lo cual fue necesario primero determinar el tiempo de contacto necesario para que el sistema alcance el equilibrio, y luego la relación suelo/solución a utilizar. Todos los ensayos se realizaron por triplicado y el tratamiento estadístico de los datos se realizó con el software libre Gretl (versión 1.9.4, 2016).

2.3.1. Determinación del tiempo de equilibrio

Se pesaron 6 g de cada suelo en tubos centrífuga de 50 mL y se agregaron 30 mL de solución 0.01 M CaCl₂ / 200 mg L⁻¹ NaN₃. Posteriormente se

añadió una alícuota de 100 µL de solución del fármaco para alcanzar una concentración de 5 mg L⁻¹. El procedimiento se realiza por separado para cada fármaco. Los tubos se forraron con papel de aluminio y se agitaron en un mezclador horizontal (IKA KS 130) a 480 rpm en los tiempos de agitación establecidos (2, 4, 8, 12 y 16 h) a una temperatura ambiental de 25°C. Posteriormente se centrifugan (Thermo IEC CL30) a 6000 rpm por 10 min y los sobrenadantes se filtraron utilizando filtro de vidrio poroso [15, 16]. La concentración del fármaco se determinó por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). Finalmente se realizó un análisis de varianza para comprobar diferencias significativas entre los distintos tiempos de agitación evaluados y la adsorción de los fármacos en el suelo.

2.3.2. Establecimiento de la relación suelo/solución

Se ensayaron tres relaciones suelo/solución: 1/10; 1/5 y 1/2, según otros estudios realizados [13, 15, 16]. De cada suelo se tomaron 3, 6 y 15 g y se agregaron 30 mL de solución 0.01 M CaCl₂/200 mgL⁻¹ NaN₃, con una dosis de 5 mg L⁻¹ del fármaco. Se repite el procedimiento anteriormente descrito, colocando las muestras en agitación en el tiempo de equilibrio seleccionado en la etapa anterior.

2.3.3. Elaboración de las isotermas de adsorción

De cada suelo se pesaron 15 g en tubos centrífuga de 50 mL y se agregaron 30 mL de solución 0.01 M CaCl₂/200 mgL⁻¹ NaN₃.

Posteriormente se añadió una alícuota de 100 μL de soluciones de trabajo del fármaco para alcanzar concentraciones de 1, 2, 3, 4, 5 y 6 $\mu\text{g mL}^{-1}$ para el ibuprofeno y de 2, 4, 6, 8, 10 y 12 $\mu\text{g mL}^{-1}$ para el diclofenac. Se sigue el procedimiento descrito anteriormente, colocando en agitación los tubos en el tiempo de equilibrio establecido. Como controles se colocaron soluciones del fármaco sin suelo, a fin de determinar posibles pérdidas del CF por adsorción en los tubos, y muestras de suelo con la solución sin fármaco, para comprobar posibles compuestos en la matriz del suelo que pudieran interferir en el análisis.

3. Análisis de los fármacos

Para la determinación de la concentración del fármaco remanente en la solución acuosa (C_{aq}), la muestra se sometió a un proceso de extracción en fase sólida (EFS), utilizando cartuchos, marca Oasis HLB de 60mg/3ml (Waters), seguido del análisis por HPLC con detector UV (Hewlett Packard, modelo 1050). Para ello, el filtrado se llevó a un volumen de 100 mL con agua desionizada (0,1 % HCl 1M) y se realizó la EFS en cinco etapas: acondicionamiento (3 mL acetonitrilo, y 3 mL H₂O al 0,1 % HCl); carga de la muestra a 5 mL/min; lavado con 3 mL de agua desionizada; secado por 15 min con vacío; elución con 3 mL de fase elución (80 % Acetonitrilo/20 % agua al 0,2 % CH₃COOH).

El extracto de la elución se almacena congelado (-5°C) hasta su análisis cromatográfico, el cual se llevó a cabo utilizando una columna C₁₈ (Odshypersil, 125 mm \times 4 mm; 5 μm), con un volumen de inyección de 20 μL , flujo de 1 mL min^{-1} , fase móvil (60 % Acetonitrilo/40 % agua desionizada al 0,1 % CH₃COOH) en gradiente isocrático y longitud de onda de 225 nm (ibuprofeno) y 280 nm (diclofenac). Las curvas de calibración se realizaron por adición del patrón a la matriz del suelo antes del proceso de EFS, y se construyeron en el rango de 0,5 a 5 $\mu\text{g mL}^{-1}$. Los coeficientes de correlación obtenidos fueron $> 0,990$ para los dos fármacos en ambos suelos. Los límites de detección del método fueron de 0,03 $\mu\text{g mL}^{-1}$ y 0,05 $\mu\text{g mL}^{-1}$, para el diclofenac y el ibuprofeno,

respectivamente.

3.1. Determinación de los coeficientes de adsorción

El balance de masa garantizó una adsorción despreciable de los analitos en los tubos o pérdida debida a la volatilización, por lo que la adsorción en el suelo se calculó por diferencias de masa. Por ello, la concentración del fármaco adsorbida en el suelo (C_s , $\mu\text{g g}^{-1}$) se estimó como la diferencia entre su concentración inicial (C_i , $\mu\text{g mL}^{-1}$) y la concentración remanente en la solución acuosa (C_{aq} , $\mu\text{g mL}^{-1}$); y el porcentaje de la adsorción (A , %) como la relación entre la masa adsorbida (m_{ads} , μg) después del respectivo tiempo de contacto y la masa inicial del fármaco (m_i , μg), empleando las Ecuaciones (1) y (2), respectivamente [25]

$$C_s = \frac{V_0}{m_s} (C_i - C_{aq}) \quad (1)$$

$$A = \frac{m_{ads}}{m_i} 100, \quad (2)$$

donde, V_0 (mL) es el volumen inicial de la solución, m_s (g) es la masa del suelo seco.

Los resultados de la adsorción de los fármacos en cada suelo se analizaron empleando la isoterma de Freundlich, la cual relaciona la cantidad del compuesto adsorbido y la concentración del mismo en solución bajo condiciones de equilibrio, según la Ecuación (3) [15, 25].

$$C_s = K_F (C_{aq})^{1/n} \quad (3)$$

donde K_F ($\mu\text{g}^{1-1/n} \text{ mL}^{1/n} \text{ g}^{-1}$) es el coeficiente de adsorción de Freundlich y n (adimensional) y describe la curvatura de la isoterma ($1/n = 1$, representa una isoterma lineal). Con los datos experimentales, la transformación lineal de la Ecuación (3) y el método de los mínimos cuadrados se calcularon los valores de K_F y n .

Igualmente se determinó el coeficiente de distribución K_d (mL g^{-1}), como la relación entre el contenido del compuesto en el suelo y la concentración del mismo en la solución acuosa, cuando se alcanza el equilibrio de adsorción, según la Ecuación (4); y el coeficiente de adsorción K_{OC} (mL g^{-1}) normalizado al contenido de carbono

orgánico (CO, %), a través de la Ecuación (4) [25].

$$K_d = \frac{C_s}{C_{aq}} \quad (4)$$

$$K_{OC} = \frac{K_d}{c_o} 100 \quad (5)$$

4. Resultados y discusión

4.1. Caracterización del suelo

Los dos suelos presentan la misma textura (franco), con igual contenido de arcilla (Tabla 2). El SC se caracteriza por un alto contenido de materia orgánica y pH neutro, mientras que el SA presenta un nivel medio de materia orgánica y pH moderadamente ácido con protones intercambiable. Por otra parte, el SA presenta una menor CIC, posiblemente debido al menor contenido de MOS o a las pérdidas potenciales de cationes por lavado. No se detectaron ibuprofeno y diclofenac en los suelos estudiados.

Tabla 2: Análisis físicos y químicos de los suelos

Análisis	Suelos	
	SA	SC
Arcilla (%)	13	13
Limo (%)	40	48
Arena (%)	47	39
Textura	Franco	Franco
pH (suelo-agua, 1:1)	5,11	6,83
pH (suelo-CaCl ₂ 0.01M, 1:1)	4,91	6,21
Al intercambiable (cmol kg ⁻¹)	0	ND
H intercambiable (cmol kg ⁻¹)	1	ND
CIC, cmol kg ⁻¹	7,0	11,6
Materia orgánica (%)	2,30	4,38

ND: no determinado (pH del suelo > 5.5).

4.2. Determinación del tiempo de equilibrio

En la Figura 1 se presenta el porcentaje de adsorción en ambos suelos del ibuprofeno y diclofenac en función del tiempo de contacto con la solución acuosa de los fármacos. La adsorción de los CF en los suelos aumenta con el tiempo, observándose diferencias significativas ($P < 0.05$) entre los tiempos de agitación y su efecto en la

adsorción de cada fármacos en los dos suelos. No obstante, a partir de las 8 h el porcentaje de adsorción de los fármacos se mantienen constante en ambos suelos, por lo que se seleccionó dicho tiempo para la construcción de las isothermas de adsorción. Es importante destacar, que el tiempo de equilibrio alcanzado fue menor a los reportados en otros trabajos donde se obtuvieron valores de 24 h [13, 17]. Las diferencias observadas se deben al uso de diferentes tipos de suelos y distintas condiciones, tales como concentración inicial, relación suelo/solución, pH, entre otros.

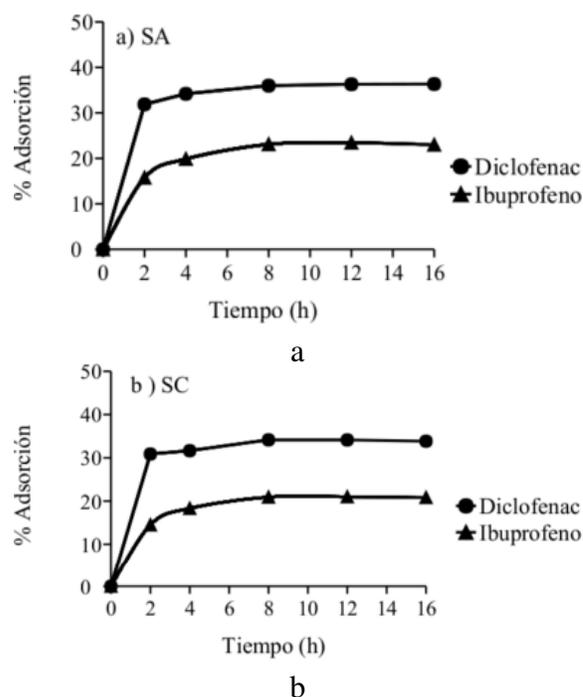


Figura 1: Capacidad de adsorción en los suelos del ibuprofeno y diclofenac a través del tiempo de contacto con la solución. a) SA (Suelo algodón); b) SC (Suelo cítrico).

4.3. Establecimiento de la relación suelo/solución

La capacidad de adsorción en los suelos del ibuprofeno y diclofenac aumentó al incrementar la relación suelo/solución, siendo más pronunciada esta tendencia en el caso del diclofenac (Figura 2). Para el ibuprofeno no se aprecia esta dependencia tan marcada, posiblemente debido a que los suelos estudiados presentaron una menor capacidad de adsorber este fármaco. La selección de las proporciones adecuadas entre el suelo y la solución

depende del coeficiente de distribución (K_d) de cada fármaco y del grado de adsorción deseado. En este sentido, la US EPA [25], recomienda porcentajes de adsorción superiores al 20 %, y preferiblemente $> 50 \%$, teniendo cuidado de mantener la concentración del compuesto en la fase acuosa lo suficientemente alta que permita su medición con precisión, sobretodo en el caso de altos porcentajes de adsorción. En función a ello, se seleccionó la relación 1/2 y un rango de concentraciones en solución acuosa para la elaboración de las isotermas de adsorción de $1-6 \mu\text{g mL}^{-1}$ y $2-12 \mu\text{g mL}^{-1}$, para el ibuprofeno y diclofenac, respectivamente.

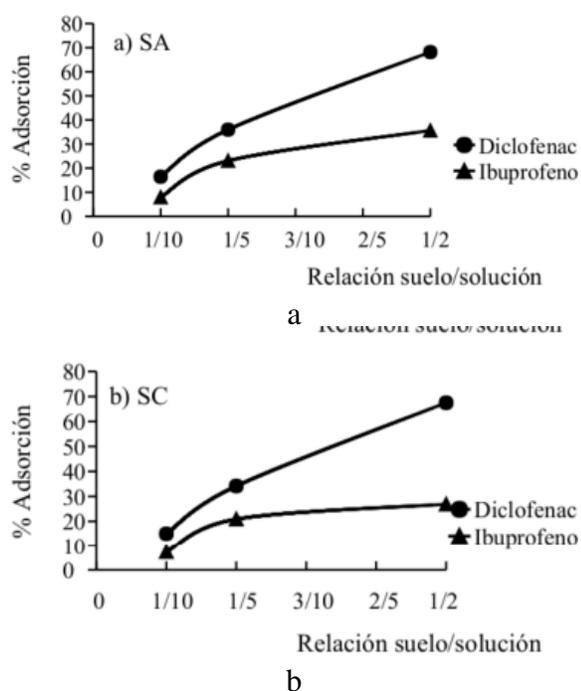


Figura 2: Capacidad de adsorción en los suelos del ibuprofeno y diclofenac respecto a la relación suelo/solución. a) SA (Suelo algodón); b) SC (Suelo cítrico).

4.4. Isotermas de adsorción

Las Figuras 3 y 4 muestran las isotermas de adsorción del ibuprofeno y diclofenac en los dos suelos evaluados. Para ambos fármacos, la adsorción se ajustó al modelo de Freundlich con coeficientes de correlación mayores a 0,98 (Tabla 3). Por otra parte, se obtuvieron valores de $1/n$ cercanos a 1, lo que sugiere una afinidad de

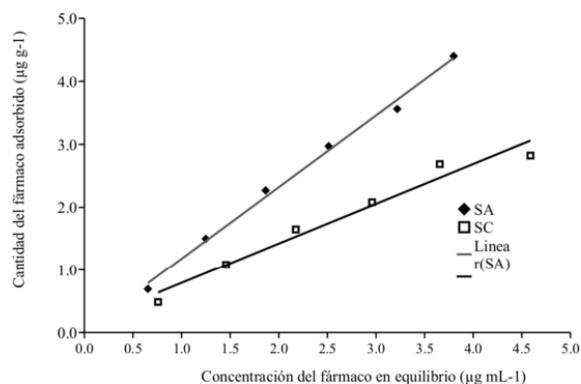


Figura 3: Isotermas de adsorción del ibuprofeno en los suelos.

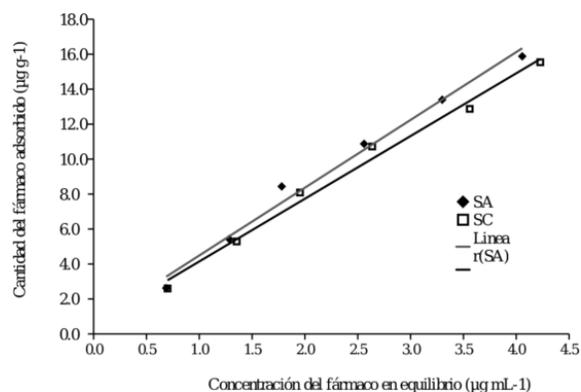


Figura 4: Isotermas de adsorción del diclofenac en los suelos.

adsorción lineal con el incremento de la concentración del compuesto en la fase acuosa; razón por lo cual se obtuvieron valores similares de K_F y K_d . El comportamiento lineal se presenta cuando la concentración de adsorbato es baja con respecto a la capacidad de adsorción del sólido, es decir, bajo condiciones de adsorción muy por debajo de la saturación [26, 27], lo cual puede explicarse en función a las bajas concentraciones estudiadas. Los estudios consultados describen el fenómeno de adsorción en el suelo del ibuprofeno y el diclofenac empleando el modelo de Freundlich, con valores de $1/n$ muy variables. Xu *et al.* [17] reportaron valores de $1/n$ entre 1,51–1,03 para el ibuprofeno, y entre 0,74–1,10 para el diclofenac. Por su parte, Chefetz *et al.* [20] trabajaron el proceso de adsorción del diclofenac alcanzando valores de $1/n$ entre 0,89–0,92. A pesar de que ambas investigaciones trabajaron en el mismo

Tabla 3: Adsorción del diclofenac e ibuprofeno en los suelos y coeficientes derivados de la isoterma de Freundlich

Compuesto Suelo	Isoterma de Freundlich			K_d (mLg^{-1})	K_{OC} (mLg^{-1})	A (%)
	K_F ($\mu g^{1-1/n} mL^{1/n} g^{-1}$)	$1/n$	R^2			
Diclofenac						
SA	4,14 ± 0,07	1,01 ± 0,02	0,988	4,17 ± 0,32 (3,76 - 4,83)	313 ± 24 (282 - 362)	68 ± 2 (65 - 71)
SC	3,88 ± 0,03	0,99 ± 0,02	0,992	3,85 ± 0,22 (3,55 - 4,15)	152 ± 9 (140 - 163)	66 ± 2 (64 - 67)
Ibuprofeno						
SA	1,14 ± 0,14	1,03 ± 0,13	0,980	1,16 ± 0,10 (0,90 - 1,26)	87 ± 7 (68 - 95)	37 ± 2 (31 - 39)
SC	0,70 ± 0,10	1,01 ± 0,14	0,983	0,70 ± 0,08 (0,54 - 0,81)	28 ± 2 (21 - 32)	26 ± 2 (21 - 29)

Nota: Los valores de K_d , K_{OC} y A corresponden al promedio de las concentraciones evaluadas con su desviación estándar. Los datos entre paréntesis representan el rango obtenido.

rango de concentraciones que el presente estudio, existen diferencias importantes en el tipo de suelo estudiado.

La diferencia entre el porcentaje de adsorción del ibuprofeno y el tipo de suelo fue significativa ($P < 0,05$), mientras que el diclofenac presentó valores de adsorción similares en ambos suelos (Tabla 3). El diclofenac presentó mayores porcentajes de adsorción y coeficientes de adsorción (K_F , K_d y K_{OC}) con respecto al ibuprofeno, lo cual puede explicarse en función a su lipoficidad (mayor valor de $\log K_{OW}$), debido a que su estructura presenta dos anillos aromáticos que pudieran permitir un mayor número de interacciones $\pi - \pi$ con las fracciones aromáticas de la MOS, tal como se ha reportado con otros CF [20]. En el caso del ibuprofeno, la presencia de cadena carbonadas favorecen las interacciones tipo Van der Waals con las fracciones alquílicas de la MOS, las cuales se caracterizan por ser de menor intensidad

Xu et al. [17] obtuvieron valores de K_d en el rango de 1,21-17,72 $ml\ g^{-1}$ para el diclofenac y de 0,56-3,71 $mL\ g^{-1}$ para el ibuprofeno, concluyendo que la adsorción de estos compuestos está principalmente gobernada por el contenido de MOS; sin embargo, en la presente trabajo no se encontró esta tendencia. Esto puede explicarse por el hecho de que estos investigadores trabajaron en suelos con diferente contenido de materia

orgánica, manteniendo constante el pH del suelo (pH neutro). La adsorción de ácidos orgánicos no puede ser sólo descrita por su partición en la fracción hidrofóbica de la MOS, ya que también pueden presentarse interacciones polares, las cuales son dependientes del pH del suelo.

Según los valores de pka y pH de los suelos estudiados, el diclofenac y el ibuprofeno existen parcialmente en forma aniónica, cuya proporción se incrementa cuando aumenta el pH del suelo, según lo establecido por la ecuación de Henderson-Hasselbach. Los aniones se adsorben menos fuertemente en suelos que sus respectivas formas neutras, debido principalmente a repulsiones electrónicas entre los compuestos cargados negativamente y las superficies de las partículas del suelo también cargadas negativamente; por ello, se obtuvieron coeficientes de adsorción (K_F , K_d y K_{OC}) menores en el suelo C con respecto al suelo A. A $pH\ 5$ (SA), se promueve la protonación de los grupos carboxilatos (tanto de los fármacos como de los ácidos húmicos), lo que facilita las interacciones intra e intermoleculares, formando una estructura más condensada que puede proporcionar mejores sitios de adsorción para compuestos hidrofóbicos [28]. A $pH\ 7$ (SC), la fracción ionizada de los fármacos aumenta, sin embargo en el diclofenac pueden presentarse interacciones polares tipo puente de hidrógeno

entre los grupos fenólicos y carboxilatos de las sustancias húmicas y el hidrógeno del grupo amino. Tales interacciones no están presentes a pH ácido, debido a la protonación del grupo amino, sin embargo, se favorecen las atracciones electrostáticas con las sustancias orgánicas ionizadas del suelo. La posibilidad de formación de interacciones tanto a pH ácido como neutro, puede ser la razón por la cual, no se apreciaron diferencias significativas en la adsorción de diclofenac en los suelos estudiados, a pesar de presentar distinto contenido de materia orgánica.

La absorción de compuestos orgánicos ionizables alcanza un máximo a un valor de pH del suelo cercano al pKa del compuesto [29]. Esta condición se cumple con el ibuprofeno en el suelo A, pudiendo ser ésta la razón por la que se encontraron diferencias significativas en la adsorción entre los dos suelos. Es importante señalar que el ibuprofeno, no contienen otros grupos polares en su estructura que pudieran promover interacciones con las fracciones polares de las sustancias orgánicas del suelo. Estudios realizados por otros autores encontraron que los CF que se comportan como ácidos débiles, presentaron valores de Kd más bajos que otros compuestos con características neutras o básicas, obteniéndose una correlación negativa entre los valores de KF de compuesto ácidos y el pH suelo ($R^2: 0,831$), lo cual fue atribuido a cambios en la relación entre las formas iónica y molecular y a la modificación de los sitios superficiales activos disponibles para llevar a cabo la adsorción [15]. Por otra parte, Lin & Gan [13] reportaron muy baja adsorción del ibuprofeno y diclofenac debido al poco contenido de materia orgánica (0.5 %) y al pH básico de los suelos estudiados, donde predominan la forma ionizada de ambos fármacos, concluyendo que la matriz inorgánica del suelo no desempeñó un papel importante en la adsorción de estos compuestos.

5. Conclusiones

Para los dos compuestos, la adsorción se ajustó al modelo de Freundlich con un factor de linealidad cercano a 1, lo cual implica la no saturación de los sitios de adsorción. El pH del suelo es la

variable que posiblemente ejerce un mayor efecto sobre la adsorción en el suelo de los fármacos estudiados.

Los suelos evaluados presentaron una mayor capacidad de adsorción del diclofenac, por el tipo de interacciones formadas. La baja adsorción del ibuprofeno sugiere una mayor movilidad de este compuesto en el suelo, y por tanto un mayor riesgo de contaminación de las aguas subterráneas.

Es importante destacar que la movilidad de un compuesto en suelo es también controlado por otros procesos, tales como la degradación biológica y química del mismo. No se dispone de información sobre el tiempo de vida de estos fármacos en suelos venezolanos, por lo que se ameritan de estudios al respecto, así como ensayos de transporte del ibuprofeno y el diclofenac en muestras de suelo no disturbadas, para una valoración global de la afectación potencial de las aguas subterráneas.

Agradecimientos

A la Dirección General de Asuntos Profesorales de la Universidad de Carabobo, por la subvención otorgada y al Instituto de Edafología de la Universidad Central de Venezuela (UCV) por el apoyo proporcionado en el muestreo y caracterización de los suelos. De igual forma, los autores desean expresar su agradecimiento a los laboratorios de HPLC (CIQ) y al LITSA, por facilitar sus instalaciones y el uso de los equipos.

Referencias

- [1] Marcus Stumpf, Thomas A Ternes, Rolf-Dieter Wilken, Silvana Vianna Rodrigues, and Wolfram Baumann. Polar drug residues in sewage and natural waters in the state of rio de janeiro, brazil. *Science of the Total Environment*, 225(1):135–141, 1999.
- [2] Paul H Roberts and Kevin V Thomas. The occurrence of selected pharmaceuticals in wastewater effluent and surface waters of the lower tyne catchment. *Science of the Total Environment*, 356(1):143–153, 2006.
- [3] Alison L Spongberg and Jason D Witter. Pharmaceutical compounds in the wastewater process stream in northwest ohio. *Science of the total environment*, 397(1):148–157, 2008.
- [4] Sonia Suárez, Marta Carballa, Francisco Omil, and Juan M Lema. How are pharmaceutical and

- personal care products (ppcps) removed from urban wastewaters? *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 7(2):125–138, 2008.
- [5] Qian Sui, Jun Huang, Shubo Deng, Gang Yu, and Qing Fan. Occurrence and removal of pharmaceuticals, caffeine and deet in wastewater treatment plants of beijing, china. *Water research*, 44(2):417–426, 2010.
- [6] Stephen R Hughes, Paul Kay, and Lee E Brown. Global synthesis and critical evaluation of pharmaceutical data sets collected from river systems. *Environmental science & technology*, 47(2):661–677, 2012.
- [7] Stefan Weigel. *Occurrence, distribution and fate of pharmaceuticals and further polar contaminants in the marine environment*. PhD thesis, Institute of Organic Chemistry, Universität Hamburg, Germany, 2003.
- [8] Mark J Benotti, Rebecca A Trenholm, Brett J Vanderford, Janie C Holady, Benjamin D Stanford, and Shane A Snyder. Pharmaceuticals and endocrine disrupting compounds in us drinking water. *Environmental science & technology*, 43(3):597–603, 2008.
- [9] Chad A Kinney, Edward T Furlong, Steven D Zaugg, Mark R Burkhardt, Stephen L Werner, Jeffery D Cahill, and Gretchen R Jorgensen. Survey of organic wastewater contaminants in biosolids destined for land application. *Environmental science & technology*, 40(23):7207–7215, 2006.
- [10] Elena Martínez-Carballo, Carmen González-Barreiro, Sigrid Scharf, and Oliver Gans. Environmental monitoring study of selected veterinary antibiotics in animal manure and soils in austria. *Environmental Pollution*, 148(2):570–579, 2007.
- [11] Edward Topp, Sara C Monteiro, Andrew Beck, Bonnie Ball Coelho, Alistair BA Boxall, Peter W Duenk, Sonya Kleywegt, David R Lapen, Michael Payne, Lyne Sabourin, et al. Runoff of pharmaceuticals and personal care products following application of biosolids to an agricultural field. *Science of the Total Environment*, 396(1):52–59, 2008.
- [12] Adcharee Karnjanapiboonwong, Jamie G Suski, Ankit A Shah, Qingsong Cai, Audra N Morse, and Todd A Anderson. Occurrence of ppcps at a wastewater treatment plant and in soil and groundwater at a land application site. *Water, Air, & Soil Pollution*, 216(1-4):257–273, 2011.
- [13] Kunde Lin and Jay Gan. Sorption and degradation of wastewater-associated non-steroidal anti-inflammatory drugs and antibiotics in soils. *Chemosphere*, 83(3):240–246, 2011.
- [14] Rumi Tanoue, Yuri Sato, Miki Motoyama, Shuhei Nakagawa, Ryota Shinohara, and Kei Nomiya. Plant uptake of pharmaceutical chemicals detected in recycled organic manure and reclaimed wastewater. *Journal of agricultural and food chemistry*, 60(41):10203–10211, 2012.
- [15] Radka Kodešová, Roman Grabic, Martin Kočárek, Aleš Klement, Oksana Golovko, Miroslav Fér, Antonín Nikodem, and Ondřej Jakšík. Pharmaceuticals' sorptions relative to properties of thirteen different soils. *Science of the total environment*, 511:435–443, 2015.
- [16] Yong Yu, Yin Liu, and Laosheng Wu. Sorption and degradation of pharmaceuticals and personal care products (ppcps) in soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(6):4261–4267, 2013.
- [17] Jian Xu, Laosheng Wu, and Andrew C Chang. Degradation and adsorption of selected pharmaceuticals and personal care products (ppcps) in agricultural soils. *Chemosphere*, 77(10):1299–1305, 2009.
- [18] A. Correia and L. Marcano. Presencia y remoción de analgésicos antiinflamatorios no esteroideos en una planta de tratamiento de aguas residuales en venezuela. *Ingeniería y Sociedad UC*, 11(1):8–21, 2016.
- [19] Feng Chen, Guang-Guo Ying, Ling-Xiao Kong, Li Wang, Jian-Liang Zhao, Li-Jun Zhou, and Li-Juan Zhang. Distribution and accumulation of endocrine-disrupting chemicals and pharmaceuticals in wastewater irrigated soils in hebei, china. *Environmental Pollution*, 159(6):1490–1498, 2011.
- [20] Benny Chefetz, Tamar Mualem, and Julius Ben-Ari. Sorption and mobility of pharmaceutical compounds in soil irrigated with reclaimed wastewater. *Chemosphere*, 73(8):1335–1343, 2008.
- [21] J Oppel, G Broll, D Löffler, M Meller, J Römbke, and Th Ternes. Leaching behaviour of pharmaceuticals in soil-testing-systems: a part of an environmental risk assessment for groundwater protection. *Science of the total environment*, 328(1):265–273, 2004.
- [22] Nehal A Kasim, Marc Whitehouse, Chandrasekharan Ramachandran, Marival Bermejo, Hans Lennernäs, Ajaz S Hussain, Hans E Junginger, Salomon A Stavchansky, Kamal K Midha, Vinod P Shah, et al. Molecular properties of who essential drugs and provisional biopharmaceutical classification. *Molecular pharmaceuticals*, 1(1):85–96, 2004.
- [23] David S Wishart, Craig Knox, An Chi Guo, Savita Shrivastava, Murtaza Hassanali, Paul Stothard, Zhan Chang, and Jennifer Woolsey. Drugbank: a comprehensive resource for in silico drug discovery and exploration. *Nucleic acids research*, 34(suppl 1):D668–D672, 2006.
- [24] Martin R Carter. *Soil sampling and methods of analysis*. CRC Press, Boca Raton, second edition, 2007.
- [25] author. *Fate, transport and transformation test guidelines (OPPTS 835.1230). Adsorption/desorption (Batch equilibrium)*. EPA 712-C-08-009. U.S. EPA, United States Environmental Protection Agency, October, 2008.
- [26] Keity Margareth Doretto, Livia Maniero Peruchi, and Susanne Rath. Sorption and desorption of sulfadimethoxine, sulfaquinoxaline and sulfamethazine antimicrobials in brazilian soils. *Science of the Total*

Environment, 476:406–414, 2014.

- [27] Meththika Vithanage, Anushka Upamali Rajapaksha, Xiangyu Tang, Sören Thiele-Bruhn, Kye Hoon Kim, Sung-Eun Lee, and Yong Sik Ok. Sorption and transport of sulfamethazine in agricultural soils amended with invasive-plant-derived biochar. *Journal of environmental management*, 141:95–103, 2014.
- [28] Adi Maoz and Benny Chefetz. Sorption of the pharmaceuticals carbamazepine and naproxen to dissolved organic matter: role of structural fractions. *Water research*, 44(3):981–989, 2010.
- [29] K Müller, GN Magesan, and NS Bolan. A critical review of the influence of effluent irrigation on the fate of pesticides in soil. *Agriculture, ecosystems & environment*, 120(2):93–116, 2007.

Radar imaging basics

A. J. Zozaya^{*,**,a}, F. Carrera^b, R. Bolaños^c

^a*Investigador Prometeo, Instituto Espacial Ecuatoriano / Escuela Politécnica Nacional*

^b*Escuela Politécnica Nacional*

^c*Instituto Espacial Ecuatoriano*

Abstract.-

In most specialized literature in synthetic aperture radar the image formation is addressed from the viewpoint of signal theory. An interesting exception can be found in the book of SULLIVAN [1], where the radar image is presented from a physical viewpoint. In this article the basics of imaging radar are revisited from the point of view of field theory based on the work of this author. Two errors committed by him in his book are corrected.

Keywords: synthetic aperture radars; radar imaging; reflectance; backscatterer coefficient; reflectivity; point-spread Function

Fundamentos de la imagen de radar

Resumen.-

En la mayoría de la literatura especializada en radares de apertura sintética abordan la formación de la imagen SAR desde el punto de vista de la teoría de señal. Una excepción de esta regla puede leerse en el libro de SULLIVAN [1], donde la imagen de radar es presentada con cierto formalismo. En este artículo se revisan los fundamentos de la imagen de radar desde el punto de vista de la teoría de campo tomando como referencia el desarrollo de este autor, corrigiendo dos errores cometidos por él en su libro.

Palabras clave: radares de apertura sintética SAR; imagen de radar; reflectancia; coeficiente de retrodispersión; reflectividad; función de dispersión de punto

Recibido: octubre 2016

Aceptado: febrero 2017

1. Introducción

Existen numerosos documentos, entre libros, tesis y artículos que tratan los principios básicos de funcionamiento de un radar de apertura sintética, así como los diferentes algoritmos de enfoque de la imagen de radar. Sin embargo, es algo frustrante no poder leer en un único texto una teoría unificada de la imagen de radar de la cual puedan derivarse en forma de corolarios las distintas

estrategias de enfoque. Toca al lector interesado realizar un gran ejercicio de integración de la numerosa y variada información desperdigada en igual número de fuentes bibliográficas. Los autores más conspicuos, los «gurús» del área, tienden a enfocar sus discursos desde el punto de vista de la teoría de señales [2, 3, 4, 5, 6], sin establecer una apropiada conexión con el origen físico del problema. En el mejor de mis conocimientos la excepción de esta regla se puede leer en el libro de SULLIVAN [1]. En [1] se establecen los fundamentos de la imagen de radar desde el punto de vista de la teoría de campo, lo cual constituye un excelente punto de partida para estudiar la teoría de la imagen de radar y las subsecuentes técnicas de procesamiento de los datos crudos que el radar registra. En este

*Autor para correspondencia

**Dirección permanente: Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo

Correo-e: azozaya@uc.edu.ve (A. J. Zozaya)

artículo se hace un repaso del enfoque de SULLIVAN corrigiendo dos errores cometidos por él en su libro [1]. Aunque la corrección de estos errores ha sido la principal motivación para la preparación del presente trabajo, de estos errores no se hace ninguna mención explícita en el artículo, para no quitarle continuidad al discurso. El lector interesado podrá ubicarlos mediante una lectura comparativa de ambos documentos.

La parte restante de este artículo está organizada de la siguiente manera: en la Sección 2, además de anticipar la definición de imagen de radar, se revisan los conceptos de reflectancia, coeficiente de retrodispersión, coeficiente de reflexión y reflectividad. En la Sección 3 se establecen propiamente los fundamentos de la imagen de radar. En la Sección 4 se define la función de dispersión de punto y se la estima para un sistema de radar genérico, y finalmente en la Sección 5 se concluye.

2. Definiciones preliminares

La imagen de radar es un mapa 2D (o 3D) de reflectancias. La reflectancia es una figura de mérito de los objetos, en la jerga de radares denominados simplemente «blancos», que indica cuanta potencia retrodispersa dicho objeto cuando es *iluminado* por ondas electromagnéticas. La reflectancia es una función de la frecuencia, la dirección de iluminación, la polarización y de las características geométricas y constitutivas de propio blanco. La reflectancia se mide en metros cuadrados, se designa con la letra griega σ y se conoce también como sección transversal de radar (RCS, por sus siglas en inglés: Radar Cross Section). Cuando el objeto es muy grande, en comparación con la huella de la antena, cual es el caso en los radares de apertura sintética que generan imágenes de sectores de la tierra, desde un satélite o un avión, se suele medir la reflectancia mediante un parámetro denominado coeficiente de retrodispersión. El coeficiente de retrodispersión se designa con la letra griega σ° , y se define como:

$$\sigma^\circ = \frac{\bar{\sigma}}{A_0}$$

donde $\bar{\sigma} = (1/N) \sum_n^N \Delta\sigma_n$ es la media estadística de la RCS en el área A_0 iluminada por el radar.

La reflectancia es una figura de mérito del blanco que se define en la zona lejana de este, es una cantidad real y básicamente es una relación entre potencias. Existe otra figura de mérito de mayor importancia en la teoría de imágenes de radar denominada reflectividad. La reflectividad se asocia al coeficiente de reflexión $\rho(\mathbf{r}')$, donde \mathbf{r}' denota posición, de una superficie plana de separación entre dos medios de propiedades electromagnéticas distintas. La reflectividad se mide justo sobre tal superficie, es una cantidad compleja $\rho(\mathbf{r}') = |\rho(\mathbf{r}')| \exp[j\phi_\rho(\mathbf{r}')]$, y básicamente es la relación entre las amplitudes complejas de los campos eléctricos reflejado a incidente [7]. En general, es la fase $\phi_\rho(\mathbf{r}')$ de la reflectividad, que pudiendo ser bastante aleatoria, la que esparce la información de la amplitud de la reflectividad sobre un gran ancho de banda, lo cual permite obtener imágenes de radar muy precisas [8, 9]. La capacidad de un radar de apertura sintética de estimar con gran precisión la imagen de un blanco reside en su naturaleza coherente. La coherencia de un sistema de radar viene establecida, a su vez, por la disponibilidad de una fase de referencia, usualmente provista por un oscilador local muy estable. La fase del campo eléctrico retrodispersado por el blanco se extrae al demodular en cuadratura la señal de voltaje que el *hardware* del radar registra, convirtiéndola en una señal compleja. Aún demodulando la señal recibida por el radar de manera convencional, una vez en el dominio digital, la transformada de HILBERT permite recuperar la fase de la señal recibida y su conversión a compleja mediante la extracción de la señal analítica. La fase no solo es importante para la estimación propiamente de la imagen, sino que, como es bien sabido, para la aplicación de las técnicas de interferometría y con ello la elaboración de modelos de elevación digital DEM (por sus siglas en inglés *Digital Elevation Model*), o mapas 3D. De modo que la reflectividad, debidamente generalizada, es una figura de mérito superior a la reflectancia en la teoría de la imagen de radar. En el mejor de mis conocimientos, el mejor intento por relacionar la reflectividad con

el coeficiente de retrodispersión, y así con la reflectancia, es de SULLIVAN, en su libro [1].

2.1. Relación entre σ , σ° y ρ

En una situación estándar, un radar de apertura sintética ilumina solo un sector S_0 del área total S , tal como se muestra en la Figura 1.

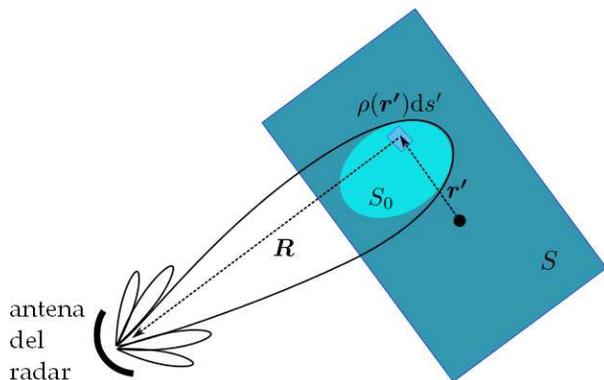


Figura 1: Radar de apertura sintética iluminando una área S_0 del área total S .

De esta forma, según la ecuación de radar, y suponiendo que el campo eléctrico incidente es uniforme en toda el área iluminada, el campo eléctrico copolar recibido en el radar vendría dado por [10]:

$$E^s = E^o \left[\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \bar{R}^4 L} \right]^{\frac{1}{2}} \sigma_{S_0}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$E^s = E^o \left[\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \bar{R}^4 L} \right]^{\frac{1}{2}} \left(\int_{S_0} \sigma^\circ(r') ds' \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

donde E^s es el campo retrodispersado recibido en los terminales de la antena receptora, E^o es el campo eléctrico transmitido medido en la entrada de la antena transmisora, $1/L$ las pérdidas en los dispositivos electrónicos y la atmósfera, G la ganancia directiva de la antena en el modo de transmisión, $\lambda^2 G/4\pi$ el área efectiva de la antena en modo de recepción, \bar{R} es la distancia promedio del sector S_0 al radar, $1/(4\pi\bar{R}^2)^2$ las pérdidas de espacio libre, y σ_{S_0} la RCS del área S_0 del blanco.

Si el coeficiente de reflexión se generaliza de forma que $\rho = \rho(r')$ pase a ser una suerte de densidad de reflectividad por unidad de superficie,

de tal modo que cada punto iluminado del blanco retrodispersa una fracción del campo incidente por $\rho(r') ds'$ sin que medien, antes de la llegada del eco correspondiente a la antena, posteriores reflexiones, ni se produzca cambio alguno de la polarización del campo. Y asimismo, las zonas no iluminadas del blanco, así como sus puntos interiores, se caracterizan por $\rho(r') = 0$, y siempre y cuando toda S se encuentre en la zona lejana del radar, se podrá escribir [10]:

$$E^s = E^o \left[\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 \bar{R}^4 L} \right]^{\frac{1}{2}} \left[\int_{S_0} \rho(r') e^{j2\kappa \cdot r'} ds' \right] e^{-j2\kappa r} \quad (3)$$

donde r' es el vector que va desde el centroide de S a un punto genérico sobre S_0 y r es el vector que desde el centroide de S al radar, tal que $R = r - r'$, y

$$\left| \int_{S_0} \rho(r') e^{j2\kappa r'} ds' \right| = \sigma_{S_0}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

esto es: el módulo de la integral entre corchetes de la Ecuación (3) es la definición generalizada de la $\sqrt{\text{RCS}}$ del área S_0 iluminada.

Evidentemente, el coeficiente de reflexión $\rho(r')$ generalizado, junto a la integral $\int_{S_0} \rho(r') e^{j2\kappa \cdot r'} ds'$, ambos complejos, contienen mucha más información que los parámetros σ° y σ , respectivamente, ambos reales.

3. La imagen de radar

Previamente habíamos adelantado que la imagen de radar es un mapa 2D (o 3D) de reflectancias. De manera más precisa, la imagen de radar es propiamente la función de reflectividad $\rho(r')$ del objeto. En general, de $\rho(r')$ solo puede obtenerse una estimación $\hat{\rho}(r')$. La función $\hat{\rho}(r')$ es conocida como estimación de la imagen compleja, y su magnitud $|\hat{\rho}(r')|$ se conoce como imagen estimada [9].

A partir de la Ecuación (3) se comprende que la estimación de la reflectividad es un problema de inversión, esto es: toca invertir el campo eléctrico retrodispersado por el blanco, convertido en voltaje por el *hardware* del radar, y transformarlo

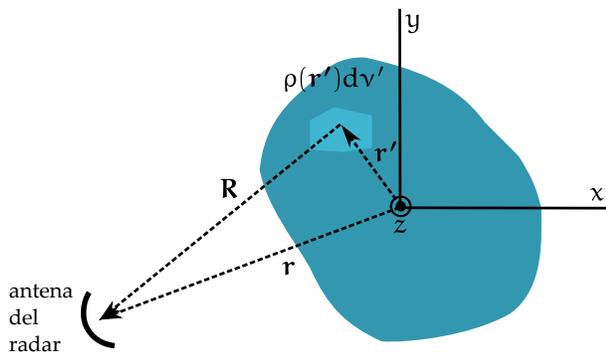


Figura 2: Blanco de extensión (tamaño) mayor a la huella de la antena.

en una estimación de la imagen. La clave de este problema está contenida en la propia Ecuación (3), la cual analizaremos de seguido a partir de su versión más general. Para ello utilizaremos como referencia un blanco genérico volumétrico como el que se muestra en la Figura 2. Un punto \mathbf{r}' sobre dicho blanco, iluminado por el radar, retrodispersa un eco diferencial por a:

$$dE^s = E^o A \rho(\mathbf{r}') dv' e^{-j2\kappa \cdot \mathbf{R}} \quad (5)$$

donde $\rho(\mathbf{r}') dv'$ es el coeficiente de reflexión del punto ubicado en $\mathbf{r}' = x' \hat{x} + y' \hat{y} + z' \hat{z}$ del blanco, medido desde el centroide de este, \mathbf{R} es el vector que va desde el punto \mathbf{r}' considerado del blanco a la antena del radar, $\kappa = \frac{\omega}{c} \hat{\kappa}$ es el vector de onda local del punto definido en la dirección de retrodispersión: $\hat{\kappa} = \hat{R}$, $2\kappa \cdot \mathbf{R}$ es la fase acumulada por el campo en su viaje de ida y vuelta, y A es una constante que toma en cuenta las pérdidas y ganancias del sistema según la ecuación de radar que vale [10]:

$$A = \sqrt{\frac{G^2 \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4 L}}$$

De esta forma, aplicando el principio de superposición, el eco total producido por el blanco viene dado por:

$$E^s = \int A \rho(\mathbf{r}') e^{-j2\kappa \cdot \mathbf{R}} dv' \quad (6)$$

donde se ha asumido $E^o = 1$.

La Ecuación (6), aplicando la siguiente aproximación de zona lejana para el vector \mathbf{R} dentro de

la fase [7]:

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \hat{R} \\ &\approx |\mathbf{r} - \mathbf{r}'| \hat{r} \\ &\approx (r^2 + r'^2 - 2\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}')^{\frac{1}{2}} \hat{r} \\ &\approx (r^2 - 2\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}')^{\frac{1}{2}} \hat{r} \\ &\approx r \left(1 - \frac{2\hat{r} \cdot \mathbf{r}'}{r} \right)^{\frac{1}{2}} \hat{r} \\ &\approx (r - \hat{r} \cdot \mathbf{r}') \hat{r} \end{aligned}$$

donde \hat{r} es un vector unitario que apunta hacia el radar desde el centroide del blanco, y para la amplitud $R \approx r$, asume la forma:

$$E^s = A \left(\int \rho(\mathbf{r}') e^{j2\kappa \cdot \mathbf{r}'} dv' \right) e^{-j2\kappa \cdot \mathbf{r}} \quad (7)$$

donde queda claro que el vector de onda κ apunta en la dirección de \hat{r} .

En la composición de la Ecuación (7), como ya se ha apuntado previamente, se supone que cada punto iluminado del blanco retrodispersa una fracción del campo incidente por a $\rho(\mathbf{r}') dv'$ sin que medien, antes de la llegada del eco correspondiente a la antena, posteriores reflexiones, ni se produzca cambio alguno de la polarización del campo. Asimismo, las zonas no iluminadas del blanco, así como sus puntos interiores, se caracterizan por $\rho(\mathbf{r}') = 0$.

La aproximación de zona lejana permite descomponer la onda esférica reflejada desde el punto \mathbf{r}' hacia el radar, en el producto de una onda esférica que parte de \mathbf{r}' hacia el origen $e^{j2\kappa \cdot \mathbf{r}'}$, y de otra que parte del centroide hacia el radar $e^{-j2\kappa \cdot \mathbf{r}}$:

$$e^{-j2\kappa \cdot \mathbf{R}} \approx e^{j2\kappa \cdot \mathbf{r}'} e^{-j2\kappa \cdot \mathbf{r}}$$

La integración en la Ecuación (7) es una suerte de agregación en el centroide de las respuestas reflectivas individuales de los puntos iluminados del blanco, desde donde se irradia un eco resultante global hacia el radar. Desprendiéndonos de los términos constantes A y $e^{-j2\kappa \cdot \mathbf{r}}$, los cuales son comunes a todos los puntos del dispersor (dispersor=blanco), y reteniendo solo las amplitudes complejas, se podrá escribir:

$$E^s(\kappa) \sim \int_V \rho(\mathbf{r}') e^{j2\kappa \cdot \mathbf{r}'} dv' \quad (8)$$

donde hemos indicado de manera explícita la dependencia del campo retrodispersado del vector de onda. Recordemos que el vector de onda se correlaciona directamente con la frecuencia mediante la definición $\kappa = 2\pi f/c$, y con la dirección de iluminación del radar $\hat{\kappa} = \hat{r}$. En coordenadas Cartesianas la Ecuación (8) asume la forma:

$$E^s(\kappa) \sim \int_V \rho(x', y', z') e^{j2\kappa_x x'} e^{j2\kappa_y y'} e^{j2\kappa_z z'} dx' dy' dz' \quad (9)$$

la cual tiene, ciertamente, la apariencia de una transformada de FOURIER espacial tridimensional. Su inversión nos permitiría recuperar la función de reflectividad $\rho = \rho(x', y', z')$, o imagen del dispersor. Este proceso de inversión podrá realizarse mediante una transformación inversa de FOURIER del campo $E^s(\kappa)$ recibido por el radar:

$$\rho(x', y', z') \sim \int_{\kappa} E^s(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z) e^{-j2\kappa_x x'} \times \dots e^{-j2\kappa_y y'} e^{-j2\kappa_z z'} d\kappa_x d\kappa_y d\kappa_z \quad (10)$$

Ciertamente, en la práctica, el valor del campo eléctrico retrodispersado no está disponible para todos los valores de κ , sino para un subconjunto de estos. Por esta razón, solo se puede obtener una estimación $\hat{\rho}(x', y', z')$ de la imagen.

Una forma de estimar la calidad de un determinado sistema de imagen de radar, esto es: de establecer la calidad de la estimación $\hat{\rho}(x', y', z')$, consiste en analizar su función de dispersión de punto, la cual será definida a continuación de forma generalizada. En un sistema particular de imagen de radar habría que considerar, en el estudio de la función de dispersión de punto propia, además del *hardware*, el algoritmo de enfoque utilizado. Existen diferentes algoritmos de enfoque [2, 3, 6], sin embargo, su estudio está fuera del alcance de los objetivos de este artículo.

4. Función de dispersión de punto

La función de dispersión de punto es la traducción que *Google* hace de la expresión *Point-Spread Function*, abreviada PSF en inglés, la cual

se define como la función de la respuesta impulsiva del sistema de imagen de radar. O sea, si el dispersor se reduce a un blanco puntual ubicado en el origen, la estimación de la imagen que se obtiene de él, sometiendo al campo eléctrico retrodispersado E^s (blanco puntual) medido por el radar a la transformación dada por la Ecuación (10), es la función de dispersión de punto:

$$PSF = \hat{\rho}(x', y', z') \sim \int_{\text{limites}} E^s(\text{blanco puntual}) e^{-j2\kappa_x x'} \times \dots e^{-j2\kappa_y y'} e^{-j2\kappa_z z'} d\kappa_x d\kappa_y d\kappa_z \quad (11)$$

donde «limites» se refiere al conjunto de valores de $\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z$ para los cuales el radar haya tomado registros del campo retrodispersado $E^s = E^s(\kappa_x, \kappa_y, \kappa_z)$. Es necesario recordar que en coordenadas esféricas:

$$\begin{aligned} \kappa_x &= \kappa \sin \theta \cos \phi \\ \kappa_y &= \kappa \sin \theta \sin \phi \\ \kappa_z &= \kappa \cos \theta \end{aligned}$$

donde los ángulos θ y ϕ definen la dirección del radar: $\hat{r} = \sin \theta \cos \phi \hat{x} + \sin \theta \sin \phi \hat{y} + \cos \theta \hat{z}$, y $\kappa = 2\pi f/c$. En particular, θ coincide con el ángulo de observación del radar y ϕ con el ángulo de aspecto del blanco [11]. De este modo, tanto las posiciones ocupadas por el radar, relativas al centroide del blanco, así como las frecuencias usadas por el mismo durante el registro de los ecos, definen los límites de integración en la Ecuación (11).

4.1. PSF de un sistema de radar genérico

Veamos que forma tiene la PSF de un sistema de radar genérico que ilumina un blanco bidimensional puntual ubicado sobre una superficie plana como se muestra en la Figura 3.

Para dicho caso, la integral (9) asume la forma:

$$E^s(\kappa) \sim \int_S \delta(x', y') e^{j2\kappa_x x'} e^{j2\kappa_y y'} dx' dy' \quad (12)$$

donde la superficie de integración S viene definida por la posición relativa del radar respecto del

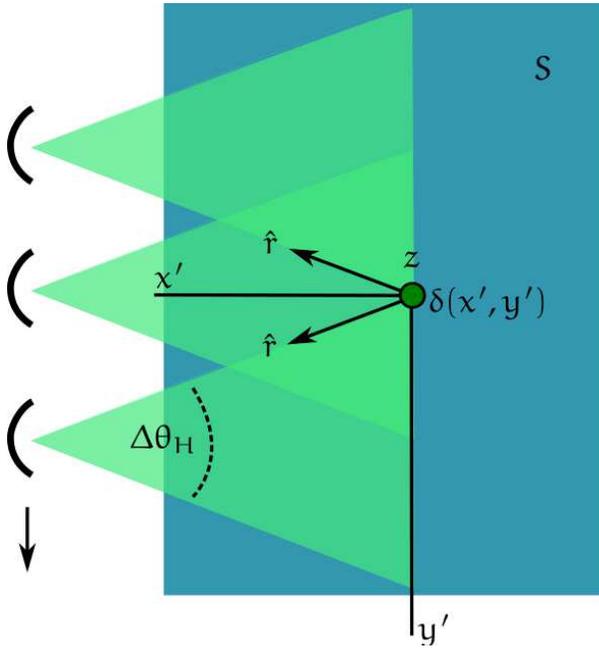


Figura 3: Dispersor puntual ubicado en el centroide de una superficie S . El radar se desplaza paralelo al eje y , casi rasante a la superficie, de forma que $\theta \sim 0$, mientras ilumina un área cuyo ancho en la dirección horizontal es de $\sim r\Delta\theta_H$.

origen de coordenadas durante el registro de los ecos, por las aperturas horizontal y vertical del haz de la antena del radar y por el tamaño de la compuerta temporal de registro de los ecos en distancia. Con todo, el resultado de dicha integral es 1:

$$E^s(\boldsymbol{\kappa}) \sim 1 \quad (13)$$

Para el problema inverso, o sea el computo de la PSF, es necesario conocer los valores de $\boldsymbol{\kappa}$ para los cuales $E^s(\boldsymbol{\kappa}) \sim 1$. Si suponemos que el radar se ha movido a lo largo del eje y , a cierta altura $z = h$ constante, el blanco puntual habrá sido iluminado solo mientras permaneció dentro de la huella de la antena, de modo que si llamamos $\Delta\theta_H$ el ancho horizontal de -3dB del haz, el ángulo ϕ habrá variado entre: $-\Delta\theta_H/2 \leq \phi \leq \Delta\theta_H/2$ (ver Figura 3). Si asumimos $\theta \sim 90^\circ$ podemos escribir:

$$\begin{aligned} \kappa_x &\approx \kappa \cos \phi \\ \kappa_y &\approx \kappa \sin \phi \\ \kappa_z &\approx 0 \end{aligned}$$

con $-\Delta\theta_H/2 \leq \phi \leq \Delta\theta_H/2$, como indicado arriba. Por otro lado, si el pulso transmitido por el radar es

del tipo *chirp*, de modo que $f \in \{f_0 - B/2, f_0 + B/2\}$ y siendo $\kappa = 2\pi f/c$, entonces $\kappa \in \{\kappa_0 - \Delta\kappa/2, \kappa_0 + \Delta\kappa/2\}$. De esta forma, la integral Ecuación (11) asume la forma:

$$PSF \sim \int_{\kappa_0 - \frac{\Delta\kappa}{2}}^{\kappa_0 + \frac{\Delta\kappa}{2}} \int_{-\frac{\Delta\theta}{2}}^{\frac{\Delta\theta}{2}} e^{-j2\kappa \cos \phi x'} e^{-j2\kappa \sin \phi y'} d(\kappa \cos \phi) d(\kappa \sin \phi) \quad (14)$$

Asumiendo ahora que el ancho de haz horizontal sea muy pequeño (antena muy directiva), podemos añadir las siguientes simplificaciones:

$$\begin{aligned} \kappa \cos \phi &\approx \kappa \\ \kappa \sin \phi &\approx \kappa \phi \end{aligned}$$

y reescribir la Ecuación (14) de la forma:

$$PSF \sim \int_{\kappa_0 - \frac{\Delta\kappa}{2}}^{\kappa_0 + \frac{\Delta\kappa}{2}} \int_{-\frac{\Delta\theta}{2}}^{\frac{\Delta\theta}{2}} e^{-j2\kappa x'} e^{-j2\kappa \phi y'} \kappa d\phi d\kappa \quad (15)$$

cuya solución puede seguirse en [1], pero que aquí reproducimos de seguido para darle completamente al artículo.

La integral en ϕ se resuelve obteniendo:

$$PSF \sim \int_{\kappa_0 - \frac{\Delta\kappa}{2}}^{\kappa_0 + \frac{\Delta\kappa}{2}} e^{-j2\kappa x'} \left[\frac{\sin(\kappa \Delta\theta_H y')}{\kappa y'} \right] \kappa d\kappa \quad (16)$$

$$\sim \int_{\kappa_0 - \frac{\Delta\kappa}{2}}^{\kappa_0 + \frac{\Delta\kappa}{2}} e^{-j2\kappa x'} \frac{\sin(\kappa \Delta\theta_H y')}{y'} d\kappa \quad (17)$$

$$\sim \frac{\sin(\kappa_0 \Delta\theta_H y')}{y'} \int_{\kappa_0 - \frac{\Delta\kappa}{2}}^{\kappa_0 + \frac{\Delta\kappa}{2}} e^{-j2\kappa x'} d\kappa \quad (18)$$

$$\sim \kappa_0 \Delta\theta_H \text{sinc}(\kappa_0 \Delta\theta_H y') \int_{\kappa_0 - \frac{\Delta\kappa}{2}}^{\kappa_0 + \frac{\Delta\kappa}{2}} e^{-j2\kappa x'} d\kappa \quad (19)$$

donde se ha asumido, en el argumento del seno, que $\Delta\kappa \ll \kappa_0$ y por tanto $\kappa \approx \kappa_0$. La integral en κ se

resuelve definiendo una nueva variable $\kappa' = \kappa - \kappa_0$, de la forma:

$$PSF \sim \kappa_0 \Delta\theta_H \operatorname{sinc}(\kappa_0 \Delta\theta_H y') e^{-j2\kappa_0 x'} \int_{-\frac{\Delta\kappa}{2}}^{\frac{\Delta\kappa}{2}} e^{-j2\kappa' x'} d\kappa' \quad (20)$$

$$\sim \kappa_0 \Delta\theta_H \operatorname{sinc}(\kappa_0 \Delta\theta_H y') e^{-j2\kappa_0 x'} \left[\frac{\sin(\Delta\kappa x')}{x'} \right] \quad (21)$$

$$\sim \kappa_0 \Delta\theta_H \operatorname{sinc}(\kappa_0 \Delta\theta_H y') \Delta\kappa \operatorname{sinc}(\Delta\kappa x') e^{-j2\kappa_0 x'} \quad (22)$$

En la Figura 4 se muestra una representación tridimensional de $\hat{\rho}(x', y')$ según la Ecuación (22).

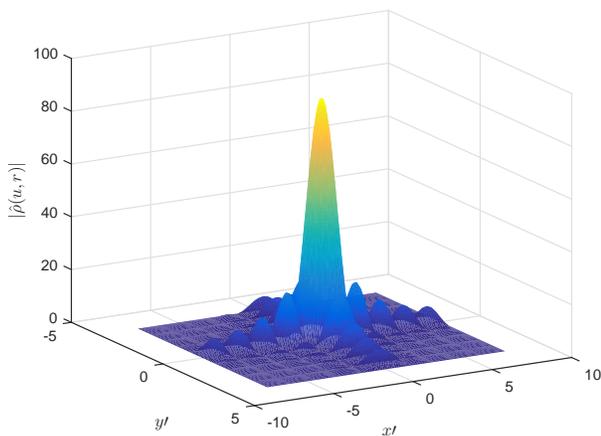


Figura 4: Representación tridimensional de la PSF $|\hat{\rho}(x', y')|$ del radar

La solución expresada por la Ecuación (22), con forma de una función sinc bidimensional, podía anticiparse debido al efecto de enventanado que realiza el radar. En la dirección acimutal, eje y' , el blanco es observado durante una ventana de ancho $\Delta\theta_H$, mientras que en la dirección del eje x' , donde se miden las distancias, la ventana queda establecida por el ancho de banda de la señal *chirp*. Los primeros cruces por cero de la PSF de la Figura 4 quedan determinados de la manera que se describe a continuación. En la dirección acimutal, o eje y' , el primer cruce por cero ocurre

en correspondencia de

$$\kappa_0 \Delta\theta_H y' = \pi \quad (23)$$

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta\theta_H y' = \pi \quad (24)$$

$$y' = \frac{\lambda_0}{\Delta\theta_H} \quad (25)$$

En la dirección de las distancias, o eje x' , el primer cruce por cero ocurre en correspondencia de

$$\Delta\kappa x' = \pi \quad (26)$$

$$\frac{2\pi B}{c} x' = \pi \quad (27)$$

$$x' = \frac{c}{2B} \quad (28)$$

Estos valores de cruce por cero, $y' = \frac{\lambda_0}{\Delta\theta_H}$ y $x' = \frac{c}{2B}$, representan la resoluciones del sistema de imagen de radar en acimut y en distancia, respectivamente. Tales valores coinciden con las resoluciones estimadas de un sistema SAR genérico ampliamente reportadas en la literatura.

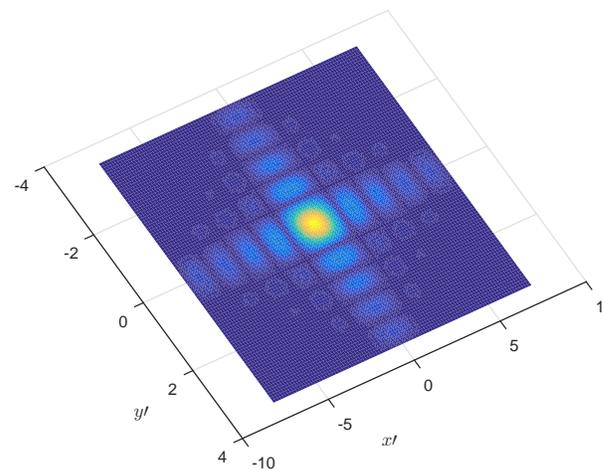


Figura 5: Imagen estimada $|\hat{\rho}(x', y')|$ del blanco puntual $\delta(x')\delta(y')$.

Finalmente, en la Figura 5 se muestra la imagen estimada $\hat{\rho}(x', y')$ del blanco puntual ubicado en el origen.

5. Conclusión

En este artículo se han revisado los fundamentos de la imagen de radar desde el punto de vista de la

teoría de campos. Dicha revisión se ha inspirado en el trabajo de SULLIVAN presentado en su libro [1]. En este trabajo, sin haberlos identificado de manera explícita, se han corregido dos errores cometidos en [1]. Dicha rectificación ha justificado la preparación de este documento. Finalmente, se ha calculado la función de dispersión de punto de un radar genérico siguiendo el formalismo descrito, y se ha obtenido una resolución equivalente a la convencionalmente estimada para los radares de apertura sintética.

Agradecimientos

El presente trabajo fue patrocinado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación de la República del Ecuador.

Referencias

- [1] Roger J. Sullivan. *Radar Foundations for Imaging and Advanced Concepts*. SciTech Publishing Inc., 2004.
- [2] Mehrdad Soumekh. *Synthetic Aperture Radar. Signal Processing with MATLAB Algorithms*. John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [3] I. G. Cumming, Y. L. Neo, and F. H. Wong. Interpretations of the omega-k algorithm and comparisons with other algorithms. *Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS '03. Proceedings. IEEE International*, 2003.
- [4] Ian G. Cumming and Frank H. Wong. *Digital processing of synthetic aperture radar data, algorithm and implementation*. Artech House, 2005.
- [5] Richard Bamber. A comparison of range-doppler and wavenumber domain sar focusing algorithms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 30. No. 4*, 1992.
- [6] BU-Chin Wang. *Digital signal processing techniques and applications in radar image processing*. John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [7] A. J. Zozaya. *Apuntes de Teoría Electromagnética*. 2016.
- [8] IEEE, editor. *Image Reconstruction from Frequency-Offset Fourier Data*, volume 72. IEEE, IEEE, June 1984.
- [9] David W. Hawkins. *Synthetic Aperture Imaging Algorithms: with application to wide bandwidth sonar*. PhD thesis, Electrical and Electronic Engineering at the University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1996.
- [10] A. J. Zozaya. Electromagnetic interaction models for the characterization of targets in sar scenes:

preliminary literature review. *Revista Ingeniería UC*, 22:26–63, 2015.

- [11] ESA. *Geometry Glossary, ASAR Handbook*.

Supervisory control application to solving optimal control problems for discrete event systems

Guelvis Mata

Departamento de Matemáticas, Facultad de Ciencias, Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela

Abstract.-

This paper deals with the supervisory control in Discrete Event Systems and its application for the problems resolution corresponding to the optimum control, which is related to a situation where the control is executed to satisfy a series of maximal or minimal qualitative specifications on the language generated or marked for a discrete event systems.

Keywords: discrete event systems; automaton; supervisory control

Aplicación de control supervisorio en la resolución de problemas de control óptimo para sistemas de eventos discretos

Resumen.-

Este trabajo trata sobre el control de supervisión en sistemas de eventos discretos y su aplicación para la resolución de problemas correspondiente al control óptimo, que se relaciona con una situación en la que el control se ejecuta para satisfacer una serie de especificaciones cualitativas máximas o mínimas en el Lenguaje generado o marcado para sistemas de eventos discretos.

Palabras clave: sistemas de eventos discretos; autómatas; control supervisorio

Recibido: octubre 2016

Aceptado: marzo 2017

1. Introducción

La clase de los sistemas de eventos discretos (SED) constituye un área de estudio con importancia creciente dada la necesidad, sofisticación y exigencia del mundo actual. Por lo tanto, es de gran interés desarrollar formalismos adaptados a esta categoría de sistemas.

Los modelos para representar SED son edificados a partir de dos nociones básicas: estados y eventos; las cuales son expresadas mediante conjuntos. Un estado es una descripción lógica del sistema en el tiempo y un evento es una acción. Así, el comportamiento dinámico (ó dinámica)

de los SED queda plenamente determinado por sucesiones finitas de estados o equivalentemente por sucesiones finitas de eventos. Estos SED incluyen a los sistemas de manufactura, a las redes de comunicación, a los sistemas de información, a los sistemas de computación, etc. Adicionalmente, el control inapropiado de la ocurrencia de eventos puede conducir a éstos sistemas a estancamientos, a sobreflujos de capacidad, etc; degradando la ejecución deseable. Estas situaciones deben ser minimizadas en algún sentido o eliminadas ya que necesitamos que los SED sean funcionales o lógicamente correctos en términos de propiedades deseables. De hecho, en este artículo nosotros trataremos el control supervisorio en SED y su aplicación en control óptimo; lo cual corresponde a una situación donde el control es ejercido para satisfacer un conjunto de especificaciones cuali-

Correo-e: gmata@ula.ve (Guelvis Mata)

tativas sobre los lenguajes generado y marcado por un SED. El punto de vista adoptado es que algunos de los comportamientos particulares que el sistema puede generar son ilegales, y en consecuencia es necesario que estos sean inhabilitados bajo control. Luego, el control es ejercido para reducir el conjunto de sucesiones de eventos que el sistema puede generar a un subconjunto legal, y también es establecido para eliminar o minimizar estancamiento en algunos SED. Este paradigma fue iniciado por Wonham en 1982 y actualmente es estudiado extensivamente. Nosotros presentaremos algunos resultados básicos de la teoría de control supervisorio focalizados sobre la no controlabilidad, junto con su aplicación a problemas de interés en los SED.

2. Preliminares

Esta sección incluye las definiciones básicas de las teorías de lenguajes y autómatas, necesarias para el estudio de la teoría de control supervisorio.

Sea Σ un conjunto finito no vacío. Consideremos el conjunto Σ^* constituido por las n -uplas,

$$s = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n),$$

$\alpha_i \in \Sigma, n \geq 1$, junto con la 0-upla $\theta := ()$.

Sobre Σ^* definimos una operación binaria, llamada concatenación, como sigue: dados $s, t \in \Sigma^*$, con $s = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ y $t = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$, entonces $st = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m) \in \Sigma^*$. Así el par (Σ^*, \cdot) es un monoide con unidad θ .

Claramente $|st| = |s| + |t|$ y $|\theta| = 0$. Ahora bien, si acordamos escribir α en lugar de la 1-upla (α) , entonces $s = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ puede ser escrita como $s = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdots \alpha_n$ o simplemente $s = \alpha_1 \alpha_2 \cdots \alpha_n$, si $n > 0$.

En consecuencia, justificadamente α, s y Σ serán llamadas respectivamente una letra, una palabra y un alfabeto. Finalmente, la convención $\alpha = (\alpha)$ nos permite tratar a Σ como un subconjunto de Σ^* .

Un lenguaje \mathcal{L} sobre Σ es cualquier subconjunto de Σ^* ; luego la unión, intersección, diferencia y complemento de lenguajes son lenguajes sobre Σ . Más aún, si \mathcal{L}_1 y \mathcal{L}_2 son lenguajes sobre un alfabeto Σ entonces

$$\mathcal{L}_1 \mathcal{L}_2 := \{s \in \Sigma^* : s = s_1 s_2, s_1 \in \mathcal{L}_1, s_2 \in \mathcal{L}_2\}$$

y

$$\overline{\mathcal{L}}_1 := \{s \in \Sigma^* : \exists t \in \Sigma^*, st \in \mathcal{L}_1\}$$

son lenguajes sobre Σ .

Sea $s \in \Sigma^*, t \in \Sigma^*$ será llamado un segmento de s si $s = utv$, para algunos $u, v \in \Sigma^*$. Si $u = \theta$, entonces t será llamado un prefijo de s . Si $v = \theta$ entonces t será llamado un sufijo de s . Por lo tanto, $\overline{\mathcal{L}}_1$ es el conjunto de todos los prefijos de todas las palabras en \mathcal{L}_1 . Claramente, por definición, $\mathcal{L}_1 \subseteq \overline{\mathcal{L}}_1$. Cuando $\mathcal{L}_1 = \overline{\mathcal{L}}_1$ entonces \mathcal{L}_1 será llamado prefijo-cerrado o simplemente cerrado [1].

Si nosotros queremos modelar un SED mediante un lenguaje, simplemente representamos los eventos con símbolos para generar un alfabeto Σ y la dinámica por un lenguaje \mathcal{L} sobre Σ . Luego, el par (Σ, \mathcal{L}) es un modelo para el SED.

Un autómata determinístico, denotado \mathcal{A} , es un sextuple

$$\mathcal{A} := (Q, \Sigma, \delta, \mathcal{E}, q_0, Q_m),$$

donde Q es un conjunto discreto cuyos elementos serán llamados estados, Σ es un conjunto finito llamado alfabeto y cuyos elementos serán llamados eventos, $\delta : Q \times \Sigma \rightarrow Q$ es una función parcial: definida en algún subconjunto propio de $Q \times \Sigma$; llamada transición: $\delta(q, \alpha) = q'$ significa que hay una transición desde el estado q al estado q' etiquetada por el evento α ; $\mathcal{E} : Q \rightarrow 2^\Sigma$ es una función llamada función de eventos activos: $\mathcal{E}(q)$ es el conjunto de todos los eventos α tales que $\delta(q, \alpha)$ está definida; $q_0 \in Q$ es un estado llamado inicial y $Q_m \subseteq Q$ es un subconjunto de estados llamados marcados. Si Q es finito, entonces el autómata determinístico \mathcal{A} será llamado autómata finito determinístico (AFD).

Si δ es la función parcial de transición de un autómata determinístico \mathcal{A} , entonces nosotros siempre extenderemos recursivamente δ a la función parcial $\widehat{\delta} : Q \times \Sigma^* \rightarrow Q$ por $\widehat{\delta}(q, \theta) = q$ y $\widehat{\delta}(q, s\alpha) = \delta(\widehat{\delta}(q, s), \alpha)$ con $q \in Q, s \in \Sigma^*, \alpha \in \Sigma$. Por lo tanto, en lo que sigue no se hará distinción entre δ y $\widehat{\delta}$; más aún, se puede pensar a \mathcal{A} como un grafo dirigido: los vértices son los estados de Q y los arcos (q, q') con etiqueta α son transiciones $\delta(q, \alpha) = q'$. En consecuencia,

podemos considerar las trayectorias o caminos del grafo que son iniciadas en q_0 y entre estas, todas las trayectorias que finalizan en cualquier estado marcado $q_m \in Q_m$; más precisamente, sea \mathcal{A} un autómata determinístico, los lenguajes

$$\mathcal{L}(\mathcal{A}) := \{s \in \Sigma^* : \delta(q_0, s) \text{ está definida}\}$$

y

$$\mathcal{L}_m(\mathcal{A}) := \{s \in \mathcal{L}(\mathcal{A}) : \delta(q_0, s) \in Q_m\}$$

serán llamados respectivamente lenguaje generado y lenguaje marcado por \mathcal{A} .

Note, desde la definición previa, que $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ es cerrado mientras que $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ no necesariamente lo es.

Dado que nosotros siempre interpretaremos a los estados marcados de un autómata \mathcal{A} como estados que determinan completaciones de tareas u operaciones, introducimos la noción de bloqueo.

Desde las definiciones de $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ y $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ es claro que $\mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \subseteq \overline{\mathcal{L}_m(\mathcal{A})} \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$, pero en general $\mathcal{L}(\mathcal{A}) \not\subseteq \overline{\mathcal{L}_m(\mathcal{A})}$. Por ejemplo, un autómata \mathcal{A} podría alcanzar un estado q tal que $q \notin Q_m$ y $\mathcal{E}(q) = \emptyset$. Esta situación indeseable es llamada un estancamiento porque el sistema entra a un estado en el que ningún evento puede ser ejecutado, sin haber completado una tarea. También, el autómata \mathcal{A} podría entrar a un ciclo de estados no marcados sin transiciones fuera de este. En este caso, el sistema siempre podrá ejecutar algún evento pero nunca podrá completar una tarea. Esto es llamado vivencia. Finalmente, cuando estemos en presencia de estancamiento o vivencia simplemente diremos que el sistema es bloqueado. Esta noción de bloqueo es muy importante cuando controlamos un SED: siempre queremos minimizar o evitar el bloqueo. Formalmente, un autómata \mathcal{A} será llamado no bloqueado si $\overline{\mathcal{L}_m(\mathcal{A})} = \mathcal{L}(\mathcal{A})$.

Sea \mathcal{A} un autómata y consideremos los lenguajes generado y marcado $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ respectivamente. Si eliminamos del grafo de \mathcal{A} los estados que no son alcanzables o accesibles desde el estado inicial por una palabra en $\mathcal{L}(\mathcal{A})$, entonces el autómata resultante tiene igualmente como lenguajes generado y marcado respectivamente a

los lenguajes $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$. Note que eliminar un estado de \mathcal{A} bajo la condición impuesta anteriormente significa igualmente eliminar las transiciones que están atadas a dicho estado.

Por otro lado, nosotros podemos obtener un autómata eliminando del grafo de \mathcal{A} los estados accesibles desde el estado inicial que no pueden ser llevados a un estado marcado por una palabra en $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$. Este autómata posee claramente como lenguaje marcado a $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$, pero su lenguaje generado podría estar contenido propiamente en $\mathcal{L}(\mathcal{A})$. Finalmente, dado un autómata \mathcal{A} , las consideraciones de eliminación de estados antes expuestas conducen a la construcción de un autómata determinístico limpio en el sentido que siempre puede completar tareas desde el comienzo de la evolución del sistema.

Notemos que si $\mathcal{A}_a(\mathcal{A})$ y $\mathcal{A}_c(\mathcal{A})$ denotan respectivamente los autómatas accesible: construido desde \mathcal{A} por eliminación de los estados no alcanzables desde q_0 ; y coaccesibles: construido desde \mathcal{A} por eliminación de los estados que no conducen a estados marcados desde q_0 ; entonces, \mathcal{A} es limpio si, y solo si, $\mathcal{A} = \mathcal{A}_a(\mathcal{A}_c(\mathcal{A})) = \mathcal{A}_c(\mathcal{A}_a(\mathcal{A}))$.

En lo que sigue siempre asumiremos que dado un autómata \mathcal{A} éste es accesible.

Dado un lenguaje infinito \mathcal{L} sobre un alfabeto Σ , siempre podemos construir un autómata \mathcal{A} tal que $\mathcal{L} = \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$: por ejemplo, como un árbol cuyo nodo raíz es el estado inicial y donde los nodos, representando los estados marcados, son incorporados por la longitud de las palabras en \mathcal{A} .

La clase de lenguajes sobre un alfabeto Σ que tienen representación por autómatas finitos es muy importante: por ejemplo si se quiere almacenar en memoria para ejecutar cálculos o si se necesita almacenar una política de control. Formalmente, un lenguaje \mathcal{L} sobre un alfabeto Σ será llamado regular si existe un AFD \mathcal{A} tal que $\mathcal{L} = \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ [1, 3].

3. Realimentación

Sea Σ un alfabeto representando el conjunto de eventos de un SED. Sean $\mathcal{L} = \overline{\mathcal{L}}$ y $\mathcal{L}_m \subseteq \mathcal{L}$ lenguajes sobre Σ representando, a un nivel lógico de abstracción, el conjunto de

sucesiones finitas de eventos que el sistema puede generar y el subconjunto de sucesiones que determinan las completaciones de operaciones o tareas respectivamente. Sea \mathcal{A} un autómata determinístico representando al par de lenguajes \mathcal{L} y \mathcal{L}_m : $\mathcal{L} = \mathcal{L}(\mathcal{A})$ y $\mathcal{L}_m(\mathcal{A}) = \mathcal{L}_m$. Así, nosotros nos referiremos al SED como \mathcal{A} .

Particionamos a Σ en dos subconjuntos disjuntos $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{nc}$, donde Σ_c representa al conjunto de eventos controlables: eventos cuya ocurrencia puede ser prevenida o inhabilitada bajo control; y Σ_{nc} representa al conjunto de eventos no controlables. Hay muchas razones por las que un evento puede ser modelado como no controlable; por ejemplo, si éste es inherentemente imposible de controlar (evento destrucción), si éste tiene alta prioridad (no puede ser inutilizado), etc.

Ahora bien, supongamos que la función de transición de \mathcal{A} puede ser controlada por un agente externo, en el sentido que los eventos controlables pueden ser permitidos o inhabilitados por un controlador externo. Entonces, el generador \mathcal{A} puede ser conectado con un controlador (supervisor) S en un lazo de realimentación tal como se ilustra a continuación.

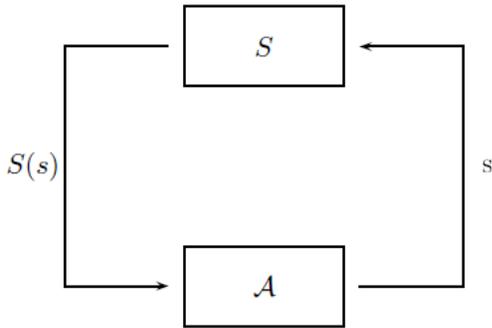


Figura 1: Realimentación dinámica.

Formalmente,

Definición 1. Sea $\mathcal{A} = (Q, \Sigma, \delta, \mathcal{E}, q_0, Q_m)$ un autómata determinístico, y sea $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{nc}$ una partición disjunta de Σ . Un supervisor S para \mathcal{A} es cualquier función

$$S : \mathcal{L}(\mathcal{A}) \rightarrow \Gamma := \{\gamma \in 2^\Sigma : \Sigma_{nc} \subseteq \gamma\}$$

Nosotros ahora acoplaremos las ideas establecidas para control.

Para cada $s \in \mathcal{L}(\mathcal{A})$ bajo el control de S , $S(s) \cap \mathcal{E}(\delta(q_0, s))$ es el conjunto de eventos permitidos que \mathcal{A} puede ejecutar en el estado $\delta(q_0, s)$; es decir, \mathcal{A} no puede ejecutar un evento que este en su conjunto de eventos activos actual si dicho evento no esta también en $S(s)$. Llamaremos a $S(s)$ patrón de control en s . Por definición, el patrón de control $S(s) = \gamma \in \Gamma$ contiene a Σ_{nc} . Esto garantiza que el supervisor S no puede inhabilitar a los eventos no controlables. Por último, notemos que estamos en presencia de una realimentación dinámica en el sentido que el dominio de S es $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y no el conjunto de estados Q . Por lo tanto, el patrón de control puede cambiar en diferentes visitas a un estado. El sistema resultante será denotado S/\mathcal{A} [2, 4].

Definición 2. Sea \mathcal{A} un autómata determinístico con $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{nc}$ una partición disjunta de Σ . Sea S un supervisor para \mathcal{A} . El lenguaje generado por S/\mathcal{A} es dado recursivamente por:

- (i) $\theta \in \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$;
- (ii) Para $s \in \Sigma^*$ y $\alpha \in \Sigma$ se tiene que: $s \in \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$, $s\alpha \in \mathcal{L}(\mathcal{A})$, $\alpha \in S(s) \iff s\alpha \in \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$.

El lenguaje marcado por S/\mathcal{A} es dado por

$$\mathcal{L}_m(S/\mathcal{A}) = \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}).$$

Desde la definición 2 es claro que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$ es cerrado. Más aún, $\emptyset \subseteq \mathcal{L}_m(S/\mathcal{A}) \subseteq \overline{\mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})} \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$. En lo que sigue, con abuso de lenguaje, diremos que un supervisor S para \mathcal{A} es bloqueado si S/\mathcal{A} es bloqueado. Luego, como $\mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})$ consiste de los elementos de $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ que “sobreviven” bajo el control de S , entonces el bloqueo significa que el sistema controlado no puede finalizar la ejecución de la tarea.

4. Planificación

La razón por la que un supervisor S es incluido para un SED \mathcal{A} es el supuesto de que el sistema no controlado \mathcal{A} genera un comportamiento ilegal. Luego, el comportamiento legal o

la planificación será dado como un sublenguaje $\mathcal{L}_p \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$ o más restrictivamente como un sublenguaje $\mathcal{L}_{p_m} \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ (en problemas donde el bloqueo es de interés). Se enfatiza que \mathcal{L}_p ó \mathcal{L}_{p_m} se obtienen después de establecer las especificaciones o requerimientos impuestos sobre el SED. Estas especificaciones son descritas por uno o más lenguajes (posiblemente marcados) \mathcal{L}_{E_i} , $i = 1, 2, \dots, m$. Si los lenguajes \mathcal{L}_{E_i} no son sublenguajes de $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ o de $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ entonces tomamos apropiadamente

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_p &= \mathcal{L}(\mathcal{A}) \cap \left(\bigcap_{i=1}^m \mathcal{L}_{E_i} \right) \\ &\text{ó} \\ \mathcal{L}_{p_m} &= \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \cap \left(\bigcap_{i=1}^m \mathcal{L}_{E_i} \right). \end{aligned}$$

Nosotros siempre asumiremos que la planificación es dada; sin embargo, comentamos que expresarla no es tarea fácil. De hecho, no existe una metodología unificada para su construcción

5. Controlabilidad

Estamos interesados en saber bajo que condiciones una planificación \mathcal{L}_p puede ser llevada a cabo por un supervisor S .

Definición 3. Dado un SED \mathcal{A} con $\Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$ su conjunto de eventos no controlables. Sea $K \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$, $K \neq \emptyset$

- (i) K será llamado $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado si $K = \overline{K} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$.
- (ii) K será llamado controlable con respecto a $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y Σ_{nc} si $\overline{K}\Sigma_{nc} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{K}$.

Observación 1. La condición (ii) de la definición 3 es un concepto fundamental del control supervisorio. De hecho, (ii) significa que un lenguaje puede ser llevado a cabo bajo control si, y solo si, no hay continuaciones de palabras en el lenguaje por eventos no controlables, físicamente posibles, que estén fuera de dicho lenguaje. Más aún, por definición, K es controlable si, y solo si, \overline{K} es controlable.

Teorema 1. Sea $K \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$, $K \neq \emptyset$. Sea $\Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$ el conjunto de eventos no controlables de \mathcal{A} . Existe un supervisor no bloqueado S para \mathcal{A} tal que $K = \mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})$ sí, y solo sí, K es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado y controlable con respecto a $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y Σ_{nc} .

Demostración

Supongamos que existe un supervisor no bloqueado S para \mathcal{A} tal que $K = \mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})$. Por definición de $\mathcal{L}(S/\mathcal{A})$, $\mathcal{L}(S/\mathcal{A})\Sigma_{nc} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$. Luego, del no bloqueo de S se sigue que

$$\overline{\mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})\Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{\mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})};$$

es decir, $\overline{K}\Sigma_{nc} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{K}$. Por otro lado,

$$\begin{aligned} K &= \mathcal{L}_m(S/\mathcal{A}) \\ &= \overline{\mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \\ &= \overline{K} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}). \end{aligned}$$

Recíprocamente, supongamos que K es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado y controlable con respecto a $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y Σ_{nc} . Sea S el supervisor para \mathcal{A} definido por $S(s) = \Sigma_{nc} \cup \{\alpha \in \Sigma_c : s\alpha \in \overline{K}\}$.

Afirmación: $\overline{K} = \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$. En efecto, por definición de S y controlabilidad de K es claro que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \subseteq \overline{K}$. Para la otra dirección procederemos por inducción sobre la longitud de la palabra. Sea $s \in \overline{K}$, con $|s| = 1$; es decir, $s = \alpha$ para algún $\alpha \in \Sigma$, entonces $s \in \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$. Dado un lenguaje $\mathcal{L} \subseteq \Sigma^*$ pongamos $\mathcal{L}_i := \{s \in \mathcal{L} : |s| = i\}$, $i = 0, 1, 2, \dots$

Claramente $\mathcal{L} = \bigcup_{i=0}^{\infty} \mathcal{L}_i$.

Supongamos que $\mathcal{L}_i(S/\mathcal{A}) = \overline{K}_i$, $i = 0, 1, \dots, n$ (hipótesis de inducción). Sea $s \in \mathcal{L}_n(S/\mathcal{A})$ y consideremos la palabra $s\alpha \in \mathcal{L}(\mathcal{A})$, $\alpha \in \Sigma$. Si $s\alpha \in \overline{K}$ entonces $\alpha \in S(s)$; de donde, $s\alpha \in \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$. Por lo tanto, $\mathcal{L}_{n+1}(S/\mathcal{A}) = \overline{K}_{n+1}$. Luego, $\overline{K} \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$. En consecuencia, $\overline{K} = \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$.

Finalmente, desde la afirmación y que K es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado se sigue que

$$\begin{aligned} K &= \overline{K} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \\ &= \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \\ &= \mathcal{L}_m(S/\mathcal{A}) \\ &\text{y} \\ \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) &= \overline{\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A})} \\ &= \overline{\mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})}. \end{aligned}$$

■

Corolario 1. Sean $K \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$, $K \neq \emptyset$, y sea $\Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$ el conjunto de eventos no controlables de \mathcal{A} . Existe un supervisor S para \mathcal{A} tal que $K = \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$ si, solo si, K es cerrado y controlable con respecto a $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y Σ_{nc} .

Demostración

Supongamos que existe un supervisor S para \mathcal{A} tal que $K = \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$, entonces obviamente $K = \overline{K}$; es decir, K es cerrado. También, por definición de $\mathcal{L}(S/\mathcal{A})$, $\mathcal{L}(S/\mathcal{A})_{\Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$; es decir, $\overline{K}_{\Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{K}$. Así, K es controlable con respecto a $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y Σ_{nc} . Recíprocamente, si K es controlable con respecto a $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y Σ_{nc} , y $K = \overline{K}$, entonces tomando el supervisor S definido en la prueba del teorema 1 y procediendo de manera análoga obtenemos que $\overline{K} = \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = K$. ■

Corolario 2. Sea $K \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$, $K \neq \emptyset$, y sea $\Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$ el conjunto de eventos no controlables del SED \mathcal{A} . Existe un supervisor S para \mathcal{A} tal que $\overline{K} = \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$ si, solo si, K es controlable con respecto a $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y Σ_{nc} .

Demostración

Análoga a la prueba del corolario 1 ■

Como ha sido establecido, dados un SED \mathcal{A} y $K \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$, si existe un supervisor S para \mathcal{A} tal que $\overline{K} = \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$ entonces K es un lenguaje controlable con respecto a $\mathcal{L}(\mathcal{A})$ y Σ_{nc} (o simplemente controlable) de $\mathcal{L}(\mathcal{A})$. Adicionalmente (si nuestro interés está centrado en lenguajes marcados), si K es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado, entonces obtenemos que $K = \mathcal{L}_m(S/\mathcal{A})$ donde S es no bloqueado.

Para propósitos de implementación queremos tener una representación de S mediante un autómata determinístico. Esta representación será llamada una realización de S . Por lo tanto, cuando los lenguajes involucrados: $\mathcal{L}(\mathcal{A})$, $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ y K ; sean regulares entonces la representación será finita y en consecuencia implementable. Así, la realización de S será almacenada en memoria y será suficiente en tiempo real para leer el patrón de control de la traza de eventos actual. Más precisamente, sin pérdida de generalidad supongamos que el dominio de S es $\mathcal{L}(S/\mathcal{A})$.

Sea $\mathcal{R} = (X, \Sigma, \delta_{\mathcal{R}}, \mathcal{E}_{\mathcal{R}}, x_0, X)$ un autómata determinístico limpio tal que $\overline{K} = \mathcal{L}(\mathcal{R}) = \mathcal{L}_m(\mathcal{R})$ (la existencia de \mathcal{R} fue establecida en los preliminares), entonces el autómata producto $\mathcal{A} \times \mathcal{R}$ es tal que

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\mathcal{A} \times \mathcal{R}) &= \mathcal{L}(\mathcal{R}) \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \\ &= \overline{K} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \\ &= \overline{K} = \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \\ &\text{y} \\ \mathcal{L}_m(\mathcal{A} \times \mathcal{R}) &= \overline{K} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \\ &= \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \\ &= \mathcal{L}_m(S/\mathcal{A}). \end{aligned}$$

Lo que esto significa es que una vez eliminados de $S(s)$ los eventos no controlables que no están en $\mathcal{E}(\delta(q_0, s))$, el patrón de control $S(s)$ queda inmerso en la estructura de transición de \mathcal{R} . Es decir,

$$\begin{aligned} S(s) \cap \mathcal{E}(\delta(q_0, s)) &= \mathcal{E}_{\mathcal{A} \times \mathcal{R}}(\delta_{\mathcal{A} \times \mathcal{R}}((q_0, x_0), s)) \\ &= \mathcal{E}_{\mathcal{R}}(\delta_{\mathcal{R}}(x_0, s)), \end{aligned}$$

donde la última igualdad es consecuencia de que $\overline{K} \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$.

Ahora, $\mathcal{A} \times \mathcal{R}$ está definido sin hacer referencia a un mecanismo de control; sin embargo, la interpretación es como sigue: Sea $s \in \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$, y sean q y x los estados resultantes de la ejecución de s . Si \mathcal{A} ejecuta un evento $\alpha \in \mathcal{E}(q)$, entonces $\alpha \in \mathcal{E}_{\mathcal{R}}(x)$. Así, \mathcal{R} también ejecuta el evento α (como observador pasivo). Sean q' y x' los estados alcanzados en \mathcal{A} y \mathcal{R} respectivamente después de la ejecución de α , entonces el conjunto de eventos activos de \mathcal{A} en sa es dado ahora por el conjunto de eventos activos de \mathcal{R} en x' .

Finalmente, hemos construido una representación de S que en caso de un lenguaje regular K solo requiere memoria finita.

6. No Controlabilidad

La presente sección es incluida porque posiblemente las planificaciones \mathcal{L}_p y \mathcal{L}_{p_m} no son controlables. Supongamos dado un SED \mathcal{A} junto con su conjunto de eventos no controlables $\Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$.

Teorema 2. Sea $\{K_i\}_{i \in I}$ una familia arbitraria de lenguajes, $K_i \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$ para todo $i \in I$.

- (i) Si los K_i son controlables, entonces $\bigcup_{i \in I} K_i$ es controlable.
- (ii) Si los K_i son controlables y cerrados, entonces $\bigcap_{i \in I} K_i$ es controlable y cerrado

Demostración

- (i) Si $\overline{K_i \Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{K_i}$ para todo $i \in I$, entonces

$$\begin{aligned} \left(\bigcup_{i \in I} K_i \right) \Sigma_{nc} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) &= \mathcal{E}_{\mathcal{A} \times \mathcal{R}}(\delta_{\mathcal{A} \times \mathcal{R}}((q_0, x_0), s)) \\ &= \left(\bigcup_{i \in I} \overline{K_i} \right) \Sigma_{nc} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \\ &= \bigcup_{i \in I} (\overline{K_i} \Sigma_{nc} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A})) \\ &\subseteq \bigcup_{i \in I} \overline{K_i} \\ &= \overline{\bigcup_{i \in I} K_i}. \end{aligned}$$

Por lo tanto, $\bigcup_{i \in I} K_i$ es controlable.

- (ii) Si $\overline{K_i} = \overline{K_i}$ para todo $i \in I$, entonces $\bigcap_{i \in I} K_i = \bigcap_{i \in I} \overline{K_i} = \bigcap_{i \in I} K_i$. Así, $\bigcap_{i \in I} K_i$ es cerrado.

Adicionalmente, si $\overline{K_i \Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{K_i}$ para todo $i \in I$, entonces

$$\begin{aligned} \overline{\bigcap_{i \in I} K_i \Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) &= \left(\bigcap_{i \in I} \overline{K_i} \right) \Sigma_{nc} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \\ &\subseteq \overline{\bigcap_{i \in I} K_i} \Sigma_{nc} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \\ &\subseteq \overline{\bigcap_{i \in I} K_i}, \end{aligned}$$

para todo $j \in I$; luego,

$$\overline{\bigcap_{i \in I} K_i \Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \bigcap_{i \in I} \overline{K_i} = \overline{\bigcap_{i \in I} K_i}.$$

Por lo tanto, $\bigcap_{i \in I} K_i$ es controlable. ■

Sea $K \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$ y consideremos los conjuntos

$$\begin{aligned} C_c(K) &:= \{ \mathcal{L} \subseteq K : \overline{\mathcal{L} \Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{\mathcal{L}} \} \\ &\text{y} \\ C_{\sup}(K) &:= \{ \mathcal{L} : K \subseteq \mathcal{L} \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A}), \\ &\quad \mathcal{L} = \overline{\mathcal{L}}, \overline{\mathcal{L} \Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{\mathcal{L}} \} \end{aligned}$$

Claramente $C_c(K)$ y $C_{\sup}(K)$ son no vacíos ($\emptyset \in C_c(K)$ y $\mathcal{L}(\mathcal{A}) \in C_{\sup}(K)$). Más aún, $C_c(K)$ es un conjunto ordenado parcialmente. Luego, por la parte (i) del teorema 2 se tiene que $C_c(K)$ posee como supremo único a $K_{\sup} = \bigcup_{\mathcal{L} \in C_c(K)} \mathcal{L}$.

Definición 4. Sea $K \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$. K_{\sup} será llamado el *sublenguaje controlable supremo* de K .

Notemos que si K es controlable, entonces $K_{\sup} = K$. Ahora, K_{\sup} no necesariamente es cerrado. Por lo tanto, incluiremos el teorema siguiente.

Teorema 3. (i) Si $K \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$ es cerrado, entonces K_{\sup} es cerrado;

(ii) Si $K \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado, entonces K_{\sup} es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado.

(iii) $\overline{K_{\sup}} \subseteq \overline{K_{\sup}}$.

Demostración

(i): Supongamos que $K = \overline{K}$. Entonces, $\mathcal{L} \in C_c(K)$ sí, y solo sí, $\mathcal{L} \subseteq K$ y $\overline{\mathcal{L} \Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{\mathcal{L}}$ sí, y solo sí, $\overline{\mathcal{L}} \subseteq \overline{K} = K$ y $\overline{\mathcal{L} \Sigma_{nc}} \cap \mathcal{L}(\mathcal{A}) \subseteq \overline{\mathcal{L}}$ sí, y solo sí, $\overline{\mathcal{L}} \in C_c(K)$. Luego,

$$\begin{aligned}
\overline{K_{\text{sup}}} &= \overline{\bigcup_{\mathcal{L} \in C_c(K)} \mathcal{L}} \\
&= \bigcup_{\mathcal{L} \in C_c(K)} \overline{\mathcal{L}} \\
&= \bigcup_{\mathcal{L} \in C_c(K)} \mathcal{L} \\
&= K_{\text{sup}}.
\end{aligned}$$

(ii): Supongamos que $K \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado. Entonces, $\mathcal{L} \in C_c(K)$ implica que $\overline{\mathcal{L}} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \subseteq \overline{K} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) = K$ y $\overline{\mathcal{L}}$ es controlable. Como $\overline{\mathcal{L}} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}$ entonces

$$\begin{aligned}
\overline{K_{\text{sup}}} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) &= \overline{\bigcup_{\mathcal{L} \in C_c(K)} \mathcal{L}} \\
&\subseteq \overline{K_{\text{sup}}} \\
&\subseteq \overline{K_{\text{sup}}} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}).
\end{aligned}$$

(recuerde que $K_{\text{sup}} \subseteq K \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$). Luego, $K_{\text{sup}} = \overline{K_{\text{sup}}} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$. Así, K_{sup} es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado.

(iii): $\mathcal{L} \in C_c(K) \implies \mathcal{L} \subseteq K, \overline{\mathcal{L}} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \subseteq \overline{K} \implies \overline{\mathcal{L}} \subseteq \overline{K}, \overline{\mathcal{L}} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \subseteq \overline{\mathcal{L}} \implies \overline{\mathcal{L}} \in C_c(\overline{K})$. Luego,

$$\overline{K_{\text{sup}}} = \bigcup_{\mathcal{L} \in C_c(K)} \overline{\mathcal{L}} \subseteq \bigcup_{P \in C_c(\overline{K})} P = \overline{K_{\text{sup}}}.$$

■

Ahora, $C_{\sup}(K)$ es un conjunto ordenado parcialmente. Luego, del teorema 2 se sigue que $C_{\sup}(K)$ posee como ínfimo único a $K_{\text{inf}} = \bigcap_{\mathcal{L} \in C_{\sup}(K)} \mathcal{L}$.

Definición 5. Sea $K \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$. El lenguaje K_{inf} será llamado el superlenguaje cerrado y controlable ínfimo de K .

Notemos que si K es controlable, entonces $K_{\text{inf}} = K$.

Para finalizar, se pueden verificar sin mayor dificultad, desde las definiciones correspondientes, que $\emptyset \subseteq K_{\text{sup}} \subseteq K \subseteq \overline{K} \subseteq K_{\text{inf}} \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$.

7. Problemas de Control Supervisorio

Con todos los conceptos y propiedades establecidas en las secciones precedentes podemos

formular una serie de problemas junto con sus soluciones. Tales problemas constituyen el centro de este artículo y corresponden a necesidades técnicas desde un punto de vista práctico.

Problema Básico de Control Supervisorio:

Dados un SED \mathcal{A} , el conjunto de eventos no controlables $\Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$ de \mathcal{A} y una planificación $\mathcal{L}_p = \overline{\mathcal{L}}_p \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$, construir un supervisor S para \mathcal{A} tal que:

- (i) $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}_p$;
- (ii) Si S' es otro supervisor para \mathcal{A} tal que $\mathcal{L}(S'/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}_p$, entonces $\mathcal{L}(S'/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$.

Solución:

Como \mathcal{L}_p es cerrado, entonces $(\mathcal{L}_p)_{\text{sup}}$ es cerrado (ver teorema 3, (i)). Luego, $(\mathcal{L}_p)_{\text{sup}} \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$ es cerrado y controlable. Así, desde el colorario 1 se sigue que existe un supervisor S para \mathcal{A} tal que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = (\mathcal{L}_p)_{\text{sup}} \subseteq \mathcal{L}_p$. Más aún, si S' es tal que $\mathcal{L}(S'/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}_p$ entonces $\mathcal{L}(S'/\mathcal{A}) \in C_c(\mathcal{L}_p)$; pero $(\mathcal{L}_p)_{\text{sup}}$ es el más grande de estos. Por lo tanto, $\mathcal{L}(S'/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$. En consecuencia, para la solución del problema básico de control supervisorio, basta tomar S tal que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = (\mathcal{L}_p)_{\text{sup}}$ siempre que $(\mathcal{L}_p)_{\text{sup}} \neq \emptyset$. Finalmente, si $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = (\mathcal{L}_p)_{\text{sup}}$ es un lenguaje regular entonces podemos construir una realización del supervisor S , la cual es un AFD que representa a $(\mathcal{L}_p)_{\text{sup}}$.

Problema de Control Supervisorio sin Bloqueo:

Dados un SED \mathcal{A} , $\Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$ y un lenguaje marcado $\mathcal{L}_{p_m} \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado, construir un supervisor no bloqueado S tal que:

- (i) $\mathcal{L}_m(S/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}_{p_m}$;
- (ii) Para cualquier otro supervisor no bloqueado S' tal que $\mathcal{L}_m(S'/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}_{p_m}$ se tiene que $\mathcal{L}(S'/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$.

Solución:

Como en el problema anterior, usando los resultados de las secciones precedentes la solución es seleccionar S tal que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = \overline{(\mathcal{L}_{p_m})_{\text{sup}}}$, siempre que $(\mathcal{L}_{p_m})_{\text{sup}} \neq \emptyset$. Es importante notar

que bajo el supuesto que \mathcal{L}_{p_m} es $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado, $(\mathcal{L}_{p_m})_{sup}$ es igualmente $\mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ -cerrado. Esto garantiza que la elección de S resulta en un sistema S/\mathcal{A} no bloqueado (ver teorema 1). Ahora, si $(\mathcal{L}_{p_m})_{sup}$ es regular entonces S puede ser realizado por construcción de una representación AFD de $(\mathcal{L}_{p_m})_{sup}$.

Problema de Control Supervisorio Dual:

Dados un SED \mathcal{A} , $\Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$ y un lenguaje requerido mínimo $\mathcal{L}_{min} \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$, construir un supervisor S tal que:

- (i) $\mathcal{L}_{min} \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$;
- (ii) Para cualquier otro supervisor S' tal que $\mathcal{L}_{min} \subseteq \mathcal{L}(S'/\mathcal{A})$ se tiene que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}(S'/\mathcal{A})$.

Solución: Por el teorema 3, (ii), y la definición de $C_{\sup}(\mathcal{L}_{min})$ tenemos que $(\mathcal{L}_{min})_{inf}$ es controlable y cerrado. Así, desde el colorario 1 se sigue que existe un supervisor S para \mathcal{A} tal que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = (\mathcal{L}_{min})_{inf} \supseteq \mathcal{L}_{min}$. Por otro lado, si S' es otro supervisor para \mathcal{A} tal que $\mathcal{L}_{min} \subseteq \mathcal{L}(S'/\mathcal{A})$ entonces $\mathcal{L}(S'/\mathcal{A}) \in C_{\sup}(\mathcal{L}_{min})$; pero $(\mathcal{L}_{min})_{inf}$ es el más pequeño de éstos, de donde $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = (\mathcal{L}_{min})_{inf} \subseteq \mathcal{L}(S'/\mathcal{A})$. Luego, los requerimientos (i) y (ii) son satisfechos por S . Por lo tanto, para la solución óptima del problema de control supervisorio dual basta tomar S tal que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = (\mathcal{L}_{min})_{inf}$. Notemos que si $\mathcal{L}_{min} \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$, entonces

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{min} \subseteq \overline{\mathcal{L}_{min}} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) &\subseteq (\mathcal{L}_{min})_{inf} \cap \mathcal{L}_m(\mathcal{A}) \\ &= \mathcal{L}_m(S/\mathcal{A}). \end{aligned}$$

Sin embargo, nada asegura que S es no bloqueado. De hecho, la versión sin bloqueo del problema de control supervisorio dual posee dificultades técnicas puesto que la propiedad de controlabilidad no se preserva bajo intersección.

Problema de Control Supervisorio con Tolerancia:

Dados un SED $\mathcal{A}, \Sigma_{nc} \subseteq \Sigma$, un lenguaje marcado deseado $\mathcal{L}_d \subseteq \mathcal{L}_m(\mathcal{A})$ y una planificación de tolerancia $\mathcal{L}_t = \overline{\mathcal{L}_t} \subseteq \mathcal{L}(\mathcal{A})$, donde $\overline{\mathcal{L}_d} \subseteq \mathcal{L}_t$; construir un supervisor S para \mathcal{A} tal que:

- (i) $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \subseteq \mathcal{L}_t$;

- (ii) Para todo lenguaje cerrado y controlable $K \subseteq \mathcal{L}_t$, $K \cap \mathcal{L}_d \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_d$;
- (iii) Para todo lenguaje cerrado y controlable $K \subseteq \mathcal{L}_t$, se tiene que $K \cap \mathcal{L}_d = \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_d$ implica que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \subseteq K$.

Solución:

Sea S tal que $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) = ((\mathcal{L}_t)_{sup} \cap \mathcal{L}_d)_{inf}$. (La existencia de S está garantizada desde los resultados de las secciones previas).

Ahora, como $(\mathcal{L}_t)_{sup}$ es cerrado y controlable, y $(\mathcal{L}_t)_{sup} \cap \mathcal{L}_d \subseteq (\mathcal{L}_t)_{sup}$ entonces $((\mathcal{L}_t)_{sup} \cap \mathcal{L}_d)_{inf} \subseteq (\mathcal{L}_t)_{sup} \subseteq \mathcal{L}_t$. Por otro lado, si $K \subseteq \mathcal{L}_t$ es cerrado y controlable entonces $K \subseteq (\mathcal{L}_t)_{sup}$; de donde $K \cap \mathcal{L}_d \subseteq (\mathcal{L}_t)_{sup} \cap \mathcal{L}_d$; luego, $K \cap \mathcal{L}_d \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$. En consecuencia, $K \cap \mathcal{L}_d \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_d$. Finalmente, en adición a las hipótesis establecidas para K , si $K \cap \mathcal{L}_d = \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_d$ entonces $(\mathcal{L}_t)_{sup} \cap \mathcal{L}_d \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A})$ implica que $(\mathcal{L}_t)_{sup} \cap \mathcal{L}_d \subseteq \mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \cap \mathcal{L}_d = K \cap \mathcal{L}_d \subseteq K$. Por lo tanto, $\mathcal{L}(S/\mathcal{A}) \subseteq K$. Luego, S es solución del problema de control supervisorio con tolerancia. Para finalizar, el supervisor S no necesariamente es no bloqueado. De hecho, la versión sin bloqueo de este problema no posee en general una solución óptima y tiene muchas dificultades técnicas.

8. Conclusiones

Las soluciones de los problemas establecidos en la sección anterior motivan el estudio de las operaciones sup e ínf. El resultado más importante, sin ninguna duda, es que tanto sup como ínf preservan regularidad en el sentido que si \mathcal{A} es un AFD y K es regular, entonces K_{sup} y K_{inf} también son regulares. Esta situación es crucial desde un punto de vista de síntesis ya que esto significa que si un SED posee un número finito de estados y el lenguaje de planificación marcado (o lenguaje de planificación) es regular, entonces los supervisores que dan solución a los diferentes problemas de control supervisorio, dados en la sección anterior, pueden ser realizados por AFD, y éstos pueden ser resueltos automáticamente. Justamente, uno de los principales objetivos de la teoría de control supervisorio es desarrollar métodos formales para la síntesis de leyes de control, lo cual garantiza

el cumplimiento de un conjunto dado de especificaciones o requerimientos para la planificación. En este sentido, la teoría de control supervisorio es muy útil y permite el manejo de sistemas complejos.

Referencias

- [1] Eilemberg S, 1974, Automata, Languages and Machines, Vol. A, Academic Press, New York.
- [2] Ramadge P, Wonham W, 1982, Supervisory Control of Discrete Event Processes, Lecture Notes in Control and Inform,v.39, pp.202-214.
- [3] Ramadge P, Wonham W, 1984, Supervisory Control of a Class of Discrete Event Processes, Lecture Notes in Control and Inform,v.63, p.477-498.
- [4] Ramadge P, Wonham W, 1986, Modular Supervisory Control of Discrete Event Systems,Lecture Notes in Control and Inform,v.83, p.202-214.

Treatment landfill leachate in filters anaerobic upflow of two phases (DI – FAFS)

Julio Isaac Maldonado M.^{*,a}, Jarson Alexis Rodríguez Chona^a, Ángela Maritza Cajiao^b

^aIngeniería Ambiental, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia

^bLaboratorios Microbiología, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia

Abstract.-

Leachate landfill have high concentrations of organic matter and heavy metals and other pollutants, which they are high source of contamination of bodies of water, so it was proposed to treat them using a system of anaerobic filters upstream of two phases (DI - FAFS). According to the chemical and physical characteristics of the leachate used, allowed leachate classified as Type III (Intermediate). The DI- FAFS were operated with three volumetric organic loads (VOC): High: 3.71; medium: 2.76, low 1.80 kg COD/m³-day, with temperatures of 20, 27 and 34°C. It was used as a control parameter, the removal efficiency measurement of Chemical Oxygen Demand (COD). The hydraulic retention time for DI- FAFS was 18 ± 0.5 hours and the maximum efficiency obtained in the Di - FAFS was 72.86 % in removing COD, achieved with a temperature of 34 ° C and a height ratio (acid phase/ phase methanogenic) 20/80, which also determines volume ratio of phases (acid phase/phase methanogenic) of 20/80.

Keywords: VOL; EMA; anaerobic filters; Di – FAFS

Tratamiento de lixiviados de rellenos sanitarios en filtros anaerobios de flujo ascendente de dos fases (DI – FAFS)

Resumen.-

Los lixiviados de rellenos sanitarios tienen altas concentraciones de materia orgánica, metales pesados y otros contaminantes que son fuente alta de contaminación en cuerpos de agua, que se trataron empleando un sistema de filtros anaerobios de flujo ascendente de dos fases (DI – FAFS). Según las características químicas y físicas del lixiviado utilizado, permitió clasificarlos como lixiviado joven, con concentraciones intermedias y unidades de pH superiores a 8. Estos filtros en la fase ácida tienen alturas proporcionales al 20, 50 y 80 % de la altura total del filtro y la fase metanogénica con alturas de 80, 50 y 20 % que complementan la altura total del mismo. Los DI-FAFS fueron operados con tres cargas orgánicas volumétricas (COV): alta: 3,71; media: 2,76 y baja: 1,80 Kg DQO/m³-día respectivamente, con temperaturas de 20, 27 y 34°C. Se empleó como parámetro de control, la medición eficiencia en la remoción de la DQO; el tiempo de retención hidráulico en los DI-FAFS fue de 18 ± 0,5 horas y eficiencia máxima obtenida de 72.86 % en la remoción de DQO, logrado con una temperatura de 34°C y con una relación de alturas (fase acida/metanogénica) de 20/80, que determina igualmente relación de volúmenes de la fases ídem de 20/80.

Palabras clave: COV; AME; filtros anaerobios; Di–FAFS

Recibido: julio 2016

Aceptado: marzo 2017

1. Introducción.

El mundo enfrenta una crisis ambiental en términos de cantidad y calidad del agua, a causa del incremento de la población, la industrialización, los altos niveles de vida, el calentamiento

*Autor para correspondencia

Correo-e: jimaldonadam@hotmail.com (Julio Isaac Maldonado M.)

global, el desarrollo y comportamiento antrópico; que ha generado como consecuencia grandes volúmenes de aguas residuales e industriales, vertidas al medio ambiente, causando deterioro de las aguas receptoras (superficiales, subterráneas) y de los suelos; en este sentido es de gran relevancia buscar alternativas para el tratamiento de aguas residuales altamente contaminantes, siendo necesario mejorar los procesos de tratamiento existentes.

Hoy una de las alternativas más estudiadas son los tratamientos que realizan el proceso de estabilización de sustratos en sistemas anaerobios, con buenos resultados en la remoción de la Materia Orgánica (medidos en términos de mg DBO₅/l o de mg DQO/l), reducción del contenido de sólidos, ajustes de pH entre otros; mejorando así la calidad de los vertimientos y reduciendo los impactos. En esta investigación se utilizó un sistema de filtros anaerobios de flujo ascendente separados en dos fases (DI-FAFS), donde el sustrato usado fue el lixiviado del relleno sanitario Los Guayabales, generado por la compactación de grandes cantidad de residuos sólidos vertidos por la ciudad de Cúcuta (Col.) y que cumplieron la función para los cuales fueron adquiridos y cuya eliminación técnica es necesaria para garantizar un ambiente seguro y saludable.

El impacto ambiental de los rellenos sanitarios está asociado principalmente, con la emisión de gases efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y la producción de lixiviados, drenados como consecuencia de la compactación de residuos y percolación de aguas lluvias, a través de la masa de residuos, de las reacciones químicas y biológicas ocurridas en las celdas que contienen los residuos y del contenido de humedad. Según Torres et al. [1] existen varios antecedentes de tratamiento aerobio y anaerobio de lixiviados, que van desde experiencias a escala laboratorio hasta experiencias a escala real. El tipo de tratamiento aerobio más extendido es el de los lodos activados y el de las lagunas aireadas, como también los reactor de Discos Biológicos Rotatorios; en cuanto al tratamiento anaerobio, el sistema de más utilizado es el reactor UASB, el cual ha reportado muy buenos resultados Álvarez

y Suárez [2], concluyéndose que los sistemas biológicos, como el tratamiento anaerobio solo o combinado con otros procesos son una biotecnología para el tratamiento de los lixiviados, principalmente en países con condiciones climáticas favorables (climas cálidos), que permiten una elevada biodegradabilidad, lo que representa una ventaja técnica y económica, importante, ya que en estos procesos hay una alta reducción de la materia orgánica, menor producción de lodos digeridos, menores requerimientos de área comparados con otros métodos, con generación de subproductos altamente energéticos como el CH₄ contenido en el biogás; adicionalmente, presentan un bajo o nulo requerimiento de insumos químicos, dadas las condiciones adecuadas de pH, alcalinidad y de nutrientes.

En general, a temperaturas entre 20 y 45°C se alcanzan eficiencias de reducción de DQO en lixiviados entre el 70 % al 80 % [1] y dependiendo de la edad del lixiviado y la relación DBO₅/DQO se puede cuantificar el índice de Biodegradabilidad que es la capacidad que tiene un grupo de microorganismos de descomponer una sustancia compleja en sustancias más simples; también la alta presencia de ácidos húmicos y fúlvicos indican baja capacidad de biodegradabilidad; esto debido a la liberación de las grandes moléculas orgánicas recalcitrantes en los residuos sólidos. En consecuencia los lixiviados maduros se caracterizan por la baja relación de DBO₅/DQO originada y muy altos contenidos de sales disueltas, en particular de cloruros, sodio, carbonatos y amonio [3].

Pese a la antigüedad de los filtros anaeróbicos de flujo ascendente y otros reactores anaeróbicos y dada la baja biodegradabilidad de los lixiviados, los reactores han recibido poca atención en nuestro medio, especialmente por las limitaciones operativas, como la acidificación asociada a problemas de olores, el atascamiento de sólidos y/o material orgánico y la baja velocidad de la hidrólisis, consideradas como limitantes de la eficiencia en la remoción materia orgánica en reactores anaeróbicos; además la fase No Metanogénica puede desarrollar los bioprocesos de fermentación, formación de hidrógeno y ácido acético a una velocidad mucho mayor que la formación del

CH₄, problemática que se ha venido estudiando y correlacionando con el fin de disminuir los tiempos de biodegradación, acelerar y aumentar la eficiencia del tratamiento.

Por lo anterior, Cohen [4] y Romero [5] han recomendado separar la hidrólisis y formación de ácidos grasos de la fermentación metanogénica a fin de mejorar la eficiencia de estos procesos de tratamiento, de los cuales no se conocen criterios específicos de diseño.

Por lo antes mencionado, este estudio propuso separar la fase metanogénica de las fases no metanogénica (hidrolítica – acidogénica y acetogénica) en el proceso de biodegradación de la materia orgánica, empleando filtros anaerobios de flujo ascendente separados en dos fases (DI-FAFS), trabajo que obtuvo una relación de alturas de DI-FAFS (fase acida/metanogénica), que determina igualmente la relación de volúmenes de las fases ídem.

2. Metodología

Esta investigación se realizó ejecutando las siguientes actividades cuya metodología se detallan a continuación.

Caracterización de los lixiviados. A muestras de lixiviados del relleno sanitario Los Guayabales de Cúcuta durante 12 días en el mes de marzo de 2014 se le valoraron parámetros como pH, DQO, DBO5, ST, SST, SSV, Conductividad, Turbiedad, Cloruros, Dureza Total, Alcalinidad Total, N, NH₃, Nitritos, Fosfatos, Sulfatos, Metales pesados, Grasas – Aceites y Coliformes (totales y fecales).

Actividad Metanogénica específica (AME). A cuatro lodos se les midió la AME siguiendo la metodología indicada por Jim Field [6] y aplicada por Maldonado [7], procedentes de las PTAR de Rio Frio, Campollo, Macpollo y estiércol fresco de cerdo, determinando en todos la cantidad de SST, SSV y la relación SSV/SST mediante análisis estándar [8].

Diseño y construcción de reactores DI-FAFS. Se diseñaron y construyeron las unidades de pre y tratamiento:

Unidades de pretratamiento: Se diseñaron y construyeron las unidades de pretratamiento para los nueve DI-FAFS, para retener las partículas que puedan generar obstrucciones; se dispuso de dos trampas de grasas paralelo como unidades de tratamiento preliminar para remover grasas y aceites, cada una con un largo de 0.16 m, 0.04 m de ancho y una profundidad de 0.08 m, volumen de 0.512 litros y TRH = 0.43 horas y un sedimentador primario de 0.32 m de largo, 0.16 m de ancho y una profundidad de 0.08 m, volumen de 4,096 litros y TRH = 1,73 horas, para un tiempo total de pretratamiento: 2.16 horas.

2.1. Dimensionamiento y Construcción DI-FAFS.

El DI-FAFS es un filtro anaerobio de flujo ascendente de fases separadas diseñado para biodegradar materia orgánica bajo condiciones anaerobias en fases ídem. En esta investigación se planteó separar la fase no metanogénica (Hidrólisis + Acidogénesis + Acetogénesis) en un volumen V_1 en el sentido del flujo y la fase Metanogénica en un volumen (V_2), siendo el volumen total (V_{total}) = $V_1 + V_2$.

Zonas de entrada en cada DI-FAFS: Se dispuso de un falso fondo PVC con un $\Phi = 2 + 1/2''$, una altura de 0.25 m y un volumen de 0.77 litros, sin relleno, con dos racores $\Phi = 3/8$, el primero ubicado en la parte inferior por donde ingresa el lixiviado pretratado e impulsado por bombas peristálticas y el segundo ubicado en la parte lateral que funciona como un salida de purga de lodos generados en el pretratamiento.

Cuerpo de los DI-FAFS: Se diseñaron y construyeron nueve reactores DI-FAFS con tubería de PVC presión (200 PSI) y $\Phi = 2 + 1/2''$ (Figura 1), en tres series, con alturas porcentualmente variables, según la relación entre la altura de la fase metanogénica/fase metanogénica de 80%/20%; 50%/50% y 20%/80%, teniendo como condición que la sumatoria de las dos alturas de las fases en cada reactor debe ser de 1.20 m, altura estándar para filtros anaerobios de flujo ascendente (FAFA) de fase única tomando como base, con un tiempo



Figura 1: Montaje general las tres series de DI-FAFS.

de retención de $18 \pm 0,5$ horas y un caudal de 3.5 ml/min, para volumen total de 4.11 litros.



Figura 2: Medio de soporte de los DI-FAFS.

Las Tabla 1 y 2 muestran las dimensiones de las alturas para cada una de las fases de los DI-FAFS, que se rellenaron utilizando como material soporte, trozos de tubería de CPVC $\Phi = 1/2''$; $L = 1,0\text{cm}$ como se muestra en la Figura 2.

Zona de salida y sistema de recolección de

Tabla 1: Dimensiones de las unidades de pretratamiento

Unidad	C (L/h)	L (m)	A (m)	P (m)	V Litros	TRH horas
Trampa de grasas	1,1825	0,16	0,04	0,08	0,512	0,43
Sedimentador	2,365	0,32	0,16	0,08	4,096	1,73
Tiempo total						2,16

Notación: C: caudal, L: Longitud, A: ancho, P: profundidad útil, V: Volumen

Tabla 2: Dimensiones de los DI-FAFS

Volumen	Dimensiones de los DI-FAFS			
	DI-FAFS (1) Altura (m)	DI-FAFS (2) Altura (m)	DI-FAFS (3) Altura (m)	Diámetro (m)
Fase Acida (Hidrolisis-Acidogenesis-acetogenesis)	0,24	0,60	0,96	0,0635
Metanogénesis	0,96	0,60	0,24	0,0635

gases: La zona de salida del efluente se realiza en cada una de las nueve fase metanogénicas, por medio de un racor de bronce ubicado en la parte superior del filtro, conectado a una manguera plástica de $\Phi = 1/4''$ que entrega la mezcla (líquido – gas) a un separador de fases, donde el efluente tratado sale por otro racor ubicado en la zona lateral media y el gas sale por otro racor localizado en la parte superior, y por una manguera es conducido a un filtro de hierro (fibras finas de acero-hierro) donde se remueve el H_2S , para ser finalmente introducida en un recipiente con una solución alcalina 0.1N que remueve el CO_2 y donde el CH_4 desplaza el volumen de NaOH según producción.

Inoculación y Adaptación. Construidas los reactores y conociendo el lodo de mejor AME, con él se inocularon los DI-FAFS agregando un volumen de lodo equivalente al 30% del volumen de cada fase y se inició la formación de biopelícula adherida al soporte, recirculando 8 días agua residual municipal doméstica ARD (DQO: 250–800 mg/L).

Aclimatación. Se procedió a suministrar una mezcla volumétrica de ARD y Lixiviados que se reducía cada 24 hora el volumen del ARD en un

5 % y se incrementaba el volumen de lixiviados en el mismo porcentaje, lixiviados diluidos con concentraciones constantes en cada una de las tres series de los DI-FAFS así: Serie baja: 1700 mg/L; Serie 2 media 2600 mg/L y Serie 3, alta 3500 mg DQO/L.

Tabla 3: Porcentaje de volúmenes de los DI-FAFS por fase y serie

FASES	Series 1 – 2 – 3		
	DI-FAFS (1)	DI-FAFS (2)	DI-FAFS (3)
Hidrolisis + Acidogénesis + Acetogénesis	$V_1=20\%*V_t$	$V_1=50\%*V_t$	$V_1=80\%*V_t$
Metanogénesis	$V_2=80\%*V_t$	$V_2=50\%*V_t$	$V_2=20\%*V_t$

$V_t=Volumen\ Total = V_1+V_2$

La Tabla 3 detalla los porcentajes volumétricos de la mezcla de ARD y lixiviados aplicado en los 20 días de aclimatación, de acuerdo a las concentraciones de DQO indicados anteriormente en cada serie, precisando que diariamente se prepararon 36 litros del agua mezclada, hasta aplicar finalmente en todos los reactores solo lixiviado.

Arranque. Se inició el tratamiento de los lixiviados con una temperatura constante de 20°C (en todas series) y con Cargas Orgánicas Volumétricas (COV) variables en cada una de ellas así; Serie 1 COV baja de 1,80, Serie 2 COV media de 2.76 y Serie 3 COV alta de 3,71 DQO kg/m³– día.

El sistema de alimentación siempre se mantuvo mezclado por medio de un sistema de agitación construido con un moto–reductor eléctrico que inicialmente agitaba la mezcla del lixiviado + ARD y finalmente la de solo los lixiviados, depositados en los tanques de almacenamiento del sistema, mientras que la temperatura fue controlada mediante el montaje de un controlador digital que se construyó e instaló.

Diseño Experimental. Es de tipo factorial 33, siendo las variables independientes la temperatura, la carga orgánica volumétrica y el volumen del reactor; por lo tanto cada variable tiene tres niveles cuantitativos fijos, lo que conlleva al diseño y construcción de tres series con tres DI-FAFS cada una, como se indica en la Tabla 3, por fase y serie

Una vez logradas la condiciones estables en cada carga, se incrementó la temperatura a la media de 27°C y posteriormente a la alta de 34°C, monitoreando siempre las concentraciones del DQO afluente y efluente en todos los DI-FAFS, proceso que demandó monitoreo por cien días y un periodo total de investigación discontinua de dos años.

2.2. Aislamiento e Identificación presuntiva de microorganismos metanogénicos

Trabajo microbiológico complementario que se desarrolló en el laboratorio de investigación GIMBIO de la Universidad de Pamplona, utilizando como medios selectivos utilizados por microorganismos como fuente de energía para su crecimiento y metabolismo

2.3. Procesamiento Estadístico de Resultados

Aquí se empleó la metodología de superficies de respuesta (MSR), por ser una estrategia experimental y de análisis matemático y estadístico que permitió encontrar las condiciones óptimas de operación de los DI-FAFS. La condición del proceso corresponde a aquellos factores o variables cualitativas o cuantitativas que producen un efecto en la variable respuesta que corresponde a una cantidad medible cuyo valor se ve afectado al cambiar los niveles de los factores y cuyo objetivo es optimizar dicha variable.

3. Análisis y discusión de resultados

La Tabla 4 presenta los resultados de la caracterización del lixiviado utilizado como sustrato, con las concentraciones promedio y valores máximos y mínimos de los parámetros determinados en las seis (6) muestras analizadas.

La variación de pH entre muestras es poca, tiene condiciones ligeramente básicas que pueden ser un factor de inhibición durante el tratamiento. Según Nájera et.al. [9] los valores de pH y la alcalinidad corresponden a un lixiviado tipo 3 o intermedio, siendo bajas las concentración de materia orgánica tanto en términos de DQO, como de DBO₅, lo ubican dentro de los rangos típicos para un lixiviado de vertedero nuevo según Salgado y Trujillo [10],

Tabla 4: Caracterización de lixiviados relleno sanitario Los Guayabales

Parámetro	Unidad	Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Desviación
pH		8,47	8,29	8,60	0,14
DQO	mg/L O ₂	9438,33	6440,00	12100,00	2424,66
DBO5	mg/L O ₂	2925,00	2200,00	4500,00	1125,94
ST	mg/L	13562,92	12930,00	14320,00	574,92
SST	mg/L	1015,83	670,00	1420,00	339,48
SSV	mg/l	5337,08	4860,00	5840,00	333,01
Conductividad	ms/cm	21,43	20,60	22,30	0,70
Turbiedad NTU	UNT	695,88	510,40	1051,20	215,08
Cloruros	mg/L Cl-	2147,86	746,28	3455,00	1201,82
Dureza Total	mg/L CaCO ₃	2142,39	1128,40	3210,00	829,61
Alcalinidad Total	mg/L CaCO ₃	9736,81	8942,00	10730,40	730,79
N - NH ₃	mg/L NH ₃	33,33	20,00	60,00	15,06
Nitritos	mg/L NO ₂	1,95	0,22	3,70	1,39
Fosfatos	mg/L PO ₄	284,50	132,00	437,00	114,06
Sulfatos	mg/L SO ₄	200,00	190,00	210,00	14,14
Cobre	mg/L Cu	0,51	0,06	1,04	0,45
Plomo	mg/L Pb	0,59	0,10	1,21	0,44
Cromo	mg/L Cr	0,76	0,54	0,94	0,18
Zinc	mg/L Zn	0,58	0,05	1,02	0,41
Manganeso	mg/L Mn	0,87	0,26	1,77	0,63
Hierro total	mg/L Fe	20,19	18,45	21,53	1,27
Potasio	mg/L K	2381,00	309,00	3208,00	1123,00
Sodio	mg/L Na	1056,87	808,40	1227,80	172,04
Calcio	mg/L Ca	182,42	156,14	223,20	30,74
Magnesio	mg/L Mg	220,39	172,18	251,60	75,11
Grasas y Aceites	mg/L	8,00	5,00	9,50	1,76
Coliformes Totales	NMP/ 100 ml	2150,00	500,00	3000,00	1029,08
Coliformes Fecales	NMP/ 100 ml	1300,00	300,00	3000,00	1033,44

pero por el funcionamiento del relleno se puede describir que presenta una mezcla de lixiviados provenientes de celdas jóvenes e intermedias, ya que el relleno sanitario Los Guayabales tiene alrededor de 10 años de operación.

El índice de biodegradabilidad es bajo de solo 0,35 y según Luo et.al. [11] registros entre 0,1 - 0,5 considera que el lixiviado es de tipo intermedio con un índice de biodegradabilidad media. Además reportó baja concentración de metales, con presencia de materiales orgánicos recalcitrantes que son parcialmente estables y biológicamente resistentes.

La Tabla 5 muestra las concentraciones de metales pesados encontrados en caracterizaciones de lixiviados de diferentes rellenos sanitarios del mundo reportados por [12, 13, 9, 14, 15] y los reportes de la caracterización hecha en 2014 a los lixiviados del Relleno Sanitario Los Guayabales de Cúcuta, donde se encontraron las concentraciones del plomo, cromo, hierro en valores intermedios; mientras que los valores para zinc, potasio y sodio se encuentran por

Tabla 5: Presencia de metales pesados en cinco lixiviados de rellenos sanitarios diferentes

Parámetro	Unidad	(Estudio Actual) Relleno Sanitario Guayabales, Cúcuta, 2014.	Vertedero de Guanabacoa, la Habana 2014	Relleno Sanitario Doña Juana, 2011	Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México 2008.	Relleno Sanitario Mérida; Yucatán, México 2002-2003.	Relleno Sanitario el Carrasco, Santander, Colombia. 2001.
Cobre	mg/L Cu	0,51	1,4	0,067	0,19	0,214	0,16
Plomo	mg/L Pb	0,59	0,71	0,23	1,851	0,236	ND
Cromo	mg/L Cr	0,76	0,12	ND	0,827	6,98	0,79
Zinc	mg/L Zn	0,58	6,2	0,59	3,425	3,2	4
Manganeso	mg/L Mn	0,87	ND	0,17	ND	0,81	ND
Hierro total	mg/L Fe	20,19	ND	17,73	21,159	64,05	312,5
Potasio	mg/L K	2381	ND	ND	ND	10252	ND
Sodio	mg/L Na	1056,87	ND	ND	ND	11850	ND
Calcio	mg/L Ca	182,42	ND	ND	ND	ND	ND
Magnesio	mg/L Mg	220,39	ND	ND	ND	ND	ND

debajo de los rangos encontrados; y el manganeso ligeramente por encima de estos valores medios, aclarándose que los análisis de calcio y magnesio no se pudieron comprar.

Torres et al. [1] indica el rango de los valores de los ST para los lixiviados jóvenes, intermedios y maduros, que comparados con los datos del RS los Guayabales clasifican a éste lixiviado como de tipo Intermedio es decir para RS con una edad entre 5–10 años.

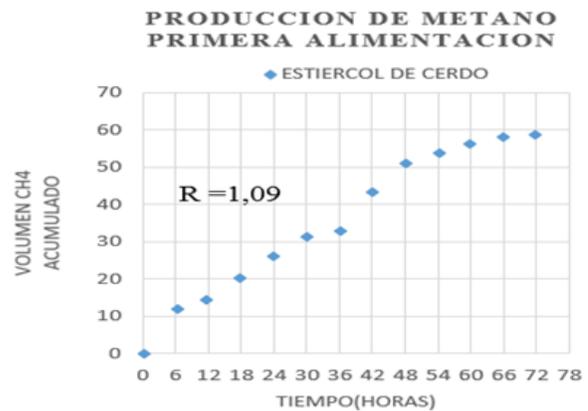


Figura 3: Producción de metano AME1 – Estiércol de cerdo.

Tabla 6: Caracterización de lodos

LODO	SSV mg/L	SST mg/L	SSV/SST mg/L
MACPOLLO	18659	28750	0,65
CAMPOLLO	18150	33350	0,54
PTAR RIO FRIO	14800	24600	0,60
ESTIERCOL CERDO	14550	18590	0,78

Tabla 7: Valores para Ensayo de AME

LODO	AME 1	AME 2	ITEAA	IOAA	2 ITEAA	IOAA < 2 ITEAA	ESTADO
PTAR Macpollo	0,04	0,06	4,70	0,70	9,40	SI	Crecimiento
PTAR Campollo	0,04	0,06	4,70	0,54	9,40	SI	Crecimiento
PTAR Rio Frio	0,04	0,09	4,73	0,97	9,47	SI	Crecimiento
Estiércol de Cerdo	0,05	0,04	4,03	0,22	8,06	SI	Crecimiento

Se caracterizó y se realizó el ensayo de AME para cuatro lodos donde se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 6. La relación de SSV con respecto a SST indica que la biomasa presente en los lodos es alta, que permite buenos rendimientos en la biodegradabilidad de sustratos orgánicos y producción de metano, siendo el estiércol de cerdo el que reportó la mayor SSV/SST = 0,78. La Tabla 7 muestra los resultados de la medición de la AME donde se observa en todos los lodos que la AME se debe a crecimiento bacteriano, siendo la AME 1 la que se debe seleccionar y es el estiércol de cerdo el que reportó la mayor (AME1= 0.05). La Figura 3 detalla la producción de CH₄ durante la medición de la AME1 del estiércol de cerdo.

Los resultados anteriores permitieron seleccionar el estiércol de cerdo como lodo inóculo de los DI-FAFS por ser el que registró mejor AME1, inoculando cada DI-FAFS con un 30 % del volumen en cada una de sus fases. Ver figura 4.

Hecha la inoculación se hizo recircular agua residual con contracciones desde 250 mg/L hasta 800 mg/L de DQO; posteriormente se aclimataron los DI-FAFS mediante la alimentación con una mezcla de agua residual y lixiviados cuyo porcentaje de éstos últimos se fue incrementando en el tiempo, mientras que el porcentaje volumétrico del agua residual se disminuyeron, verificando la concentración del lixiviado mediante ensayos de DQO simultáneos.

Aclimatados los DI-FAFS se inició el tratamiento de lixiviados de manera simultánea con diferentes COV simultáneamente en cada serie y una temperatura inicial de 20°C (baja), que se incrementó a 27°C y por último a 34°C a medida que se lograban condiciones de estado estable, que se media teniendo como variable de control la eficiencia en remoción de la materia orgánica en términos de DQO.

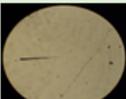
Tabla 8: Eficiencias en los DI-FAFS

T°C	COV								
	3,71			2,76			1,80		
	DI-FAFS 1 EF% 80-20	DI-AFS 2 EF% 50-50	DI-FAFS 3 EF% 20-80	DI-FAFS 1 EF% 80-20	DI-FAFS 2 EF% 50-50	DI-FAFS 3 EF% 20-80	DI-FAFS 1 EF% 80-20	DI-FAFS 2 EF% 50-50	DI-FAFS 3 EF% 20-80
20	27,50	37,50	48,75	40,38	42,31	44,23	31,25	43,75	37,50
27	41,73	53,30	66,45	55,77	63,25	70,00	46,40	52,00	60,45
34	59,42	63,77	65,22	62,26	64,15	72,86	52,94	59,45	68,57

Los resultados en cuanto a eficiencias en cuanto a la remoción de materia orgánica como mg DQO/l en cada DI-FAFS, en las diferentes condiciones de volúmenes, cargas y temperaturas de operación se muestran en la Tabla 8; observándose que las mayores eficiencias se obtuvieron cuando se aplicaron COV entre media y alta, operados entre 27°C y 34°C y con volúmenes no metanogénicos de medios a bajos (20 %Vt - 50 %Vt) y volúmenes metanogénicos de medios a altos (50 %Vt - 80 %Vt), lo que guarda relación con los tiempos de duplicación de los grupos bacterias presentes en cada fase.

La identificación de microorganismos metanogénicos se realizó mediante aislamiento presuntivo con medios selectivos y según características macroscópicas y microscópicas de los microorganismos obtenidos en los bioreactor de flujo ascendente de dos fases (DI-FAFS); los aislados en Barker-Taha (MB) evidenciaron que los crecimientos reportados eran de bacterias con características compatibles con la *Methanobacterium* spp., porque las colonias que crecieron fueron redondas, grandes, pegajosas, brillantes, que toman el color del medio café-traslucidas y la verificación morfológica se dió mediante coloración de Gram. En la Figura 4 con Tinción Gram se visualizan las cepas aisladas, donde en A y B se presenta las colonias obtenidas en el agar MB.

Las características macroscópicas de las colonias obtenidas en el agar Stadtman-Barker (MC) para *Methanococcus* spp mostraron la presencia de colonias puntiformes, pequeñas de color azul, en tinción Gram cocos, diplococos disformes Gram (-) como se muestra en la Figura 4 de Tinción Gram para las cepas aisladas; donde las

	MEDIO MB	MEDIO MC
1 Muestreo	Bacilos Gram(+) 	Cocos Gram(-) 
2 Muestreo	Bacilos Gram(+)	Diplococos Gram(-)
3 Muestreo	Bacilos Gram(+)	Cocos Gram(-)

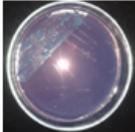
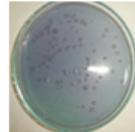
A	C
	
B	D
	

Figura 4: Tinción Gram para las cepas aisladas y cultivos

C y D corresponden a las colonias obtenidas en el agar MC.

	BACTERIAS TOTALES	SPS
1 MUESTREO	Coco Bacilos Gram(-)	Bacilos esporulados Gram(+)

E	F	G	H
			

Figura 5: Tinción Gram para cepas aisladas totales, mesófilos anaerobios y sus cultivos

En la prueba de aislamiento e identificación presuntiva de anaerobios totales y mesófilos totales, se utilizó un medio para bacterias totales y el aislamiento de las colonias se realizó en agar nutritivo más glucosa con una posterior tinción de Gram para la diferenciación bacteriana. Características microscópicas: Coco bacilos Gram-negativos; Características macroscópicas: Colonias amarillas claras, pequeñas, brillantes y cremosas, de bordes lisos y convexas (Ver Figura 5 E-F-G-H).

Para los anaerobios mesófilos totales se evidenció crecimiento de colonias en agar SPS, de color negro, anaerobias, con producción de gas, seca y opaca, que correspondía presuntivamente a *Clostridium* spp considerado como un patógeno humano; el aislamiento de las colonias se realizó en agar nutritivo más glucosa con posterior tinción de Gram para la diferenciación bacteriana (Ver Figura 5 E-F-G-H), microorganismos ampliamente distribuidos en el medio ambiente, que se puede encontrar como un componente normal de la vegetación en descomposición, sedimentos marinos, tracto intestinal de los seres humanos y otros vertebrados, y el suelo; las esporas del microorganismo persisten en el suelo, sedimentos y las zonas con contaminación fecal humana o animal, siendo muy resistentes al calor, puesto que han reportado que pueden sobrevivir a la ebullición durante varias horas; en general los *Clostridium* spp puede crecer a temperaturas entre 15–50°C, y valores de pH entre 5.0–8.0.

El uso del medio selectivo y de enriquecimientos entre medios líquidos y sólidos, resultado efectivo para el aislamiento de bacterias utilizadoras de formato, metanol, metal-aminas o acetato, obteniendo al final del proceso de aislamiento en medios selectivos, dos bacterias morfológicamente distintas, un bacilo Gram+ y un coco Gram+.

Para las pruebas bioquímicas confirmativas realizadas para las bacterias, contrastadas con las bioquímicas teóricas tomada de una cepa de referencia *Methanococcus deltae* (ATCC) # 35294 y *Methanobacterium ruminantium* (ATCC) # 35063; según los resultados del aislamiento hecho a las muestras de los DI-FAFS en estudio, se aplicó un porcentaje de afinidad contrastando los resultados prácticos con los teóricos, de donde se obtuvo una relación en cuanto al resultado para *Methanobacterium* spp del 88.8 % que corresponde a una alta tasa de identificación de este género, de igual manera para *Methanococcus* spp se obtuvo un porcentaje de afinidad del 77.7 % lo que indica que probablemente se encuentra ese microorganismo, siendo necesario aplicar más adelante pruebas de identificación más específicas, para así establecer con exactitud la caracterización de los microorganismos.

Las pruebas de motilidad RM/VP (+/-) y H₂S negativas, asociadas a la estricta anaerobiosis y a la incapacidad para reducir nitratos, aportaron las primeras señales bioquímicas a la posible identificación de las cepas aisladas como bacterias celulíticas ruminales anaerobias totales que comparando los patrones de fermentación de carbohidratos se observaron que las características bioquímicas de la cepa corresponden a la ya reportada bacteria *Ruminococcus aslbus*.

Las cepas aisladas en este estudio, se compararon con los patrones de clasificación establecidos por el Laboratorio de Referencia para Anaerobios, para lo cual la morfología aislada en el medio AT arrojó un porcentaje de afinidad del 88,8 % mostrando una alta tasa de identificación y por consiguiente para el medio SPS la bacteria aislada para este caso evidenció un alto porcentaje plenamente identificable con la cepa *Clostridium* spp, mostrando una afinidad del 100 % por la misma, pero aclarando que fueron necesarios estudios posteriores de identificación para ambos microorganismos aislados con el fin de verificar su identificación con más exactitud.

Para medir la producción de CH₄ se realizó primero la cuantificación de la población microbiana presente en cada punto, para tener valor de la biota metanogénica presente en cada sitio de muestreo, obteniéndose en biodigestor 1, punto de muestreo 1 o (V_1P_1) = 23×10^3 UFC/ml de sustrato; en el V_2P_1 = 12×10^3 UFC/ml de sustrato y en el V_3P_1 = 85×10^1 UFC/ml de sustrato y luego se procedió a medir la capacidad metabólica de los microorganismos para producir metano, verificando el aumento del volumen desplazado del KOH en las probetas, que es directamente proporcional al gas producido por los microorganismos aislados en este caso de los *Methanococcus* spp y *Methanobacterium* spp.

La medición de la producción metabólica de gas metano, se le realizó a los inóculos provenientes de los 9 puntos de muestreo de cada bioreactor fase metanogénica y mediante el armado, disposición y uso de los elementos que componían el sistema de medición de producción de metano conformado por 9 tubos \times 150 mm con desprendimiento lateral, tapones de algodón con parafina, mangueras en

látex de 20 cm y beaker de 50 ml más los tubos de centrifugación de 13 ml, muestras que se depositaron en los tubos que contenían una solución A (0.1 % NH₄Cl, 0.04 % K₂HPO₄, 0.01 % MgCl₂, 2 % acetato de calcio, y 1 % metanol, pH 7.0), luego se sumergieron los Tubo II en solución de 0.1N KOH, para recoger el CH₄ producido y por desplazamiento de la solución que se midió a diferentes temperaturas en cada muestra (20, 27 y 34°C), realizándoles seguimiento durante 8 días continuos.

Se observó que tanto la actividad biológica y la producción de gas aumenta con la temperatura; por lo que al no generarse calor en el proceso, la temperatura deberá ser lograda y mantenida mediante energía exterior, teniendo mucho cuidado con la mayor sensibilidad que presentan las bacterias termofílicas a las pequeñas variaciones de temperatura, ya que éstas bacterias intervinientes pertenecen a la fase metanogénica, comienzan a optimizar el funcionamiento como tal a medida que sube la temperatura y a producir biogás; no obstante cabe aclarar que dicha formación de metano se da a una baja tasa de producción.



Figura 6: Producción microbiológica de metano a 20°C.



Figura 7: Producción microbiológica de metano a 27°C.

Las Figuras 6, 7 y 8 muestran la producción de CH₄ a diferentes temperaturas y en ellas se determina que la menor producción de metano

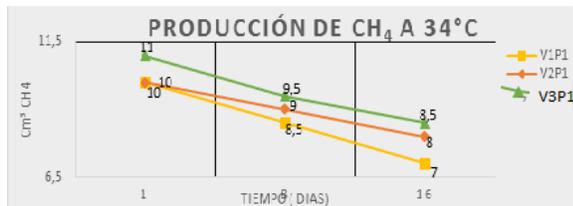


Figura 8: Producción microbiológica de metano a 34°C.

está relacionada con bajas temperaturas, esto teniendo en cuenta que la población microbiana metanogénica presente en el sistema productora de gas metano son de índole mesófilas, en la que su actividad metabólica comienza alrededor de 27°C alcanzando la temperatura óptima a los 34°C.

Aquí para mejorar la remoción de la materia orgánica y por ende la producción de biogás (metano) en el reactor anaerobio se trató de operar con una temperatura de 34°C (temperatura óptima para la reacción anaerobia) arrojando valores más significativos que indica que la variación con relación a las 2 primeras temperaturas 20°C y 27°C se explica debido a que se realizó bajo condiciones donde la población metanógena presente metabólicamente no estaba completamente activa, siendo la temperatura un factor determinante para la producción de metano, factor determinante en el arranque del sistema como tal.

Existen varios mecanismos mediante los cuales se puede describir la oxidación de la materia orgánica en un consorcio microbiano; siendo cuatro las etapas que ya están bien definidas, de reacción de acuerdo con los microorganismos presentes en el sistema, dándole a la etapa de la metanogénesis la mayor relevancia por ser la más prolongada en el tiempo y donde ocurren los cambios más notables de transformación.

Inicialmente se puede establecer según los datos obtenidos, un crecimiento lento de *Methanobacterium spp* analizado bajo esta condición de temperatura, mostrando así su mejor actividad metabólica es transcurrida las 24 horas, con una población inicial de $4,07 \times 10^9$ una tasa máxima de crecimiento de $1,7 \times 10^7$ UFC/ml, y con una población final de $5,6 \times 10^9$ UFC/ml, lo que muestra que el factor temperatura es un límite donde las

proteínas y ácidos nucleicos se pueden inactivar de manera reversible, y por ende a más bajas temperaturas este tipo de microorganismos limitan su crecimiento.

Para cada microorganismo existe una temperatura mínima por debajo de la cual no tiene lugar la proliferación o éste manifiesta en un crecimiento retardado como sucede este caso con la temperatura de 20°C, factor que influye en el desarrollo metabólico, haciendo de este sea un proceso aletargado; inicialmente se partió de una población inicial de $4,1 \times 10^9$ UFC/ml, manifestando una tasa de crecimiento de $1,8 \times 10^8$ UFC/ml y una población final de $4,1 \times 10^9$ UFC/ml de acuerdo a los valores anteriores, porque esta bacteria tuvo un comportamiento poco significativo, mostrando el mayor punto de desarrollo metabólico en un periodo de incubación de 24 horas con referencia al crecimiento de *Methanobacterium spp*; este comportamiento sugiere que los organismos no estaban trabajando a temperatura óptima.

A medida que la temperatura aumenta a 27°C, se incrementan como también las reacciones enzimáticas y la tasa de reproducción, por lo que al emplear una temperatura cercana a su punto óptimo de crecimiento estas bacterias aceleran su metabolismo y la curva de crecimiento traza un comportamiento más simoidal; partiendo de una población inicial de $5,3 \times 10^9$ UFC/ml, con una tasa máxima de crecimiento en su fase exponencial de 9×10^9 UFC/ml llegando a una población final de $5,8 \times 10^9$, demostrando que ya la bacteria en estudio comienza a favorecerse para la proliferación debido a que comienza la actividad metabólica ya un poco más acelerada, con una mayor proliferación que *Methanobacterium spp* partiendo con una población inicial de $5,4 \times 10^{10}$, mostrando una tasa máxima de crecimiento de $1,5 \times 10^8$ y llegando a una población final de $6,0 \times 10^9$, que coloca al *Methanococcus spp* en mejores términos de adaptación y crecimiento en estos procesos anaerobios como mejor alternativa en la fase Metanogénica.

Aun cuando la biota anaerobia puede crecer en un amplio rango de temperaturas, en este estudio se ha realizado la cinética a tres valores de temperaturas diferentes dentro del rango mesófilo;

como se sabe, ésta es una de las variables ambientales primordiales, ya que dicta los límites de viabilidad del proceso pues afecta a todos los microorganismos de manera diferente llegando incluso a lesionar la integridad celular de la población microbiana.

Experimentalmente observó además, que la actividad del consorcio bacteriano a 34°C está en el punto óptimo de crecimiento; no obstante, el comportamiento es en general el más activo de las cinéticas aquí analizadas, ya que pese a haber mostrado en pocos días de actividad, la cantidad poblacional de microorganismos resultaron ser las más importantes de todos los ensayos realizados, llegando a ser al final de 14×10^4 UFC/ml, demostrando un nivel efectivo de este microorganismo en la fase metanogénica que conlleva a una muy buena biodegradación de la materia al interior de este tipo de procesos.

Los efectos de la temperatura mesofílica para el proceso cinético durante la fase metabólicas referente al crecimiento de dichos consorcios microbianos experimentados a temperaturas comprendidas entre 27°C y 34°C, muestran una alta tasa de crecimiento poblacional en comparación con los operados a temperaturas bajas de 20°C, donde muestran una tendencia en cuanto a la multiplicación de este tipo de microorganismos bastante lenta, concluyéndose que tanto la temperatura como las condiciones estrictas de anaerobiosis, juegan un papel fundamental en este tipo de bacterias, en cuanto a la activación metabólica de estos se refiere, haciendo de la temperatura una de las variables más eficaz para tener en cuenta en este tipo de procesos anaerobios, si se quiere conseguir una producción óptima de la biomasa.

Antes de incorporar modelos de crecimiento microbiano en evaluaciones cuantitativas se debe considerar la validez de las investigaciones, ya que no todos los modelos están validados bajo condiciones reales, por lo que resultaría incorrecto suponer que las predicciones del modelo son correctas, si los puntos estimados son reemplazados por distribuciones de probabilidad en los parámetros que constituyen las variables de entrada del modelo.

El procesamiento estadístico en esta investi-

gación se realizó aplicando la metodología de superficies de respuesta (MSR) como estrategia experimental y de análisis matemático y estadístico, que permitió encontrar las condiciones óptimas de operación de los DI-FAFS, donde la variable dependiente fue la eficiencia (variable cuantitativa) y los factores fueron tres: la temperatura con tres niveles (20, 27, 34°C); la distribución volumétrica de los reactores con tres niveles (20, 50, 80 %) y la carga COV aplicada, con niveles factoriales de 1.80, 2.76 y 3,71 kg DQO/m³-dia.

Tabla 9: Resumen las variables estadísticas descriptivas

Design Summary											
File Version 9.0.6.2											
Study Type Response Surface											
Design Type Central Composite											
Design Mode Quadratic											
Runs 27											
Blocks No Blocks											
Factor	Name	Units	Type	Subtype	Minimum	Maximum	Coded Values	Mean	Std. Dev.		
A	Temperatura	°cent	Numeric	Continuous	20	34	-1.000+20	1.000+34	27	5.82435	
B	COV	Kg/m ³ dia	Numeric	Continuous	1.8	3.71	-1.000+1.8	1.000+3.71	2.75667	0.794612	
C	Volumen	%	Numeric	Continuous	20	80	-1.000+20	1.000+80	50	24.9615	
Response	Name	Units	Obs	Analysis	Minimum	Maximum	Mean	Std. Dev.	Ratio	Trans	Model
R1	Eficiencia	%	27	Polynomial	27.5	72.86	53.0059	12.5004	2.84945	None	Quadratic

Tabla 10: Valores infladores de la varianza

Term	StdErr1	VIF	Ri-Squared	Power at 5% alpha level to detect signal/noise ratios of		
				0.5 Std. Dev.	1 Std. Dev.	2 Std. Dev.
A	0.24	1.00	0.0000	17.0 %	51.6 %	97.9 %
B	0.24	1.00	0.0000	17.0 %	51.6 %	97.9 %
C	0.24	1.00	0.0000	17.0 %	51.6 %	97.9 %
AB	0.29	1.00	0.0000	12.9 %	37.3 %	90.4 %
AC	0.29	1.00	0.0000	12.9 %	37.3 %	90.4 %
BC	0.29	1.00	0.0000	12.9 %	37.3 %	90.4 %
A ²	0.41	1.00	0.0000	21.2 %	63.7 %	99.6 %
B ²	0.41	1.00	0.0000	21.2 %	63.7 %	99.6 %
C ²	0.41	1.00	0.0000	21.2 %	63.7 %	99.6 %

La Tabla 9 presenta el resumen de las variables empleadas en el análisis estadístico desarrollado a través del software Design Expert que genera una matriz de diseño, que evalúa las superficies de respuesta, según la información suministrada en cada factor. En la Tabla 10 se observan los valores obtenidos del VIF a través de design expert, donde los errores estándar son asimilados como un tipo de coeficiente, de tal manera que entre más pequeño y cercanos a uno del coeficiente de correlación entre las variables independientes significa que las variables están más correlacionadas entre sí, así que los VIF deben ser iguales a 1.0 pues cuando son superiores a 10 son motivo

de alarma y los resultados estadísticos serán inútiles, es decir, significa esto que hay problemas de multicolinealidad, pero aquí se muestra la existencia de multicolinealidad, es decir que la variable indendientes presentan comportamiento lineal con los demas factores del diseño.

Tabla 11: Resultados de la regresión

Summary (detailed tables shown below)					
	Sequential	Lack of Fit	Adjusted	Predicted	
Source	p-value	p-value	R-Squared	R-Squared	
Linear	< 0.0001		0.7987	0.7590	
2FI	0.8752		0.7761	0.6503	
<u>Quadratic</u>	<u>0.0012</u>		<u>0.8937</u>	<u>0.7970</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	0.1118		0.9309	0.7634	Aliased

La Tabla 11 presenta los resultados de la regresión, lineal, cuadrática y cúbica, donde el mismo software Design Exper sugiere ajustar a un modelo de segundo orden o modelo cuadrático a fin de para calcular la eficiencia óptima con las variables independientes; se observa el valor de R^2 del 89,37 % y un p -valor ($p < 0,05$), indicando que las variables COV, Temperatura y Volumen modifican los valores de la eficiencia. Además, presenta un posible modelo aliado que es el polinomio cúbico.

Tabla 12: Estadísticas resumidas del modelo - Regresión lineal según modelos valorados

Model Summary Statistics						
Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	5.61	0.8219	0.7987	0.7590	979.23	
2FI	5.91	0.8278	0.7761	0.6503	1420.60	
<u>Quadratic</u>	<u>4.08</u>	<u>0.9305</u>	<u>0.8937</u>	<u>0.7970</u>	<u>824.57</u>	<u>Suggested</u>
Cubic	3.29	0.9734	0.9309	0.7634	961.05	Aliased

Model Summary Statistics: Focus on the model maximizing the "Adjusted R-Squared" and the "Predicted R-Squared".

En regresión lineal según de modelos valorados, cuyos resultados se presentan en la Tabla 12 confirman el modelado de las variables a través de un polinomio cuadrático, donde las variables independientes están haciendo variar a la eficiencia en

un 89.37 % y se estima que el R^2 estimado iría a ser de aproximadamente el 79.70 % indicando una alta confiabilidad del modelo que tiene la particularidad que se enfoca en el modelo que minimiza la suma de cuadrados del error predichas "PRESS" con el menor valor y el mayor valor de R^2 ajustado.

Tabla 13: Resultados estadísticos de la ANOVA - Superficie de respuestas del modelo cuadrático

ANOVA for Response Surface Quadratic model						
Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]						
Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F	p-value	Prob > F
Model	3780.38	9	420.04	25.29	< 0.0001	significant
A-Temperatu	2578.90	1	2578.90	155.26	< 0.0001	
B-COV	7.13	1	7.13	0.43	0.5211	
C-Volumen	751.92	1	751.92	45.27	< 0.0001	
AB	3.21	1	3.21	0.19	0.6659	
AC	0.039	1	0.039	2.320E-003	0.9621	
BC	20.77	1	20.77	1.25	0.2790	
A ²	173.85	1	173.85	10.47	0.0049	
B ²	242.40	1	242.40	14.59	0.0014	
C ²	0.98	1	0.98	0.059	0.8109	
Residual	282.37	17	16.61			
Cor Total	4062.75	26				

Std. Dev.	4.08	R-Squared	0.9305
Mean	53.01	Adj R-Squared	0.8937
C.V. %	7.69	Pred R-Square	0.7970
PRESS	824.57	Adeq Precisor	17.916

La Tabla 13 presenta los valores ANOVA para los datos evaluados en según la superficie de respuestas del modelo cuadrático. Se confirmó que el modelo es significativo con un (p -valor $< 5\%$) con los factores temperatura, volumen y COV. Individualmente se observó que los factores Temperatura y Volumen son también significativos pero el factor COV no lo es. El R^2 es de 0.8937 y el R de predicción es de 0.7970 un poco menor pero en general se puede afirmar que en el 89.37 % los factores están haciendo variar la eficiencia.

La ecuación en términos de factores codificados se puede utilizar para hacer predicciones sobre la respuesta dando niveles de cada factor. El modelo cuadrático para la investigación es

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum \sum \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon.$$

Reemplazando los factores codificados obtenidos a través del programa Design Expert se tiene que la ecuación para la Eficiencia que permite

Tabla 14: Resultados estadísticos de la ANOVA - Superficie de respuestas del modelo cuadrático

Factor	Coefficient		Standard Error	95% CI		VIF
	Estimate	df		Low	High	
Intercept	61.10	1	2.08	56.72	65.48	
A-Temperatura	11.97	1	0.96	9.94	14.00	1.00
B-COV	0.63	1	0.96	-1.40	2.66	1.00
C-Volumen	6.46	1	0.96	4.44	8.49	1.00
AB	0.52	1	1.18	-1.97	3.00	1.00
AC	0.057	1	1.18	-2.43	2.54	1.00
BC	1.32	1	1.18	-1.17	3.80	1.00
A ²	-5.38	1	1.66	-8.89	-1.87	1.00
B ²	-6.36	1	1.66	-9.87	-2.85	1.00
C ²	-0.40	1	1.66	-3.91	3.11	1.00

realizar predicciones sobre la respuesta dados los niveles de cada factor, donde se obtuvieron los siguientes coeficientes (Tabla 17): término independiente = +61,10; $A = +11,97$; $B = +0,63$; $C = +6,46$; $AB = +0,52$; $AC = +0,057$; $BC = +1,32$; $A^2 = -5,38$; $B^2 = -6,36$; $C^2 = -0,40$, valores que permitió plantear la ecuación

$$E = 61,1 + 11,97T + 0,63COV + 6,46V + 0,52T \times COV + 0,057T \times V + 1,32COV \times V - 5,38T^2 - 6,36COV^2 - 0,40V^2.$$

Con los factores y los valores máximos y mínimos de cada uno de los niveles estudiados, finalmente se realizaron 75 ejecuciones que el mismo programa estadístico hizo para los datos suministrados y las figura 8 y 9 muestran los resultados de la MSR para la eficiencia en relación de la carga COV, Temperatura y Volumen, siendo el valor de la eficiencia teórica máxima del 74 % con un volumen de reactor metanogénico del alto, carga orgánica volumétrica media y una temperatura alta de 34°C.

4. Conclusiones.

Los lixiviados provenientes de Relleno Sanitario RS Los Guayabales de Cúcuta es Tipo 3 (Intermedio), que pueden ser tratados por un sistema biológico anaerobio y los DI-FAFS dada las ventajas técnico-económicas lo convierten en

un sistema viable, siempre que se puedan controlar las variables que influyen en el proceso (COV, temperatura) y el pH entre otros logra remociones QDO > 72 %.

Para los DI-FAFS mediante software estadístico del Método de Superficie de Respuesta se confirmó que a 34°C, con Volumen metanogénico del 80 % y una COV aplicada de 2,9 Kg DQO/m³-día se logra una remoción de 74 %DQO.

En los DI-FAFS se comprobó que a temperaturas mayores a $\geq 27^\circ\text{C}$ pueden lograr eficiencias $\geq 70\%$ en la remoción materia orgánica en términos de DQO.

Se comprobó también que en los DI-FAFS con una COV de 2.76 Kg DQO/m³-día se pueden lograr eficiencias en la remoción de DQO $\geq 70\%$ con volúmenes de las fases No Metanogénicos entre el 70 - 80 % y cuando las fases metanogénicos ocupen volúmenes que oscilen entre el 20 y el 30 % del volumen total del reactor a temperaturas > 20°C.

Se muestras tomadas en los DI-FAFS se aisló una población de bacterias identificadas como *Methanobacterium* spp y *Methanococcus* spp presuntivamente identificada con un porcentaje de confiabilidad del 88.8 % y 77.7 % a partir de las pruebas bioquímicas convencionales utilizadas para este estudio.

Los valores empleados en el medio de cultivo anaerobio y selectivo fueron establecidos en concentraciones de formato, 15gr/1000ml y líquido ruminal 300ml/1L.

La velocidad de producción de metano y la concentración poblacional de bacterias metanogénicas en el sistema, estableció que a temperaturas mayores a 27 ° C, presenta mejores resultados en cuanto a eficiencia del sistema hablando en términos de actividad metabólica y por ende remoción de materia orgánica en términos de DQO.

Al procesar los resultados obtenidos por la Metodología de la Superficie de Respuesta, se muestra que la eficiencia depende de la carga COV, Temperatura y del Volumen, siendo el valor de la eficiencia teórica máxima del 74 % con un volumen de reactor metanogénico del alto (80 %), COV media (2.76 Kg DQO/l) y una temperatura

alta de 34°C.

La conclusión más importante es que la construcción de los DI-FAFS se puede realizar con volúmenes de las fases No Metanogénicos del 20 % del volumen total del reactor y los metanogénicos con volúmenes del 80 % *Vt del reactor.

Referencias

- [1] Patricia Torres-Lozada, Luz Edith Barba-Ho, César Ojeda, Jonier Martínez, and Yuliet Castaño. Influence of leachates age on its physico-chemical composition and toxicity potential. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1):245–255, 2014.
- [2] Alexander Álvarez Contreras, John Hermógenes Suárez Gelvez, and Hermógenes Suarez. Tratamiento biológico del lixiviado generado en el relleno sanitario “El Guayabal” de la ciudad San José de Cúcuta. *Ingeniería y Desarrollo*, 20:95–105, 2006.
- [3] Patricia Torres Lozada. Impacto de la incorporación de lixiviados en el arranque de reactores anaerobios al tratar aguas residuales domésticas. *Ingeniería y Universidad*, 14(2):313–326, 2011.
- [4] A Cohen. Two-phase digestion of liquid and solid wastes. In *Proceedings of the Third International Symposium on Anaerobic Digestion*, page 123, Boston, Massachusetts, 1983. Water Network Research.
- [5] Jairo A Romero Rojas. *Tratamiento de aguas residuales, teoría y principios de diseño*. Escuela Colombiana de Ingenieros, 2004. Primera edición, reimpressa.
- [6] Jim Field. *Arranque y Operacion de Sistemas de Flujo Ascendente con Manto de Lodo (UASB): Manual del Curso*, chapter Medición de parámetros en reactores del manto de lodos anaeróbicos de flujo ascendente. Corporación Autónoma Regional del Cauca, Universidad del Valle – Cali, Colombia & Universidad Agrícola de Wageningen – Wageningen, NL, 1987.
- [7] Julio Isaac Maldonado. Evaluación de un sistema de tratamiento para aguas residuales de matadero. Trabajo de grado de maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 1993.
- [8] APHA, AWWA, WPCF, Madrid. *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*, 1992. Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- [9] H Nájera, J Castañón, J Figueroa, and M Rojas-Valencia. Caracterización y tratamiento fisicoquímico de lixiviados maduros producidos en el sitio de disposición final de Tuxtla Gutiérrez. In *II Simposio Iberoamericano de Residuos de Residuos*, Barranquilla, Colombia, septiembre 2009. REDISA, Red de Ingeniería en Sanamiento Ambiental, Universidad del Norte, Comombia.
- [10] Patricia Mendoza Salgado and Valentina López Trujillo. Estudio de la calidad de lixiviado del relleno sanitario la esmeralda y su respuesta bajo tratamiento en filtro anaerobio de flujo ascendente piloto. Trabajo especial de grado, Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Sede de Manizalez, Universidad Nacional de Colombia, Manizalez, Colombia, 2004. Directores: Adela Londoño Carvajal y Nelson Gonzalez Hoyos.
- [11] Jinhuan Luo, Guangren Qian, Jianyong Liu, and Zhi Ping Xu. Anaerobic methanogenesis of fresh leachate from municipal solid waste: A brief review on current progress. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49:21–28, 2015.
- [12] Alexis Pellón Arrechea, Matilde López Torres, María del Carmen Espinosa Lloréns, and Orestes González Díaz. Propuesta para tratamiento de lixiviados en un vertedero de residuos sólidos urbanos. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 36(2):3–16, 2015.
- [13] Diana Lucía Cristancho Montenegro. Estimación del efecto del lixiviado del relleno sanitario doña juana sobre la calidad del agua del río tunjuelo y su posible tratamiento en la PTAR Canoas. Trabajo especial de grado, Resiliencia y Saneamiento – RESA, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2013. Directores: Carlos Julio Collazos Chávez y Héctor Collazos.
- [14] Roger Iván Méndez Novelo, Elba René Castillo Borges, María Rosa Sauri Riancho, Carlos Alberto Quintal Franco, Germán Giacomán Vallejos, and Blanca Jiménez Cisneros. Comparación de cuatro tratamientos fisicoquímicos de lixiviados. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3):133–145, 2009.
- [15] Oscar Dario Guarín Villamizar and Sandra Milena Gómez Plata. Caracterización e implementación de un método fisicoquímico para el tratamiento del lixiviado proveniente del relleno sanitario el carrasco. *Innovaciencia*, 1(1):23–29, 2013.

Student schedule generation with option selection at a university engineering faculty

Demetrio Rey^{*,a}, Luis Llave^a, Enrique Flores^a, Víctor Barrios^a, Braulio De Abreu^a, José L. Nazar^b

^a*Instituto de Matemáticas y Cálculo Aplicado (IMYCA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo*

^b*Decanato, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo. Valencia, Venezuela*

Abstract.-

In this paper we describe the solution algorithm for the real problem of the student schedule generation at the College of Engineering at University of Carabobo. Our approach is to allow the students to pick three complete schedules in preference order. Later, our schedule generator program will try to find a schedule equal to any of the options selected, or otherwise provide the best possible schedule. To this end, a constraint satisfiability strategy divided in multiple passes is applied. For datasets considered, we found that our solution yields 100 % efficacy in obtaining schedules for all students, 98.8 % of schedules without overlap, 98.2 % of schedules with all requested courses assigned, and 74 % of satisfactory schedules with 44 % identical to one of the options. We also found that the strategy of student-constructed schedule options partially solves the scheduling problem in relatively short execution time. The program that implements the discussed algorithm has been used successfully since 2013 up to date.

Keywords: student schedule generation; option selection; constraint satisfiability problem

Asignación de horarios estudiantiles con selección de opciones en una facultad universitaria de ingeniería

Resumen.-

En este trabajo describimos el algoritmo solución al problema real de asignación de horarios estudiantiles en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo. El mismo consiste en permitir a los estudiantes seleccionar 3 opciones de horarios en orden de preferencia, y posteriormente el programa generador de horarios trata de encontrar un horario igual o aproximado a alguno de los solicitados. Para ello, se aplica una estrategia de satisfacción de restricciones, subdividida en fases sucesivas. En los semestres considerados en este trabajo, el resultado obtenido tiene una eficacia de 100 % de la población estudiantil con horarios asignados, 98,8 % de los horarios sin coincidencias, 98,2 % con todas las materias solicitadas, y 74 % of horarios satisfactorios con 44 % idénticos a una de las opciones solicitadas. Adicionalmente, encontramos que la estrategia de selección de opciones de horario resuelve parcialmente el problema planteado en un corto tiempo de ejecución. La versión definitiva del programa que implementa el algoritmo ha sido utilizada exitosamente en esta institución desde el año 2013 hasta la actualidad.

Palabras clave: asignación de horarios estudiantiles; selección de opciones; problema de satisfacción de restricciones

Recibido: noviembre 2016

Aceptado: enero 2017

1. Introducción

La asignación óptima de horarios de clase para los alumnos de una institución educativa, es un problema que suscita mucho interés científico, dado su inherente complejidad computacional y la

*Autor para correspondencia

Correo-e: demetrio.rey@gmail.com (Demetrio Rey)

gran demanda que tiene su aplicación por parte de las diferentes entidades de educación a cualquier nivel.

El tema de la asignación de horarios comprende, entre otros, dos aspectos principales. Primero, el problema del diseño de la oferta académica (en inglés: *Course Timetabling Problem, CTP*); y segundo, la asignación de estudiantes a las secciones de secciones disponibles en la oferta académica, llamado SSP por sus siglas en inglés (*Student Scheduling Problem*) [1].

El CTP consiste en corresponder las materias a impartir en un período académico, con los profesores, horarios y salones de clase disponibles. Este problema en sí mismo, es objeto de intensa investigación, que ha resultado en las mas diversas estrategias de solución [2, 3].

El problema objeto de este trabajo, SSP, es la asignación de alumnos a las materias solicitadas al momento de la inscripción, de acuerdo a la oferta académica existente. En instituciones educativas con gran número de estudiantes, las materias están subdivididas en secciones. El SSP consiste en asignar a los estudiantes a las secciones de las materias que hayan solicitado [4]. Los horarios resultantes no deben tener coincidencias, deben satisfacer las necesidades del alumno en cuando al estudio y tiempo disponible; y al mismo tiempo, satisfacer los requerimientos de las cátedras, en cuanto a disponibilidad de cupo y balanceo de secciones.

Se toma como objeto de estudio la solución dada al SSP en la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, una facultad de gran matriculación que ofrece 6 carreras de Ingeniería y cuenta con aproximadamente 9500 estudiantes activos.

2. El SSP

El SSP es una variación del problema de satisfacción de restricciones (*Constraint Satisfaction Problem, CSP*) [4]. El CSP consiste en un conjunto de variables $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, sus dominios asociados D_1, D_2, \dots, D_n , y un conjunto de restricciones en dichas variables. En el SSP, el conjunto V son las materias solicitadas por el

estudiante, y D_i son las diferentes secciones de la oferta académica. El SSP consiste en etiquetar cada materia con una sección disponible. Las restricciones consisten en elegir secciones compatibles (sin coincidencia de horarios), que tengan asientos disponibles (cupos), y otras adicionales que requiera el plan de estudios. El SSP es NP-completo [5].

Existen problemas parecidos al SSP, tal como la asignación de secciones tutoriales y secciones de laboratorio a partir de las secciones de materias teóricas [6], que utilizan estrategias de solución similares al SSP y por lo tanto son consideradas en este trabajo.

Encontrar la solución óptima para el SSP y sus problemas derivados requiere de una búsqueda en un espacio-solución de tamaño combinatorial, la cual se repite tantas veces como estudiantes necesiten asignación. Una búsqueda exhaustiva en tal espacio solución sería impráctica. Por lo tanto, las diversas soluciones propuestas utilizan heurísticas para lograr un resultado en corto tiempo que, aunque no óptimo, es suficientemente satisfactorio. Las heurísticas utilizadas pueden ser tanto de bajo nivel, como metaheurísticas e hiperheurísticas.

Entre los métodos utilizados para resolver el SSP encontramos el algoritmo húngaro [7], hiperheurísticas generadoras de heurísticas de bajo nivel [6], tiempo real [8], y el algoritmo de búsqueda iterativa hacia adelante [9, 3].

2.1. El SSP y la Oferta Académica

El SSP está relacionado con la construcción de la oferta académica (*Course Timetabling Problem, CTP*). Una solución satisfactoria del CTP, permite una mejor resultado del SSP. Algunas iniciativas resuelven SSP posteriormente a CTP [7, 6, 10], mientras que otras tratan de resolver SSP y CTP simultáneamente [9, 11, 12].

3. Facultad de Ingeniería UC

La Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo (FIUC), objeto de estudio en este trabajo, consta de 6 escuelas y un departamento de estudios básicos. Los períodos académicos

son semestrales y se rige por un sistema abierto de prelacones, donde cada carrera tiene una duración nominal de 10 semestres. En los primeros semestres (1 al 4) se ofrecen materias comunes a más de una carrera, y a partir del semestre 5, se ofrecen las materias obligatorias de la escuelas. En los semestres finales (8, 9, 10) se cursan las materias electivas y el proyecto final de grado.

La matriculación promedio de la FIUC en recientes semestres ha sido de 9432 alumnos [13], lo cual la hace una facultad de gran matriculación. Por tal razón, las materias básicas y obligatorias tienen típicamente dos o mas secciones.

Previo al proceso de inscripción, la Dirección de Asuntos Estudiantiles (DAE) junto con las Comisiones de Horario de cada escuela, elaboran la oferta académica, consistente en un promedio de 270 asignaturas y 1239 secciones [13]. Las asignaturas de los primeros semestres están divididas en decenas de secciones. A medida que se progresa en la carrera, el número de secciones decrece, hasta llegar a secciones únicas en los últimos semestres.

3.1. Proceso de Inscripción

Durante el período de inscripciones (generalmente de 3 a 5 días), los estudiantes proceden a solicitar materias en el sistema Web de la DAE, donde constata el cumplimiento de prelacones. Los estudiantes pueden hacer su solicitud de inscripción en cualquier momento del período, dado que no se toma en cuenta el momento en que son registradas en el sistema.

Una vez cerrado el período, la oferta académica y las solicitudes son preparadas para servir de insumo al programa de asignación.

3.2. Objetivos y Restricciones

Los requerimientos del proceso de asignación los subdividimos en objetivos generales y restricciones.

Objetivos Generales. Son metas que deben ser cumplidas por la solución global, son exigidas por la institución y deben ser obligatoriamente cumplidas

G₁ Asignar horarios al 100 % de los estudiantes participantes en el proceso inscripción.

G₂ Uniformar el número de alumnos asignados por sección para cada materia.

Restricciones. Son aquellos requerimientos que deben ser cumplidos por cada horario solución. A continuación los requerimientos ordenados de mayor a menor según su prioridad

R₁ No permitir coincidencias de hora entre dos materias.

R₂ Asignar sección a todas las materias solicitadas por el estudiante.

R₃ Respetar una hora libre para el almuerzo en un intervalo (+1, -1) alrededor de las 12m.

R₄ Número de alumnos $N_{i,j}$ asignados por sección s_j de cada materia m_i no debe exceder cupo máximo c_i .

R₅ Cumplimiento de alguna de las 3 opciones de horario.

Estas restricciones serán cumplidas en lo posible, serán sucesivamente levantadas para llegar a la generación de todos los horarios. Al levantar la restricción R_1 , en aquellos pocos casos donde esto no sea posible cumplirla, sólo se permitirá una hora de coincidencia por alumno.

4. Solución al SSP en la FIUC

La solución para el problema de asignación planteado, se fundamentó en permitir a los estudiantes seleccionar 3 opciones de horario. Más que proveer alternativas a cada una de las materias [9], se obliga al estudiante a construir 3 horarios completos. Estos horarios tienen un orden de preferencia del 1 al 3, no deben tener coincidencias, y deben ser diferentes entre sí en al menos una materia/sección. Para poder implementar esta estrategia, la oferta académica debe estar elaborada al momento del proceso de inscripción, por lo que esta estrategia de solución al SSP es posterior a la solución del CTP.

Se diseñó un algoritmo de asignación que procese las 3 opciones de horario y asigne el 100 % de los alumnos a secciones, maximizando la satisfacción de una de las opciones o en su defecto, introduciendo el mínimo posible de cambios de sección.

El algoritmo consiste en 5 fases sucesivas, cada una asignado el máximo de estudiantes posibles (estrategia voraz o *greedy*). Conforme se avanza cada fase, se va dificultando la asignación de los alumnos, dado que los cupos disponibles de la oferta se irán reduciendo, por lo que cada fase trabaja con la adecuación de los requerimientos de manera de cumplir con los objetivos globales.

4.1. Datos de Entrada

Oferta Académica (OA). Conjunto de registros (m, s, c) , donde m es el código de la materia, s el número de sección y c el cupo máximo permitido.

Horarios (H). Conjunto de registros (m, s, d, b, a) donde d es el día de la semana, b es el bloque de hora, y a el aula, que especifica cuándo y donde se impartirá la materia.

Estudiantes (E). Conjunto de registros ordenado (id, I_a) , de tamaño $|E| = N$, donde id es la cédula de identificación del estudiante e I_a el índice de asignación. El orden descendente de este conjunto es determinado por I_a , que es un valor en el rango $[0 - 1]$. I_a es obtenido a partir del historial académico del estudiante, y favorece a los que tengan de mejor promedio de notas, mejor actividad académica, antigüedad en la carrera, y aspectos particulares de la solicitud [13].

Solicitudes (S). Conjunto de registros de tipo (id, m, s_1, s_2, s_3) , donde id es la cédula de identificación del estudiante, m es el código de la materia, y s_1, s_2, s_3 son las tres opciones deseadas de sección para dicha materia, ordenadas por prioridad.

4.2. Resultado

A partir de los conjuntos OA, E, H y S , el resultado del algoritmo será la asignación A , que es un conjunto registros del tipo (id, m, s) . Donde id es la cédula de identificación del estudiante, m es el código de la materia, y s la sección asignada.

4.3. Fases del Algoritmo

AD Asignación directa de alguna de las opciones, sin cambios de sección. Se rechazan los estudiantes a los cuales no se les puede cumplir ninguna de las opciones.

AC Asignación de alguna de las opciones, con cambios de sección, rechazando así la restricción R_5 . Se rechazan los estudiantes que no cumplen con las demás restricciones.

AR Repetición de Fase AC con rechazo de restricciones R_4, R_3, R_1 en este orden, hasta llegar a la asignación del 100 % del universo de estudiantes.

B (Balanceo) Se efectúan cambios de sección por cada materia para uniformar número de alumnos por sección y cumplir en lo posible con R_4

W (Retiro) Se efectúa un retiro forzado de materias en aquellos casos que no cumplen R_1 , cumpliendo así con esta restricción y rechazando la restricción R_2 .

La Fases AD, AC, AR se encargan de efectuar la asignación de todos los alumnos, guiándose principalmente por la preferencia de las tres opciones seleccionadas. Una vez terminadas estas 3 fases, el universo de asignación es el 100 %. Las siguientes Fases B y W modifican la asignación preliminar obtenida hasta ese momento.

A continuación mostramos un breve resumen de cada una de las fases. Para mayor detalle de los algoritmos puede consultarse nuestro trabajo previo [13].

4.4. Fase AD

La primera fase del proceso sigue una estrategia de asignación secuencial para cada uno de los estudiantes ordenados de mayor a menor según su índice de asignación I_a . Para cada estudiante se verifica si su opción 1, 2 ó 3 es viable, En caso afirmativo, le asigna el horario solicitado. En caso negativo, lo deja sin asignar para la próxima fase.

La Fase AD conduce a una asignación *todo o nada*, y la complejidad computacional es $O(N)$, donde de tamaño $|E| = N$.

4.5. Fase AC

La Fase AC tiene una estrategia de asignación ordenada similarmente a la Fase AD, pero rechazando la restricción R_5 (cumplir las opciones

de horario). Es decir, se introducen cambios de secciones en las solicitudes. Una función calcula el costo de un horario solución de acuerdo a:

$$F(a) = k_c C_c(a) + k_d C_d(a) \quad (1)$$

donde $F(a)$ es la función de costo de un horario solución a para un estudiante, $C_c(a)$ es el costo por el número de cambios de sección respecto a la opción más próxima, y $C_d(a)$ es el costo de dispersión de los bloques horarios. Al seleccionar la solución con menor costo, se busca que se seleccionen preferentemente aquellos horarios con menos cambios con respecto a las opciones solicitadas y en su defecto, aquellos que sean más compactos.

Dada una solicitud s , conformada por k asignaturas, y para cada asignatura m_i existen ns_i secciones con disponibilidad, tenemos que el tamaño del espacio total solución será la productoria

$$N_h = ns_1 * ns_2 * ns_3 \dots * ns_k.$$

Dado que la cantidad de soluciones crece según esta productoria, el espacio solución puede llegar a ser muy grande para materias con muchas secciones disponibles.

Para evitar un tiempo de ejecución exageradamente largo, la búsqueda del espacio solución es exhaustiva hasta un tamaño máximo predeterminado. Para mayores espacios se utilizará un recorrido no exhaustivo de acuerdo a un algoritmo de búsqueda y *backtracking*. En todos los casos, se establece un límite máximo de búsqueda de soluciones $N_h \text{max}$, a efectos de evitar que el algoritmo se detenga durante periodos muy largos explorando el árbol de soluciones.

La complejidad computacional de la Fase AC es $O(N \times N_h \text{max})$, donde N es el número de estudiantes y $N_h \text{max}$ es el número de horarios máximo del espacio solución recorrido.

4.6. Fase AR

Una vez corridas las dos primeras fases, queda un conjunto de alumnos que no se les ha podido asignar sus horarios. Este residuo es producto de

las imperfecciones de la oferta institucional, y de las limitaciones de los algoritmos utilizados.

La Fase AR consiste en correr nuevamente la Fase AC, pero levantando las restricciones R_4 , R_3 y R_1 , una a una, en el orden de menor a mayor prioridad. Primero se libera el límite de cupo en las secciones, luego se libera la hora de almuerzo y por último se permiten coincidencias en las secciones. El motivo de mantener a R_2 en esta etapa es que en la última Fase R, se retirarán materias asignadas, reinstaurando el requerimiento R_1 y liberando el R_2 .

Al finalizar este paso, el número de estudiantes que quedan por asignar será cero.

4.7. Fase B

La Fase B, es un balanceo de alumnos por materia. Por requerimiento de las diferentes cátedras académicas, cada profesor de una materia deberá tener en su sección el mismo número de alumnos que las demás secciones. Con esto se asegura una mejor utilización del espacio físico y equidad en la carga académica profesoral. En el caso de aulas de desigual capacidad, este requerimiento significa que cada sección se llenará al mismo porcentaje de capacidad de su aula asignada.

Dado que las Fases AD, AC, AR efectúan la asignación a partir de las solicitudes de cada estudiante, el resultado parcial generalmente presenta un desbalance de alumnos en las secciones de una misma materia. Unas secciones, por preferencia estudiantil, terminan con mayor alumnos que otras. Adicionalmente, dado que en Fase AR fueron relajadas las restricciones de cupo, algunas secciones terminan con más estudiantes que el cupo máximo.

Para resolver estos problemas, se ejecuta la fase de balance de secciones. Mediante una heurística dinámica de migración entre las secciones de mayor ocupación a las de menor ocupación.

El balance de secciones consiste en encontrar la relación entre el total de cupos y el número de estudiantes en cada materia, y encontrar cuáles secciones están por encima o por debajo de dicha relación. Desde la sección con más ocupación se evalúan los posibles cambios de sección hacia las secciones de menor ocupación. De todos los

posibles cambios, se selecciona el que signifique mayor reducción de costo, de acuerdo a la ecuación:

$$\Delta F(a', a) = F(a') - F(a)$$

donde F es la función de costo de la Ec. (1), a' es la nueva asignación (con el cambio de sección), a es la asignación actual del alumno.

Una vez efectuado el cambio, deben reevaluarse las relaciones de ocupación de las secciones de la materia. El proceso se repite mientras la desviación estándar tienda a cero.

El balanceo de secciones permite el cumplimiento de G_2 , pero va obviamente en detrimento de R_5 . Hemos verificado mediante análisis empíricos que esta estrategia de balance resulta, en muchos casos, en una reducción del costo de la asignación ($\Delta F < 0$). Esto debido a la compactación de los bloques horarios de la nueva asignación. Entonces, se cumple un intercambio entre una opción solicitada por un horario de menor dispersión.

La complejidad computacional de la Fase B es $O(M \times N)$, donde M es el número de materias y N es el número de alumnos.

4.8. Fase W

Finalmente se aplica la Fase W, que retira materias a los horarios que incumplen la restricción R_1 , es decir, aquellas que generan coincidencias. Mediante este procedimiento, se levanta R_2 y se restituye el cumplimiento de R_1 . Esta fase presenta el riesgo de dejar estudiantes sin horario (incumpliendo así con G_1). Sin embargo, en los ejemplos estudiados, esto no ha sido el caso.

Para aquellos casos en que un estudiante se quede sin un horario por aplicación de esta Fase, el software activa una señalización apropiada, indicando así la eventualidad.

4.9. Resumen de Heurísticas

La Tabla 1 muestra un resumen de las diferentes heurísticas utilizadas. Clasificamos las heurísticas según su tipo: estáticas y dinámicas. Las estáticas mantienen fijos los criterios de aplicación si importar el cambio en los datos de entrada. Las heurísticas dinámicas son aquellas que exigen

constante re-evaluación de las condiciones de aplicación. Por tal motivo, las fases que aplican heurísticas dinámicas requerirán mayor nivel de cómputo para el mismo tamaño de problema de entrada.

4.10. Cambios en la Oferta Académica

Debido a imperfecciones de la oferta, y para considerar aspectos inesperados de las solicitudes estudiantiles, comúnmente es necesario hacer cambios en las secciones y sus horarios luego de cerrado el proceso de inscripción. En ocasiones hay que abrir o cerrar secciones debido a los niveles reales de demanda. En otras ocasiones la ausencia inesperada de un profesor requiere el cierre de una sección.

Mediante el programa desarrollado es posible hacer una primera corrida y con el resultado obtenido evaluar los aspectos de demanda real. A partir del análisis de la demanda y el resultado de la asignación preliminar, pueden hacerse cambios pertinentes en la oferta, para posteriormente volver a efectuar la asignación. En el caso de apertura nueva de secciones, el programa de asignación llenará las nuevas secciones en las fases AC, AR o B. En el caso de cierre de secciones de última hora, el programa hará los retiros pertinentes de sección en las fases AC, AR o B.

El ciclo de modificación de la oferta y asignación se repite hasta encontrar una solución satisfactoria para la institución.

4.11. Implementación

Se desarrolló el programa de asignación para la DAE, que implementa los conceptos descritos en este trabajo. El mismo fue desarrollado lenguaje Python 2.7.6. El programa acepta como entrada los archivos formato CSV generados por el sistema de inscripción y genera el archivo de asignación en formato CSV.

La versión preliminar del programa de asignación fue utilizado por DAE en los semestres 2013-f, 2013-u y 2014-1. Actualmente, la DAE utiliza la versión de producción de este software para las asignaciones de sus horarios.

Tabla 1: Resumen de heurísticas utilizadas

Fase	Heurísticas	Tipo
AD	Índice de asignación I_a	Estática
	Orden de las opciones de horario	Estática
	Índice de asignación I_a	Estática
AC, AR	Orden de las opciones de horario	Estática
	Búsqueda limitada con backtracking	Dinámica
B	Menor ΔF	Dinámica
W	Eliminar materia con mas coincidencias	Dinámica

5. Experimentación

Se tomó una copia la versión definitiva del programa, y se ejecutó en un computador con 4 procesadores AMD Opteron 2.0 GHz de 8 núcleos c/u, 256Gb Memoria RAM, sistema operativo Linux Centos 6. El diseño del programa limita su ejecución a estrictamente secuencial (un solo hilo de ejecución).

Se tomaron 3 conjuntos de datos, provenientes de los semestres 2013–f, 2013–u y 2014–1. Para cada uno de ellos, se generó un índice I_a , el programa de asignación fue ejecutado y los resultados fueron evaluados. Consideramos el resultado más conservador de los 3 períodos para la discusión y conclusiones.

6. Resultados

La Tabla 2 muestra el cumplimiento de los objetivos y restricciones para cada uno de los datos de entrada, una vez terminado el proceso de asignación. Se observa cómo, para cada uno de los semestres, se verifica empíricamente que el objetivo G_1 se cumplió en 100 %, es decir, todos los estudiantes reciben un horario, sin excepción. La asignación sin coincidencias se cumple en un 98,8 %, y horarios con todas las materias asignadas para al menos un 98,8 % de los alumnos.

Se observa también que se logró asignar alguna de las opciones, por lo menos para el 44 % del alumnado. Éste es el indicador que elegimos como grado de satisfacción absoluta en el cumplimiento de R_5 . En las últimas filas de la tabla, se muestra el porcentaje de satisfacción absoluta discriminado por opción. La primera opción es la mas frecuentemente asignada de las tres opciones.

Mientras que el grado de satisfacción absoluta resultó ser del 44 %, es importante conocer cual es el grado de satisfacción parcial. Es decir, si para el 44 % pudimos satisfacer todas las materias de una opción, necesitamos conocer para los demás casos en que introdujeron cambios de sección, cuántas de las secciones del horario fueron satisfechas. Para ello, comparamos las secciones obtenidas con las secciones seleccionadas en las 3 opciones. La comparación la hacemos en forma porcentual, dado que algunos alumnos piden más materias que otros. Finalmente, contamos los horarios según el porcentaje de secciones satisfechas.

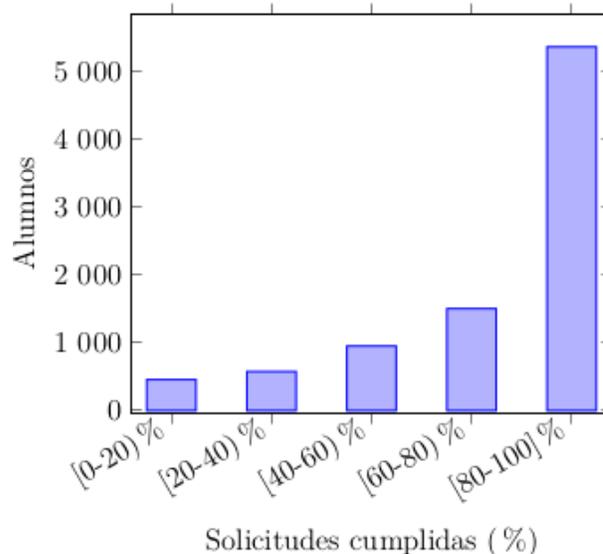


Figura 1: Cumplimiento parcial de solicitudes (2014-1). Cuántas materias dentro de una misma solicitud pudieron asignarse de acuerdo a alguna de las 3 secciones elegidas por el alumno. Se indica el porcentaje de materias respecto al total de la solicitud.

La Figura 1 muestra el histograma de horarios

Tabla 2: Cumplimiento de Objetivos y Restricciones

Asignación	G ₁	2013-f		2013-u		2014-1	
			%		%		%
Sin coincidencias	R ₁	9929	99,1	9358	99,4	8818	99,5
Todas las materias	R ₂	9979	99,1	9342	99,4	8818	98,5
Cualquier opción	R ₅	4868	48,6	4179	44,4	4125	46,5
Opción 1		3095	30,9	2699	28,7	2604	29,4
Opción 2		943	9,4	814	8,6	743	8,4
Opción 3		830	8,3	666	7,1	778	8,8

de acuerdo al porcentaje de satisfacción para el semestre 2014-1. Se observa la tendencia clara de mayor frecuencia hacia mayores grados de satisfacción. Se observa igualmente que en la clase [80-100] % la frecuencia es de 5372 horarios, y en la clase [60-80) % es 1506 horarios.

Si definimos *asignación satisfactoria* aquel grado de calidad de solución donde se le asigna a un alumno por lo menos el 60 % de su solicitud, entonces podemos concluir que sumando las dos clases más altas, obtenemos 6878 alumnos, que representa un (77 %) del total de horarios.

Se repitieron los cálculos para los semestres 2013-f y 2013-u y se obtuvo un mínimo de (74 %) de asignaciones satisfactorias (2013-f).

6.1. Tiempo de Ejecución

La Tabla 3 muestra el tiempo de ejecución de las distintas fases del proceso de asignación. Sólo se consideraron las Fases AD, AC y B, dado que el tiempo de ejecución para las fases AR y W resultó ser despreciable.

Tabla 3: Tiempo de Ejecución

Fase	2013-f		2013-u		2014-1	
	Tiempo (s)	%	Tiempo (s)	%	Tiempo (s)	%
AD	16	2	16	2	14	2
AC	573	73	459	65	543	73
B	201	25	236	33	189	25
Total	790		711		746	

El tiempo máximo total fue de 790 segundos (poco más de 13 minutos). La fases de mayor tiempo computacional son la Fase AC (72 %), seguida por la Fase B (25 %).

El tiempo total obtenido lo consideramos aceptable para la aplicación, dado que el programa

sólo corre en una sesión por semestre y con suficientemente tiempo reservado para obtener la solución (7 horas de jornada laboral). Sin embargo, existe un margen para mejorar estos tiempos de ejecución, utilizando un lenguaje más orientado al cómputo de alto rendimiento y con el empleo de técnicas de multiprocesamiento.

6.1.1. Porcentajes de asignación

Se contabilizaron las asignaciones por cada fase AD, AC, AR y los resultados se muestran en la Tabla 4. Se observa que por lo menos el 53 % de los estudiantes son asignados en la primera fase (2014-1). En atención a los tiempos de ejecución mostrados en la Tabla 3, se concluye que gracias a la heurística de opciones seleccionadas por los alumnos, es posible obtener una gran parte del resultado en forma directa y en poco tiempo de ejecución (2 % del tiempo total). Esto reviste un mérito significativo para la solución al SSP, dado que en ese momento de ejecución las secciones se encuentran con baja ocupación y una exploración del espacio-solución llevaría mucho tiempo de búsqueda. Esto queda confirmado en la fase AC, que para el período 2014-1 tarda 38 veces más que la fase AD a pesar de trabajar con sólo el 47 % del universo de alumnos.

7. Conclusiones

Se diseñó un algoritmo de asignación de horarios estudiantiles para la Facultad de Ingeniería UC, que procesa 3 opciones de horario construidas y solicitadas por los mismos alumnos. Las opciones de horario se construyen a partir de una oferta académica completa con secciones y horarios disponible al momento de la inscripción.

Tabla 4: Porcentajes de Asignación por Fase

Fase	2013-f		2013-u		2014-1	
	Asignación	%	Asignación	%	Asignación	%
AD	5519	55	5295	56	4717	53
AC	4065	41	3686	39	3404	38
AR	435	4	431	5	743	8

El algoritmo está compuesto por una secuencia de fases que aplican las heurísticas resumidas en la Tabla 1 que tratan de asignar una de las opciones solicitadas, o en su defecto un horario aproximado con el menor cambio de secciones posible. El algoritmo efectúa una fase balanceo para equiparar los estudiantes asignados a cada sección de una misma materia.

El programa en versión final, desarrollado en lenguaje Python, es utilizado por la Dirección de Asuntos Estudiantiles desde el 2013.

En la experimentación se verificó que los resultados obtenidos presentan un 100 % de efectividad de asignación, con un 98,8 % de horarios sin coincidencias, y un 98,2 % de horarios con todas las materias.

En cuanto a la calidad del resultado, se observó que 44 % de los horarios generados pertenecen a una de las 3 opciones seleccionadas por los alumnos, mientras que el porcentaje de asignaciones satisfactorias fue del 77 %.

El programa se ejecuta en poco más de 13 minutos en el equipo utilizado para las pruebas. La fase de asignación directa de opciones (AD) resuelve el 53 % del problema en sólo 14 segundos (2 % del tiempo total), con lo cual concluimos que las opciones dadas por los estudiantes contribuyen grandemente a la solución del problema en forma eficiente. La Fase AC se llevó el 72 % del tiempo y la Fase B el 25 %.

El tiempo de ejecución permite la adecuación de la oferta académica a la demanda real mediante el ciclo iterativo diseño de oferta-asignación, el cual se corre varias veces hasta obtener oferta y asignación final que satisfagan los requerimientos institucionales.

Los resultados obtenidos apuntan a una solución satisfactoria a un problema real de asignación de horarios, que permite la utilización eficiente de

los recursos humanos y físicos. En tal sentido, se observa cómo es posible cumplir objetivos dispares mediante la aplicación de algoritmos aproximados fundamentados en principios sencillos de operación. Este grado de satisfacción presentado en este trabajo debe ser tomado en cuenta para cualquier mejora utilizando otros principios algorítmicos de diseño.

8. Recomendaciones

Proponemos mejoras en las heurísticas aplicadas por el algoritmo que resulten en aún mejores resultados, es decir, que se incrementen los índices de satisfacción absoluta y/o de asignaciones satisfactorias. Es de especial interés implementar conceptos de meta-optimización y efectuar comparaciones entre resultados tal como ha sido establecido en otros tipos de problemas [14].

También proponemos observar cómo varía la calidad de la respuesta cambiando la oferta académica, de manera que permita establecer estrategias de identificación de errores y factores críticos en la oferta presentada por las cátedras.

Demostrada la validez de los conceptos presentados en este trabajo, y el uso continuado de la versión en Python, se recomienda la implementación de la aplicación utilizando lenguajes de programación compilados como C, Fortran o el reciente lenguaje dinámico de alto nivel Julia [15], y aplicar técnicas de cómputo paralelo para las fases más lentas del algoritmo (Fase AC y Fase B) de manera de reducir el tiempo de ejecución. Una forma interesante de ejecución en paralelo sería explotar el cómputo en cascada realizado por el algoritmo propuesto, mediante bibliotecas especializadas en cómputo *pipeline* con estructuras matriciales [16].

Referencias

- [1] Michael W Carter and Gilbert Laporte. Recent developments in practical course timetabling. In *International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling*, pages 3–19. Springer, 1997.
- [2] Edmund Kieran Burke and Sanja Petrovic. Recent research directions in automated timetabling. *European Journal of Operational Research*, 140(2):266–280, 2002.
- [3] T. MÅller. *Constraint-based Timetabling*. PhD thesis, Faculty of Mathematics and Physics. Charles University in Prague, 2005.
- [4] Ronen Feldman and Martin Charles Golombic. Optimization algorithms for student scheduling via constraint satisfiability. *The Computer Journal*, 33(4):356–364, 1990.
- [5] Eddie Cheng, Serge Kruk, and Marc Lipman. Flow formulations for the student scheduling problem. *Practice and Theory of Automated Timetabling IV*, pages 299–309, 2003.
- [6] Nelishia Pillay. A study of the practical and tutorial scheduling problem. In *10th International Conference of the Practice and Theory of Automated Timetabling PATAT*, August 2014.
- [7] Michael W. Carter. A comprehensive course timetabling and student scheduling system at the University of Waterloo. In *Practice and theory of automated timetabling III*, pages 64–82. Springer, 2001.
- [8] Keith Murray and TomÅš MÅller. Real-time student sectioning. In *Proceedings of the 3rd Multidisciplinary International Conference on Scheduling: Theory and Application (MISTA 2007), Paris, France*, pages 598–600, 2007.
- [9] TomÅš MÅller and Keith Murray. Comprehensive approach to student sectioning. *Annals of Operations Research*, 181(1):249–269, 2010.
- [10] David Schindl. Student sectioning for minimizing potential conflicts on multi-section courses. In *11th International Conference on Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT-2016)*, August 23–26 2016.
- [11] Gary Lewandowski. Simultaneous construction of student schedules and timetable, 1996.
- [12] Jeffrey H Kingston. Integrated student sectioning. In *10th International Conference on Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT-2014)*, pages 489–492, 2014.
- [13] Demetrio Rey, Luis Llave, Enrique Flores, VÅctor Barrios, Braulio De Abreu, and JosÅ L. Nazar. Asignaci3n de horarios para los alumnos de la Facultad de IngenierÅ UC. Technical report, Facultad de IngenierÅ Universidad de Carabobo, 2015. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.4995.2486>.
- [14] Habib Youssef, Sadiq M Sait, and Hakim Adiche. Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14(2):167–181, 2001.
- [15] Jeff Bezanson, Alan Edelman, Stefan Karpinski, and Viral B. Shah. Julia: A fresh approach to numerical computing. *CoRR*, abs/1411.1607, 2014.
- [16] Demetrio Rey and James Canning. Streams: una librerÅ de habilitaci3n de paralelismo mixto de tareas en cascada y datos para el lenguaje de programaci3n zpl. *Revista IngenierÅ UC*, 14(2):70–78, 2007.

Comparative of reinforced concrete structural walls design compliant to FONDONORMA 1753:2006 and ACI 318–14

Simón Arteaga, Jorge Malavé, José Olival*

Departamento de Ingeniería Estructural, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Abstract.-

Nowadays the development of avant-garde and complex projects requires conceiving structural designs with optimal performance. As a consequence, using structural walls as a lateral load resisting system starts to stand out as a solution for multiple design problems related with elements stiffness that can be harder to solve applying traditional frame systems. On the other hand, Venezuela's building codes presents a wide gap in their updating process, which complicates the ideal usage of structural walls. For that reason is this investigation's objective to develop a comparison between designing structural walls based on the local code "FONDONORMA 1753:2006" and the design based on "ACI 318-2014". Comparing these two codes will expose the deficiencies of FONDONORMA 1753:2006. Allowing students and professionals in Venezuela to accomplish designs of Structural Walls in a systematized, accurate and updated way.

Keywords: structural walls; structural elements design; code comparison; reinforced concrete; seismic-resistant structures

Comparación del diseño de muros estructurales de concreto armado según FONDONORMA 1753:2006 y ACI 318–14

Resumen.-

Actualmente el desarrollo de proyectos novedosos y complejos exige concebir propuestas estructurales con desempeños óptimos. Entre estos resaltan los muros estructurales empleados en sistemas resistentes a cargas laterales, como una opción que permite solucionar múltiples problemas de diseño, relacionados con la rigidez de los elementos, los cuales son más complicados de resolver utilizando sistemas tradicionales aporricados. Mas es claro que en Venezuela existe una desactualización en cuanto a las normativas de diseño. Tal desactualización dificulta la utilización de los muros de manera ideal. El propósito de esta investigación es desarrollar una comparación entre el diseño de muros estructurales, en base al proyecto de Norma FONDONORMA 1753:2006 y la norma americana ACI 318-14. De manera tal que se evidencien las deficiencias del código local, y con esto permitirles a estudiantes y profesionales vinculados con el cálculo estructural realizar de forma sistematizada, precisa, correcta y actual el diseño de estos elementos que aportan tantas ventajas.

Palabras clave: muros estructurales; metodología de diseño; comparación de normas

Recibido: octubre 2016

Aceptado: febrero 2017

1. Introducción

El mundo de la construcción de edificaciones es un ámbito dinámico y en constante evolución, siempre en búsqueda de optimizar las propuestas de proyecto desde los puntos de vista de seguridad, funcionalidad, estética y fundamentalmente

* Autor para correspondencia

Correo-e: jpolival@gmail.com (José Olival)

en lo económico. Este dinamismo y avance en los puntos mencionados, induce la necesidad de concebir propuestas estructurales que desarrollen comportamientos óptimos ante las exigencias que plantean los proyectos novedosos.

La selección del tipo de sistema estructural resistente a cargas laterales, es uno de los factores esenciales para poder cumplir con el objetivo de obtener la propuesta de mejor comportamiento, adaptada a la arquitectura, que cumpla con su función y se mantenga dentro de rangos de gastos económicos aceptables. Por esto, la utilización de elementos estructurales tipo muro de corte o pantallas como sistema resistente a cargas laterales surge como una de las opciones factibles.

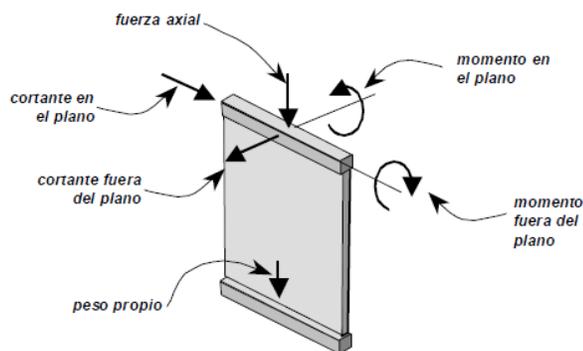


Figura 1: Fuerzas dentro y fuera del plano del muro. Fuente: ACI 318-14 [1].

Los muros estructurales (ME), o muros cortantes como también se les conoce, están definidos como elementos de concreto armado con un “desarrollo en altura de gran magnitud, contra un ancho intermedio y un espesor pequeño” [2], los cuales se diseñan para resistir combinaciones de momentos flectores, fuerzas cortantes y fuerza axial tal como se muestra en la Figura 1.

La concepción geométrica les proporciona a los ME una rigidez apreciable en la dirección de su plano, por lo que ubicándose en una distribución coherente en una estructura puede dotársele de resistencia considerable, pero sobre todo de una elevada rigidez y ductilidad [3], además de mejorar la utilización de los espacios desde el punto de vista arquitectónico.

La adecuada disposición del acero de refuerzo



Figura 2: Detalle de miembro de borde.

a lo largo de un ME es necesaria para obtener el comportamiento esperado, en especial cuando se desea diseñar para que dicho acero incurriere en el rango inelástico en zonas específicas con el propósito de disipar energía. En algunos casos es conveniente diseñar los muros utilizando miembros de borde (MB), los cuales consisten en zonas ubicadas en los extremos del muro con una disposición especial del acero de refuerzo, con importante confinamiento y un eventual aumento de sección [3], tal y como se muestra en la Figura 2. La sección central o alma del muro suele reforzarse con un detallado más sencillo en cuanto a cantidad y posición del acero se refiere.

Para el desarrollo de diseños sismoresistentes debe utilizarse muros dúctiles y evitar los controlados por fuerza cortante, por no tener la capacidad de disipar energía de manera eficiente. El principal medio de disipación de energía en un cantilever cargado lateralmente debe ser la cedencia del refuerzo a flexión en las regiones de articulación plástica, normalmente en la base del muro [4].

A través de modelos de carga histeréticos se ha

constatado la capacidad de disipación de energía de muros dúctiles continuamente a lo largo de los ciclos. Obteniéndose curvas mucho más estables que en el caso de muros dominados por corte.

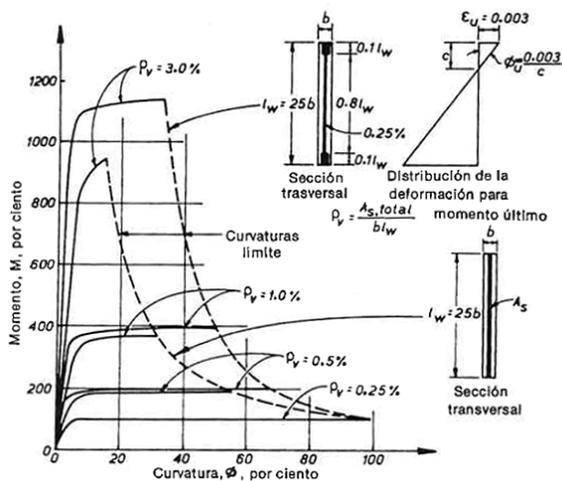


Figura 3: Efecto de la distribución del acero de refuerzo y de la cuantía en la resistencia a flexión y en la curvatura. Fuente: Park, Paulay [5].

El detallado de la distribución del refuerzo a lo largo del muro también influye en su desempeño. Los muros con refuerzo concentrado en los extremos son, en comparación con aquellos con refuerzo distribuido, más resistentes y dúctiles [6], como se demuestra en la Figura 3. Esta ductilidad puede verse reducida si el acero a flexión incursiona en el intervalo de endurecimiento de deformación, por lo cual se hace imperativo un adecuado confinamiento del miembro de borde para aumentar la capacidad de deformación útil del concreto y retrasar el pandeo del acero por flexión.

Por otro lado, un factor importante dentro del comportamiento de los ME es la magnitud de la carga axial a la cual está sometido el elemento, afectando el patrón de agrietamiento, el modo de falla y la ductilidad de los muros [7]. La capacidad de desarrollar desplazamientos laterales disminuye a medida que la carga axial aumenta para una misma sección transversal y propiedades mecánicas del concreto. Haciéndose imperativo el adecuado detallado de elementos de borde para evitar fallas como las observadas en edificaciones durante el terremoto de Chile del año 2010 por

flexo-compresión inducidas por el aplastamiento del concreto y el pandeo del refuerzo longitudinal.

Se ha encontrado, de manera general, un mejor comportamiento de sistemas estructurales que utilizan muros con respecto a los que utilizan marcos ante las condiciones de viento y sismo (Pórticos) [8]. Esto debido a que los ME permiten solucionar problemas de diseño mucho más complicados de resolver utilizando el sistema tradicional de pórticos tales como excentricidades excesivas, riesgo torsional elevado, rigidez deficiente, derivas que no cumplan, entre otros; de particular importancia sobre todo en estructuras sometidas a acciones sísmicas o de viento.

El uso de muros cortantes se hace realmente necesario en determinados edificios elevados, especialmente para sistemas de múltiples niveles, en el rango de 30 a 35 pisos, donde está demostrado que sistemas ME se comportan de manera eficiente [9].

Es importante resaltar que muros de corte bien diseñados en las áreas sísmicas tienen un buen historial [5], registrándose que no ha ocurrido ningún colapso de edificios altos que contienen ME ante solicitaciones fuertes de viento o sismo en los últimos 30 años [9].

Aunque en Venezuela está contemplada por el código de diseño Norma FONDONORMA 1753:2006 el uso de este tipo de elementos [10], existe un desfase innegable en la actualización de la normativa local con respecto a las de otros países. Dicha desactualización afecta en ecuaciones de diseño y especialmente en características de distribución y detallado del acero de refuerzo que son esenciales para que estos elementos cuenten con la ductilidad necesaria. En consecuencia, se tiene como resultado: un reducido nivel de utilización de este tipo de elementos por la ausencia de detalles esenciales de diseño; o en su defecto, y aún peor, la aplicación deficiente de los códigos, que se traduce en elementos que no tendrán el desempeño para el cual se proyectaron.

Por lo tanto, debido a la similitud en su desarrollo y contenido, la evidente actualización que presenta la norma Americana ACI 318-14 [1] que rige esta materia y recomendaciones como las realizadas por Rodríguez [8], en el presente trabajo de investigación se ha desarrollado la comparación

del diseño de muros estructurales de concreto armado en base a las Normas FONDONORMA 1753:2006 y ACI 318-14.

El exponer una alternativa distinta a la ya puesta en práctica en el país, permite formar un criterio correcto y actualizado en el ingeniero de hoy, que pretende desarrollar proyectos de concreto estructural y que no necesariamente cuenta con amplia experiencia en el diseño de estos elementos.

Los resultados expuestos generalizan el diseño y detallado de muros, además de definir una metodología con resultados comprobados, evitando así errores por el libre criterio e interpretación del proyectista. Lográndose también, como consecuencia, la unificación de juicios académicos en la enseñanza del diseño de dichos elementos estructurales; fomentando la expansión en el uso de muros como solución estructural, un acrecentamiento de la calidad de los proyectos y por consiguiente: edificaciones más seguras y económicas.

2. Metodología

El primer paso del proceso de investigación consistió en la ubicación, selección y procesamiento de la información. Una vez seleccionado y organizado el material teórico recopilado, se procedió a realizar la revisión detallada del mismo, con la finalidad de filtrar la información de interés para la temática en cuestión.

Luego se plantearon las principales variables que permitieron realizar una comparación entre ellas tanto de la forma como del contenido. Las variables de forma evaluadas son: organización del contenido, calidad de las imágenes y vinculación entre el articulado y los comentarios. Por su parte se estudiaron las siguientes variables de contenido: factor de minoración de resistencia, requisitos geométricos del elemento, límite de compresión máxima admisible, límite de fuerza cortante máxima admisible, resistencia a corte teórica del concreto, número de mallas del acero de refuerzo, cálculo del acero de refuerzo horizontal, cálculo del acero de refuerzo vertical, cuantías mínimas, requerimiento de miembros de borde,

dimensionamiento de los miembros de borde, cuantías de acero vertical (longitudinal) en miembro de borde, cálculo del acero de confinamiento (muro sin miembro de borde), cálculo del acero de confinamiento (muro con miembro de borde), detallado del acero vertical (muro sin miembro de borde), detallado del acero horizontal (muro sin miembro de borde), detallado del acero vertical (muro con miembro de borde), detallado del acero horizontal (muro con miembro de borde) y detallado del acero horizontal del miembro de borde.

Donde el conjunto de variables de forma y fondo son de naturaleza netamente cualitativa. Aunque de las variables de contenido pueden derivarse ciertos datos cuantificables (como magnitudes de áreas de acero, dimensiones de secciones, entre otras) la comparación realizada fue netamente teórica sobre las metodologías de diseño, y para dar una idea de las implicaciones cuantitativas en las diferencias entre procedimientos, se presentaron a manera ilustrativa una serie de ejemplos de diseño.

Posteriormente se realizó la condensación de los procedimientos de diseño en diagramas de flujo, para cada código en estudio. A partir de las impresiones obtenidas de las etapas previas se realizaron los análisis de las variables de estudio con la ayuda de cuadros comparativos.

Luego, utilizando los procedimientos plasmados en los diagramas de flujo, se realizó el diseño de un muro estructural. Este ejemplo se analizó en base a la metodología de ambos códigos estudiados pero con idénticas propiedades mecánicas y geométricas, y con iguales estados de carga. Se contó con el apoyo de un software comercial de análisis estructural y otro de cálculo matemático para la realización de los respectivos ejemplos.

3. Análisis y discusión de resultados

3.1. Análisis comparativo del proceso de diseño

Procesados todos los requisitos y sugerencias de los códigos, se desarrolló un procedimiento detallado, contemplando todas y cada una de las variables de contenido presentadas previamente, respetando la información contenida en cada una

de ellas, mas sin embargo, planteando un orden lógico de cálculo que no necesariamente se acopla con el presentado en los documentos de estudio.

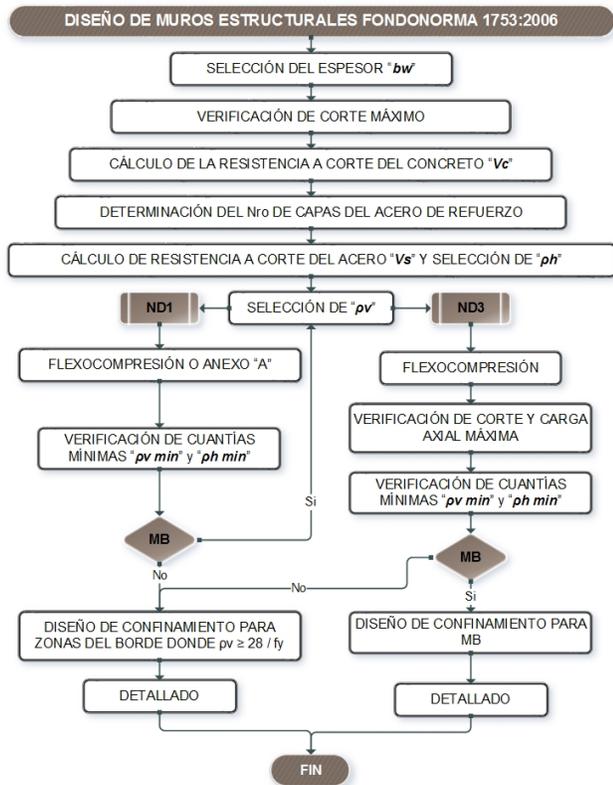


Figura 4: Diagrama de flujo del diseño de muros estructurales por la norma FONDONORMA 1753:2006.

El procedimiento de la norma FONDONORMA, se condensó en un diagrama de flujo único, el cual agrupa ambos Niveles de Diseño (ND1 y ND3) tal como se desarrolla en el capítulo 14 de la mencionada norma. Adicionalmente contempla los requisitos especiales del capítulo 18 a los que se hacen referencia para Nivel de Diseño 3. A grosso modo se presenta el procedimiento en la Figura 4, a partir del procedimiento completo presentado por Arteaga y Malavé [11].

De la misma forma se presentan de manera esquemática los procesos de cálculo para la norma ACI en las Figuras 5 y 6, para el cual se desarrollaron diagramas separados por nivel de diseño ND1 Y ND2 respectivamente, tal como lo sugiere el mismo código, considerando también, un orden lógico de cálculo según los autores [11].

Se puede observar que no existen diferencias

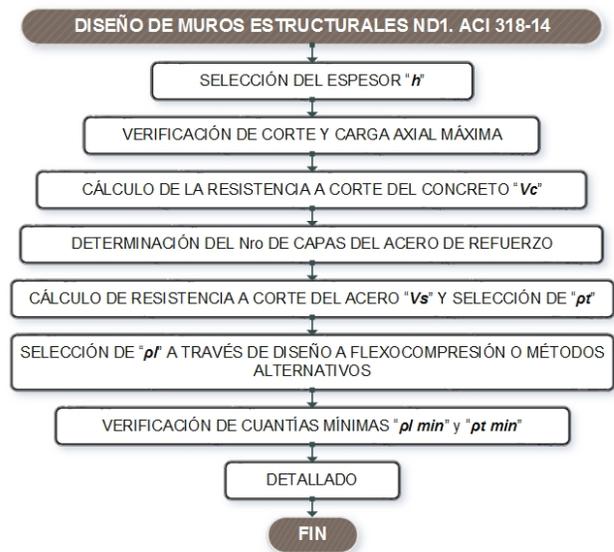


Figura 5: Diagrama de flujo del diseño de muros estructurales ND1 por la norma ACI 318-14.



Figura 6: Diagrama de flujo del diseño de muros estructurales ND3 por la norma ACI 318-14.

significativas en lo que respecta al diseño por corte del muro, es decir, desde las verificaciones

geométricas hasta la selección del acero por corte horizontal. Las diferencias se presentan toda vez que la norma ACI 318-14 sugiere para el cálculo de acero longitudinal múltiples metodologías para el diseño ND1. Por otra parte, se evidencia que el diseño de estos no sugiere el uso de miembros de borde, a diferencia de la norma venezolana que evalúa su requerimiento, y más aún, de necesitarlos, plantea que se realicen todas las verificaciones exigidas para ND3. Por último y no menos importante, aunque la norma americana también evalúa el requerimiento de miembro de borde para diseños ND3, diferencia estos en tres zonas longitudinales: miembros especiales de borde (MEB), miembros ordinarios de borde (MOB) y zona no confinada.

3.2. *Análisis comparativo de las variables de forma*

Existe una marcada diferencia entre normas en cuanto a cómo se presenta la información en cada una de ellas, tal y como puede observarse en las Tablas 1, 2 y 3. Si bien se aprecia que existe una simplificación del procedimiento de diseño planteado por FONDONORMA, reduciéndose este a un solo capítulo con siete artículos a diferencia de la norma ACI que es presentada en dos capítulos con ocho artículos, no logra quedar suficientemente diferenciados los dos tipos de diseño (ND1 y ND3) y su relación con las condiciones para miembros de borde; además, obligatoriamente se debe hacer uso de otro capítulo (Capítulo 18) para indicar los artículos referentes a confinamiento y acero transversal de los miembros de borde.

Es evidente que FONDONORMA 1753-2006 no expresa de manera clara cuales exigencias son estrictamente para uno u otro nivel de diseño, mientras que la norma ACI, sin problemas agrupa separadamente el diseño de muros especiales (ND3) y hace oportunamente llamados a los requerimientos en común con muros simples (ND1).

Respecto al uso de imágenes es necesario advertir que la norma ACI emplea el doble de imágenes y estas son presentadas dentro de los comentarios, y en consecuencia en paralelo al

articulado; adicionalmente las imágenes son de alta calidad y transmiten por indicadores o pie de imágenes la información que pretende transmitir. En contra parte, es difícil ubicar las imágenes de la norma FONDONORMA ya que estas son indicadas desde los comentarios (al final del documento, anexo H) y no se encuentran en el mismo anexo (se presentan en el apartado “Figuras”), éstas no cuentan con pie de imagen que le permitan al lector identificar rápidamente la información que pretende transmitirse y son de escasa calidad en cuanto a nitidez y contraste.

Otra notoria diferencia entre ambas normas viene dada no solo por la significativa desproporción en cuanto al número de comentarios a favor de la norma ACI, sino también por la estructura de la presentación de los comentarios de forma paralela con los artículos en la misma página (se encuentran unos junto a los otros separados por dos columnas de texto). Lo cual permite al lector identificar clara y rápidamente la información adicional que requiere para el correcto diseño, ya que cada comentario se encuentra alineados con su respectivo artículo; caso distinto a la norma FONDONORMA que ubica los comentarios al final del documento y no hace llamados a revisar estos desde el articulado.

3.3. *Análisis comparativo de las Variables de Contenido*

Luego de estudiar las variables de contenido, con base en el cuadro comparativo elaborado por Arteaga y Malavé [11], se observaron las semejanzas y diferencias.

Se observó que entre ambos códigos existen semejanzas únicamente en “Límites de fuerza cortante máxima admisible” y “Detallado de acero vertical de ME sin miembros de borde”.

En cuanto a las diferencias resaltan las siguientes.

Los valores presentados para el factor de minoración de resistencia a corte varían. FONDONORMA hace distinción entre el Nivel de Diseño (ND) para la selección de este valor ($\phi = 0,75$ (ND1, Cap 9), $\phi = 0,85$ (ND1, Anex B) y $\phi = 0,60$ (ND3)), mientras que ACI adopta

Tabla 1: Comparación de Variables de Forma; Organización del contenido

Códigos de diseño	
FONDONORMA 1753-2006	ACI 318-14
Presenta la totalidad del contenido referente a ME en un único Capítulo (Capítulo 14).	Presenta la información referente a ME en dos capítulos separados. Donde el Capítulo 11 se enfoca en ME de ND1 y el Capítulo 18 en ME de ND3 (sin embargo este capítulo no solo se enfoca en ME sino en todos los diseños sismoresistentes).
El diseño se presenta en 7 artículos. Se distribuyen de la siguiente forma: 14.1.- Alcance. 14.2.- Requisitos generales. 14.3.- Criterios de diseño. 14.4.- Muros estructurales con nivel de diseño ND1. 14.5.- Muros estructurales con nivel de diseño ND3. 14.6.- Miembros de borde. 14.7.-Dinteles de acoplamiento.	El diseño, entre ambos capítulos se presenta en 9 artículos en total. Se distribuyen de la siguiente manera: 11.1.-Alcance. 11.2.- Generalidades. 11.3.- Limites de diseño. 11.4.- Resistencia requerida. 11.5.- Resistencia de diseño. 11.6.- Limites del refuerzo. 11.7.- Detallado del refuerzo. 11.8.- Método alternativo para el análisis fuera del plano de muros esbeltos. 18.10- Muros estructurales especiales.
La información referente al diseño por corte se encuentra en un Capítulo separado. En los capítulos 11 y 18 según ND.	La información referente al diseño por corte se encuentra incluida en el mismo capítulo en el que se ubica el diseño de ME.
La redacción reiteradamente obliga al lector a revisar numerosos artículos de capítulos diferentes de manera desordenada y extensa para completar una idea.	Aunque la redacción lleva al lector a revisar artículos de distintos capítulos para completar una idea lo hace de manera ordenada y precisa.
Dentro de la estructura del documento el artículo correspondiente a introducción a los MB (14.6) se encuentra con la misma jerarquía que los de introducción a los distintos niveles de diseño (14.4 ND1 y 14.5 ND3), no dentro de alguno de ellos en específico.	Los artículos correspondientes a MB se encuentran ubicados únicamente dentro del Capítulo 18, específicamente dentro del Art. 18.10 que trata de los muros estructurales especiales (ND3).
Los comentarios se encuentran ubicados al final del articulado.	Los comentarios se muestran en paralelo al articulado dentro de la misma hoja.
Las imágenes de referencia se encuentran ubicadas al final del documento y son escasas.	Las imágenes de referencia se encuentran junto con los comentarios en paralelo con el articulado y en mayor cantidad.
En una ocasión hace uso de tablas para organizar la información.	En múltiples ocasiones hace uso de tablas para organizar la información.
No hace uso de esquemas para explicar la información.	Hace uso de esquemas para explicar la información.

un valor único independientemente del ND ($\phi = 0,65$).

La norma ACI discrimina a los muros estructurales en función de la presencia de carga axial

para la evaluación del espesor de los mismos como requisito geométrico, siendo más estrictos los límites para el caso de muros portantes. Mientras que FONDONORMA no realiza ninguna

Tabla 2: Comparación de Variables de Forma; Calidad de las imágenes

Códigos de diseño	
FONDONORMA 1753-2006	ACI 318-14
Cuenta con 4 imágenes de complemento informativo en los comentarios.	Presenta 8 imágenes complementarias en los comentarios del articulado.
Presentan baja calidad los gráficos respecto a contraste y nitidez.	Son de alta calidad en cuanto a contraste y nitidez.
Existe una imagen que no está referida ni en articulado ni en comentarios.	Todas las imágenes están referidas por sus respectivos comentarios.
Los detalles se indican precariamente y no se enfocan en lo que precisan transmitir.	Representan de manera clara y simple la información que intenta transmitir.
No se encuentran acompañadas de comentarios explicativos junto a ellas y se hace poca referencia a ellas dentro del articulado o los comentarios.	Se presentan junto con notas y comentarios explicativos oportunos que complementan la explicación gráfica.
Presenta 13 comentarios para el diseño de ME.	Existen 31 comentarios distribuidos entre ambos capítulos de diseño de ME.

Tabla 3: Comparación de Variables de Forma; Vinculación entre el articulado y comentarios

Códigos de diseño	
FONDONORMA 1753-2006	ACI 318-14
Los comentarios se limitan a explicar los orígenes o fundamentos de las ecuaciones y verificaciones presentados en el articulado.	Los comentarios no solo se limitan a explicar los orígenes o fundamentos de las ecuaciones y verificaciones, sino que brindan información sumamente útil adicional para el uso correcto de la información del articulado.
El articulado no hace referencia a los comentarios pertinentes ubicados en los anexos.	El articulado no hace referencia a los comentarios, sin embargo, estos se presentan en una columna en paralelo.
La mayoría de los comentarios no son concisos.	Comentarios oportunos. Se encuentra información complementaria de utilidad para la mayoría de los incisos del articulado.
Los comentarios se presentan en orden según el articulado pero no precisan el artículo o ecuación particular al que se refieren.	Los comentarios se presentan en orden según el artículo al cual hacen referencia.
Los comentarios hacen uso de imágenes que se encuentran al final del documento.	Los comentarios hacen uso de tablas, imágenes y esquemas de forma oportuna en su propia estructura.

distinción de esta condición.

En referencia al límite de compresión máximo FONDONORMA es más conservadora, ya que en la expresión el factor que reduce la resistencia

teórica a carga axial para una excentricidad igual a cero (N_0) es 0,35 y en el caso de ACI dicho factor es igual a $0,80\phi = 0,52$.

En lo que refiere a la determinación del cortante

resistido por el concreto, la norma americana sugiere dos métodos (simplificado y detallado) mientras que la nacional plantea uno solo con verificaciones de límites máximos. Cabe destacar que el procedimiento detallado del código americano es muy similar al procedimiento del venezolano.

La norma ACI diferencia los requisitos para el número de mallas, separándolos según el ND, exigiendo para ND1 solo un chequeo geométrico. Mientras que FONDONORMA presenta un único procedimiento similar al de ACI en ND3. Que depende no solo de su geometría sino también de la resistencia a compresión cilíndrica del concreto.

La separación máxima para el refuerzo horizontal en la norma ACI es menos conservadora, debido a que presenta dentro de las condiciones una separación máxima de 46 cm mientras que FONDONORMA limita a 35 cm en ND1 y 25 cm en ND3.

FONDONORMA plantea solo el cálculo del acero longitudinal como columna (análisis por flexocompresión) y adicionalmente para diseños ND1 que cumplan con ciertas consideraciones geométricas admite la utilización del método de las bielas. Por otro lado, ACI para ND3 exige el diseño a flexocompresión y para el ND1 sugiere cuatro métodos distintos cuya aplicación depende de condiciones tanto de las acciones sobre el elemento y sus excentricidades como de relaciones de aspecto.

En lo que a cuantías mínimas se refiere, la única diferencia se observa en el requisito adicional para los casos en que $V_u > 0,5\phi V_c$, donde FONDONORMA limita que la cuantía vertical no sea mayor que la cuantía horizontal.

Una de las diferencias más notorias e importantes es que la norma americana discretiza los miembros de borde en tres zonas bien diferenciadas: Miembro Especial de Borde (MEB), Miembro Ordinario de Borde (MOB) y Zona No Confinada (ZNC).

Ambos códigos presentan dos metodologías para corroborar la exigencia de miembro de borde. El procedimiento número uno de ACI se encuentra igual a FONDONORMA, excepto por: El coeficiente de magnitud igual a 1,5 añadido en el dividendo para amplificar al valor de la deriva en la

norma ACI, y el límite máximo de deriva (0,005 en ACI y 0,007 en FONDONORMA). Por otro lado en el procedimiento dos, difieren completamente: mientras el método sugerido por FONDONORMA contempla parámetros geométricos y de cargas actuantes, la norma ACI sugiere un método que depende de los esfuerzos y las cuantías de acero longitudinal en el borde.

Respecto al dimensionado de la sección transversal de los miembros de borde, el largo y ancho de estos dependerá del procedimiento que se haya empleado para determinar su necesidad según FONDONORMA. Sin embargo esta última no especifica para su procedimiento 1 dimensiones mínimas, mientras que para el procedimiento 2 si se presenta valor mínimo de longitud como una relación lineal que depende de N_u y límite mínimo de ancho en función a la altura libre de entrepiso y el espesor del alma del muro. Por otro lado ACI considera como longitud mínima de MB la misma expresión presentada por la norma nacional como longitud de confinamiento, independientemente del ND y si presenta límites de ancho dependiendo del procedimiento empleado para determinar la necesidad del mismo.

La cuantía vertical en FONDONORMA es limitada por un solo rango de valores para toda la extensión del muro, mientras que ACI no presenta límite de cuantía para el miembro de borde en específico, pero en base a ella define a que zona MB (MEB, MOB, ZNC) debe pertenecer la sección que se calcula.

Según la norma venezolana el acero longitudinal de los extremos debe estar confinado si la cuantía de dicho extremo es mayor a $28/f_y$ para muros ND1 sin miembros de borde, mientras que la norma ACI sugiere confinamiento para muros sometidos a flexión independientemente de la cuantía de acero longitudinal, aun si no lo requiere por resistencia, con la finalidad de darle apoyo lateral a las barras longitudinales.

Para la norma americana el acero de confinamiento de los miembros de borde dependen de las zonas que lo conforman (MEB, MOB o ZNC), mientras que la norma nacional define un único confinamiento en MB para toda la longitud el muro. Cabe destacar que el confinamiento que

exige FONDONORMA es equivalente a un confinamiento de MEB. Por otra parte, el confinamiento de MOB es menos exigente que el de MEB y de Zona Confinada de FONDONORMA. Por último la ZNC como su nombre lo indica no requiere de confinamiento.

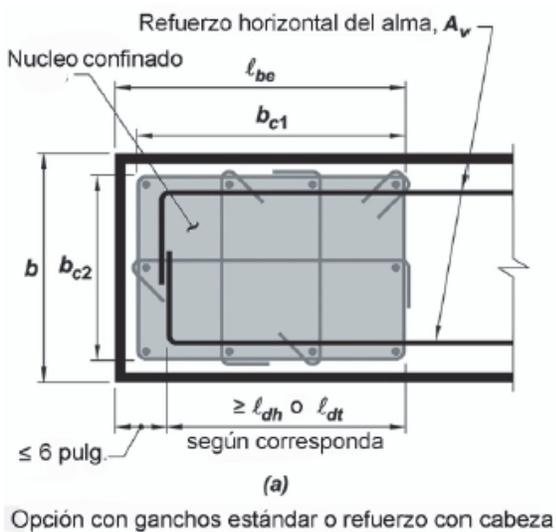
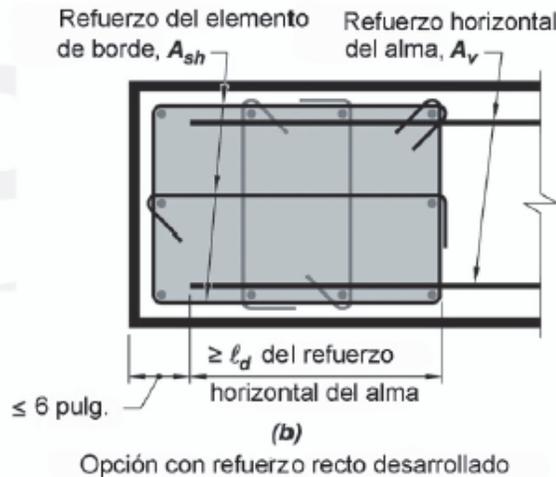


Figura 7: Desarrollo del refuerzo horizontal del muro dentro del elemento confinado de borde (a) y (b) [1].

En relación al detallado de acero vertical de muros estructurales con miembros de borde, la llamada longitud de rótula plástica (L_p) de FONDONORMA en la cual no están permitidos los empalmes es $L_p = 0,5L_w$, mientras que en ACI dicha longitud aumenta hasta $0,0L_w$.

FONDONORMA exige terminar el acero horizontal del muro sin MB con ganchos o ligaduras

en “U” para ciertas condiciones de cortante, y grapas entre mallas para zonas no confinadas. Por su parte, ACI no plantea dichas exigencias.

La norma americana indica tanto las longitudes de anclaje como la posición y detalle que deben tener las barras horizontales del alma dentro del núcleo del MB (Figura 7). Mientras que el código nacional no es explícito en estos puntos de gran importancia para garantizar el correcto comportamiento del elemento.

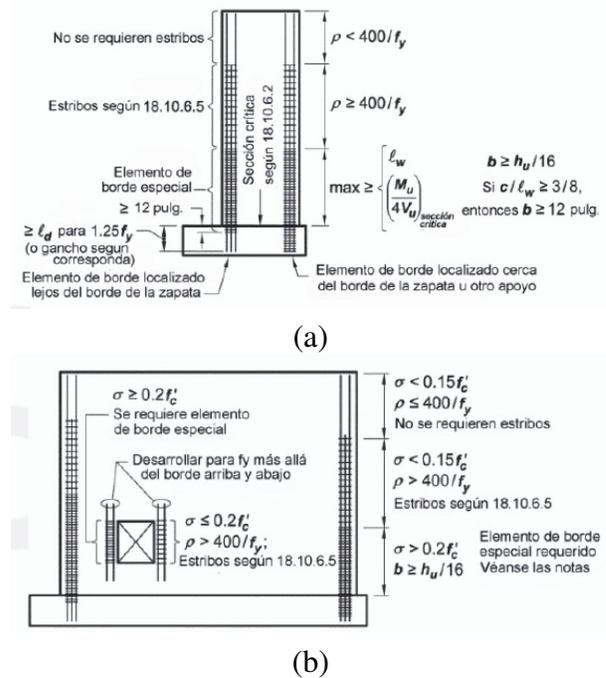


Figura 8: Resumen de los requisitos para muros especiales [1].

La norma americana indica gráficamente las longitudes verticales de MEB, MOB y ZNC, sus características de confinamiento y su anclaje en la fundación. Mientras que FONDONORMA no es explícita con respecto a estos puntos que son fundamentales para garantizar el correcto comportamiento dúctil del elemento (Figura 8).

3.4. Ejemplos del diseño bajo requerimientos de cada normativa en estudio

Para procurar evidenciar la notoriedad o profundidad de las características evaluadas en cada variable se diseñaron dos muros de características geométricas, mecánicas y solicitaciones iguales,

Características Geométricas:

$B_w := 60$ cm
 $L_w := 620$ cm
 $H_w := 30$ m
 $L_n := 345$ cm
 $r := 4$ cm (Recubrimiento)

$A := B_w \cdot L_w = 37200$ cm²
 $dw := 0.8 \cdot L_w = 496$ cm

Características Mecánicas

$f'_c := 300$ Kgf/cm²
 $f_y := 4200$ Kgf/cm²
 $\Delta := 20$ cm
 $\phi := 0.60$

Solicitaciones

$N_u := 300000$ Kgf
 $M_u := 6200000$ Kgf .m
 $V_u := 520000$ Kgf

Figura 9: Variables de entrada del ejemplo de diseño.

indicadas en la Figura 9; pero empleando las metodologías expuestas por cada una de las normas en estudio, desarrollado por Arteaga y Malavé [11].

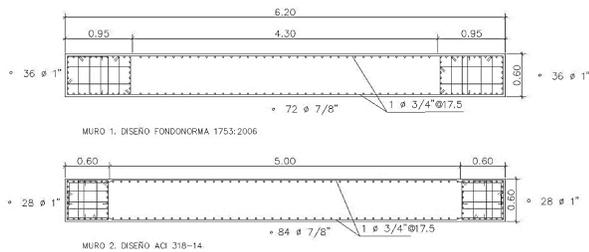
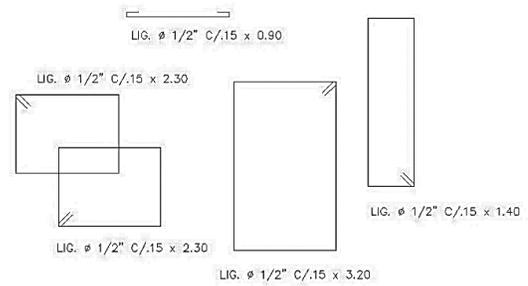


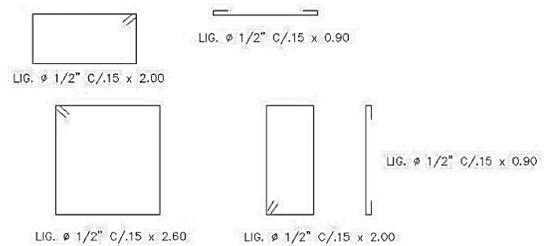
Figura 10: Comparación de las secciones transversales de ambos muros.

Como resultado del detallado del acero de refuerzo por ambas normas, se puede observar en la Figura 10 una significativa diferencia en las dimensiones de ambos miembros de borde, requiriendo el diseño nacional una longitud de 95 cm contra 60 cm del diseño americano, toda vez que estos se determinaran por diferentes métodos. Esto trajo como consecuencia, una mayor concentración de acero de refuerzo en los miembros de borde en el diseño de FONDONORMA, para poder garantizar la resistencia a flexión requerida.

Por las razones antes expuestas, es simple entender que un miembro de borde de mayores dimensiones requiere de mayores áreas de acero por corte para lograr confinar el acero de refuerzo



MURO 1. DISEÑO FONDONORMA



MURO 2. DISEÑO ACI

Figura 11: Comparación del armado de confinamiento de los miembros de borde.

longitudinal, el detallado del acero horizontal de los miembros de borde se muestran en la Figura 11.

Por último y donde es más notoria la diferencia, se observa en la Figura 12 donde es posible observar por medio de los esquemas planteados, la diferencia entre ambos detallados de acero longitudinal y separación del acero de confinamiento. Para el diseño realizado mediante FONDONORMA se mantuvo constante la cantidad de acero requerido desde la base del muro hasta el tope del mismo, esto debido a que la norma no especifica si es posible hacer una reducción, en que tramos y en que proporciones; como si es el caso del diseño ACI, el cual distingue los miembros especiales de borde, miembros ordinarios de borde y la zona no confinada y sus características en función a los esfuerzos y cuantías de refuerzo longitudinal.

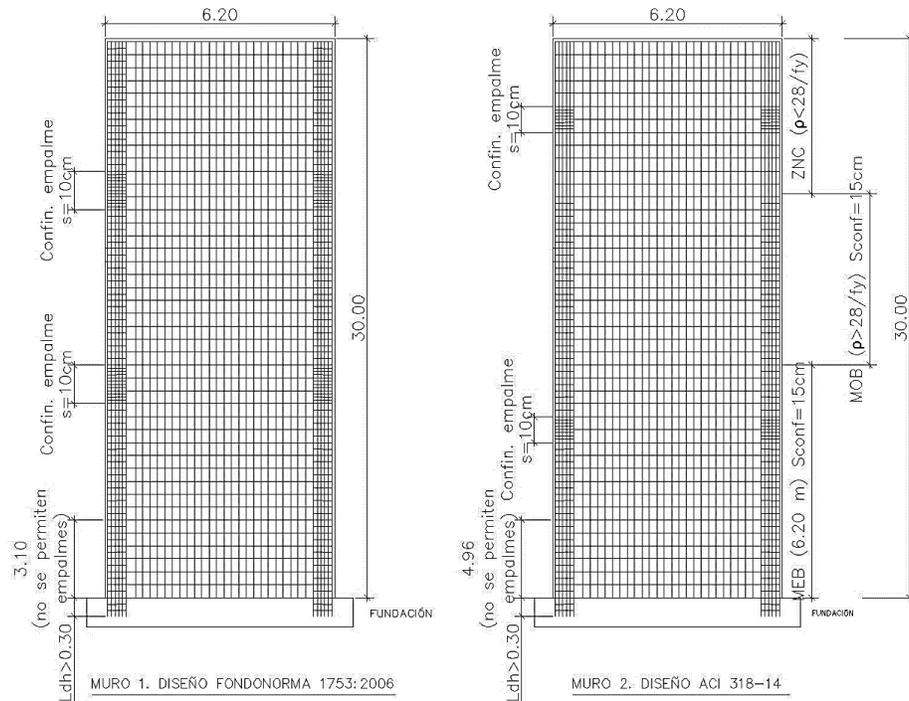


Figura 12: Comparación del esquema longitudinal de los muros diseñados por ambas normas.

4. Conclusiones

Son numerosas las diferencias de forma o estructura encontrada en ambas normas, mediante las tablas comparativas, hay que destacar que: FONDONORMA si bien sugiere el diseño de muros resumido en un único capítulo, resulta difícil para el lector establecer las diferencias entre niveles de diseño y la necesidad de incorporar miembros de borde. La norma ACI por su lado distingue exactamente cada nivel de diseño y establece que únicamente existen requisitos de miembro de borde para el equivalente a ND3. Por otra parte, es apreciable el muy superior número de imágenes y comentarios que brinda la norma norteamericana que hace mucho más entendible el proceso de diseño, ya que dichas aclaratorias se muestran inmediatamente paralelas al articulado.

En relación a las variables de contenido, no existe una amplia diferencia en cuanto a los aspectos fundamentales relacionados con la cantidad y separación de acero de confinamiento, al igual que las cuantías mínimas de acero longitudinal

y transversal. Sin embargo, cabe destacar que si existen aspectos en el código norteamericano donde tiende a ser menos conservadora, como por ejemplo en cuanto a la separación máxima del acero horizontal o el aumento del cinco por ciento del factor de minoración de resistencia por corte para ND3, lo que puede entenderse como resultado de una mayor certidumbre en el diseño de estos elementos con el paso de los años. Por otro lado ha precisado detalles como el aumento de la longitud de la rótula plástica.

Otro aspecto importante y que requiere de énfasis es la distinción realizada por la ACI en lo referente a las zonas que conforman a los miembros de borde. Ya que por falta de esta distinción en la normativa local, el ingeniero estructural que hace uso de ella, ha de tender a diseñar todo el elemento de borde como un “Miembro Especial de Borde”, desde la base del muro hasta su extremo superior, aun cuando estructuralmente no se requieran de tales exigencias, aumentando considerablemente su costo en materiales y tiempo de ejecución. Ya que al desconocer las exigencias

reales y las características que deberá tener el miembro de borde más allá de la zona de plastificación, muy probablemente utilizará el diseño más conservador y exigente. En caso contrario, y peor aún, propondrá una solución deficiente.

En lo que respecta a las longitudes de miembros de borde, FONDONORMA presenta una significativa deficiencia al no determinar la longitud horizontal que debe tener este para el procedimiento 1, quedando a discreción del ingeniero estructural. Cosa que no ocurre con ACI que limita la longitud horizontal a ser a lo sumo la longitud de confinamiento presentada por el código local. Adicionalmente dentro del tema de confinamiento, la ACI es estricta y clara con las exigencias de anclaje del acero horizontal del alma del muro dentro del núcleo del miembro de borde, lo cual en FONDONORMA queda a discreción del proyectista.

Reconocimiento

El presente trabajo fue distinguido con la Mención Publicación por la Escuela de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

Referencias

- [1] Building code requirements for structural concrete, ACI 318–14. Standar, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA, 2014.
- [2] S. Bondarenko and Tezzi García. Manual de cálculo y diseño de muros estructurales de concreto armado. Trabajo especial de grado, Escuela de ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2012.
- [3] A. Brice no and N. Carreras. Análisis y diseño de muros estructurales de concreto, considerando las experiencias de los terremotos de Chile 2010 y Nueva Zelanda 2011. Trabajo especial de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Andrés Bello, Caracas, 2013.
- [4] T. Paulay and M.J.N. Priestley. *Seismic Design of reinforced concrete and masonry buildings*. John Wiley & Sons, New York, 1992.
- [5] R. Park and T Paulay. *Estructuras de concreto reforzado*. Editorial Limusa, México D.F., 1978.
- [6] Sergio Alcocer. Comportamiento y diseño de estructuras de concreto reforzado muros estructurales. Technical report, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), México, D.F., 1995.
- [7] C Alarcon, MA Hube, and JC de la Llera. Effect of axial loads in the seismic behavior of reinforced concrete walls with unconfined wall boundaries. *Engineering Structures*, 73:13–23, 2014.
- [8] Mario E Rodriguez. Una revisión crítica de la práctica de diseño por sismo de estructuras en México. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (94):27–48, 2016.
- [9] Varsha R Hane. Comparative study of strength of rc shear wall at different location on multi–storied residential building. *International Journal of Civil Engineering Research*, 5(4):391–400, 2014.
- [10] Proyecto y construcción de obras en concreto estructural, FONDONORMA 1753:2006. Norma, Fondo para la Normalización y Certificación de la Calidad, Caracas, Venezuela, 2006.
- [11] S. Arteaga and J. Malavé. Análisis comparativo del diseño de muros estructurales de concreto armado por las normas FONDONORMA 1753:2006 y ACI 318-14. Trabajo especial de grado, Departamento de Ingeniería Estructural, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela, 2016.

Parameters relating to chemical properties and organoleptic quality of waters confluing reservoirs for human consumption

Milagros Jimenez–Noda^a, Rosalyn Cova^b, Lilitza Trías^a, Cristóbal Vega^c, Lisbeth Manganiello^{*a}

^a*Centro de Investigaciones Químicas (CIQ), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

^b*Instituto Nacional de Parques (INPARQUES), Valencia, Venezuela*

^c*Instituto de Matemáticas y Cálculo Aplicado (IMYCA), Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela*

Abstract.-

The origin of water from quality areas according to international standards empowers water to be fit for human consumption. The need to study natural reservoirs in the rainy and drought period has been observed in Venezuela, so the goal of this study is to evaluate the parameters related to chemical properties and organoleptic quality of surface water bodies that converge to reservoirs destined for consumption. In both periods; specifically El Paíto river, a source of water that flows into the Pao Cachinche reservoir. With a sample of both periods, in several representative points of the route of El Paíto river, were determined physical-chemical and organolépticos primordials parameters for the classification of the quality of the bodies of water. The statistical tests allowed to guarantee that the waters in the flow of the river El Paíto at this moment do not meet the necessary characteristics of waters, to be able to be conditioned by means of conventional treatments.

Keywords: classification and quality control; water areas quality; El Paíto river; Pao Cachinche reservoir

Parámetros relativos a propiedades químicas y calidad organoléptica de aguas que confluyen a embalses destinados al consumo humano

Resumen.-

El origen del agua de las zonas de calidad de acuerdo con las normas internacionales permite que el agua sea apta para el consumo humano. La necesidad de estudiar los embalses naturales en el período lluvioso y de sequía se ha observado en Venezuela, por lo que la meta de este estudio es evaluar los parámetros relacionados con las propiedades físico-químicas y la calidad organoléptica de las masas de agua superficial que convergen a reservorios destinados al consumo; específicamente el río El Paíto, una fuente de agua que desemboca en el embalse de Pao Cachinche. Con una muestra de ambos períodos, en varios puntos representativos de la ruta del río El Paíto, se determinaron parámetros físico-químicos y organolépticos primordiales para la clasificación de la calidad de los cuerpos de agua. Los ensayos estadísticos permitieron garantizar que las aguas en el caudal del río El Paíto en este momento no cumplen con las características necesarias de las aguas, para poder ser acondicionadas mediante tratamientos convencionales.

Palabras clave: clasificación y control de la calidad; calidad de zonas de aguas; río El Paíto; embalse Pao Cachinche

Recibido: noviembre 2016

Aceptado: marzo 2017

* Autor para correspondencia

Correo-e: lmanganiello@uc.edu.ve (Lisbeth Manganiello)

1. Introducción

La importancia de contar con fuentes de aguas superficiales de una calidad acorde con lo establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) [1] permitirá a la población disponer

de aguas aptas para el consumo humano. No obstante, la acción indiscriminada del hombre (contaminación antrópica) y la contaminación natural que incide con menos proporción son la causa de que muchos embalses destinados al consumo humano presenten una baja calidad en sus aguas. Los impactos negativos a los que son sometidas estos recursos hídricos (disposición inadecuada de residuos sólidos, vertidos de aguas residuales: domésticas, industriales, agrícola y ganadera) generan variaciones en sus propiedades físicas, químicas, biológicas y organolépticas, conllevando al deterioro y cambio en las condiciones de la fuente, incidiendo en el desempeño operacional de las plantas potabilizadoras y provocando inclusive un riesgo de tipo sanitario en el agua, generando un mayor impacto sobre la salud pública [2].

Torres y colaboradores establecieron que los índices de calidad de agua (ICA) permiten evaluar la calidad de este recurso en fuentes superficiales que son empleadas para consumo humano, siendo más sensibles a variaciones en el tiempo los de tipo multiplicativo que los de tipo aditivo; permitiendo además, comparar dichos parámetros con la normativa legal correspondiente en el área de estudio, a fin de establecer acciones que conlleven a garantizar un suministro de agua seguro [2]. Polla *et al.* [3] realizaron un estudio de calidad de agua en un tramo de un río (Neuquén) ubicado en la Patagonia Argentina, ellos aplicaron un modelo matemático de simulación unidimensional; la importancia de trabajar con modelos matemáticos de simulación es que estos permiten visualizar la variaciones espaciales y temporales de los diferentes parámetros de calidad que definen a un cuerpo de agua apto para el consumo humano, además se convierten en una herramienta para la planificación de uso a futuro de los recursos hídricos. Ocasio [4] realizó evaluaciones en el río Piedra ubicado en San Juan de Puerto Rico, Puerto Rico, el aporte de este trabajo consiste en la evaluación de un cuerpo de agua superficial en períodos de lluvia y sequía, encontrándose que en el período lluvioso los parámetros evaluados de acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de EEUU

(USEPA) presentaron aumento de concentraciones con respecto al período de sequía.

Moreno [5] enfatiza en su trabajo la importancia de la calidad del recurso hídrico, dado que de su calidad depende el correcto desempeño de las plantas potabilizadoras; en su trabajo refiere que un cuerpo de agua destinado al consumo humano en mal estado provocó reiterados eventos de suspensión de la planta potabilizadora dejando un millón seiscientos habitantes sin el preciado líquido, hechos ocurridos entre los años 2000 al 2012. Arce y Leiva [6] proponen en su investigación el uso de marcadores biológicos que permitan establecer la calidad del agua a fin de ofrecer otra alternativa complementaria a los parámetros tradicionales como son los organolépticos y fisicoquímicos. Peñafiel [7] en su trabajo exponen que los parámetros de calidad que presentan valores críticos en época de lluvia son: sólidos suspendidos, turbiedad y fosfatos, y en período seco son: sólidos disueltos, alcalinidad y dureza entre otros; además el estudio muestra que a medida que avanza el recorrido de esta fuente natural se observa el deterioro de los parámetros antes mencionados. Jáuregui–Medina *et al* [8] en su investigación resaltan la necesidad del óptimo funcionamiento de las plantas destinadas al tratamiento de aguas residuales (PTAR) que posteriormente son conducidas al cuerpo de agua natural que alimentan a las plantas potabilizadoras, en su investigación destacan que el mal funcionamiento de las PTAR comprometen la calidad del agua que se obtiene después del proceso de potabilización. Otro aspecto importante a tomar en cuenta son las fuentes subterráneas que convergen a cuerpos de agua naturales, tal es el caso de la Cuenca del río Pao que converge al embalse Pao Cachinche principal fuente de abastecimiento destinada al consumo humano.

Navas [9] en su investigación estudian las reservas de aguas subterráneas en la Cuenca media del río Pao hasta el Lago de Valencia, pudiendo observar que el acuífero adquiere una condición muy salobre, debido a un alto grado de mineralización ocasionado por la penetración o empuje de las aguas subterráneas del Lago de Valencia haciéndola no apta para el consumo

Zuloaga para ser destinada al consumo humano; entre los aportes más críticos se encuentran: las aguas provenientes del Río Cabriales, la descarga del trasvase del Lago de Valencia (el cual contiene aguas del Lago y efluentes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de los Guayos (PTAR)), la confluencia de aguas de caños de diferentes poblaciones, tal como caño la Yuca, y José Leonardo Chirinos, los efluentes de las PTAR La Mariposa, así como los lixiviados del vertedero la Guasima que por escorrentía se van arrastrando a la Cuenca del Pao.

La Figura 1 muestra la ubicación geográfica de la Cuenca del Pao, del embalse y sus tributarios, destacándose en detalle el río Paíto.

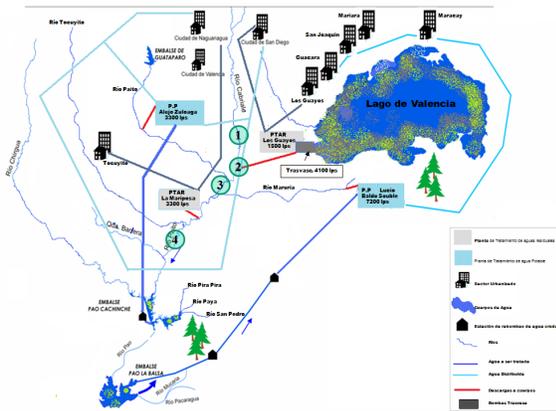


Figura 2: Puntos seleccionados para el muestreo.

La Figura 2 muestra los puntos seleccionados de acuerdo a los focos de contaminación y la dilución por afluentes, el punto 1 corresponde al puente la Envidia, sector la Envidia, municipio Valencia (Coordenadas: N 1.118.712 / E 610.036) (parte baja del río Cabriales), el punto 2 corresponde a la descarga de la obra del trasvase del Lago de Valencia, asentamiento Campesino la Esperanza (Coordenadas: N 1.116.830 / E 610.160), el punto 3 corresponde al desparramadero el Paíto, municipio Libertador (Coordenadas: N 1.116.151 / E 609.844) (donde ya se han unido todas estas aguas y la de diferentes caños de las poblaciones aledañas) y el punto 4 corresponde al puente la Arenosa, sector la Arenosa del municipio Libertador (Coordenadas: N 1.107.046 / E 599.837) (por el que circulan efluentes de la

PTAR la Mariposa y en la que además, se han incorporado todos los afluentes en estudio).

2.2. Materiales y equipos

Materiales: Capta muestras de material plástico (fabricación Home-made).

Equipos: Sistema de Posicionamiento Global (GPS) Marca Garmin, Medidor de pH – Marca HANNA Instruments, Medidor de conductividad – Marca HANNA Instruments, Medidor de Oxígeno Disuelto – Marca HACH, Medidor de Sólidos Totales – Marca HANNA Instruments, Medidor de Turbidez – Marca La Motte. Cámara Fotográfica Marca Samsung.

2.3. Metodología estadística

Los datos fueron tabulados por punto de recolección y por temporada de lluvia o sequía. Para verificar si cumplían con la normativa fueron realizadas pruebas de hipótesis con un nivel de confianza del 95 % respecto a los límites establecidos y las diferencias entre los distintos puntos de recolección y entre las dos temporadas de recolección de datos.

2.4. Recolección de muestra

La recolección de muestras estuvo soportada según lo establecido en la Norma Venezolana COVENIN 2709:2002 [12], la cual establece: los tipos de muestreo, el tipo de muestra a captar y la modalidad de captación. Según los tipos de muestreo los sitios de interés a caracterizar son aguas naturales, en este caso: ríos y cursos de agua; el tipo de muestra a captar es instantáneas, lo que aporta información sobre la calidad del recurso en el punto y momento dado; la modalidad de captación es de forma manual, realizada directamente por el investigador y el equipo de ingenieros colaboradores registrando mediante el formato de inspección la siguiente información: coordenadas geográficas de los puntos evaluados, hora y fecha de captación, condiciones ambientales y climáticas, registro fotográfico, así como los datos experimentales de los parámetros relativos a propiedades químicas y calidad organoléptica obtenidos por los equipos de campo correspondientes a la medición in situ. Los parámetros medidos

in situ fueron los siguientes: Temperatura, pH, Conductividad, Oxígeno Disuelto, Sólidos Totales Disueltos, Turbidez, Color y Olor.

Para establecer el cronograma de recolección de muestras, se contemplaron como lapsos de muestreo los dos períodos estacionales del país, lluvia y sequía. Considerando además, las condiciones meteorológicas del estado a través de información suministrada por el Instituto de Meteorología e Hidrología (INAMEH) y el Servicio de Meteorología de la Aviación Militar (SERMETAVIA), e igualmente, el número de muestras probables captadas por período estacional se determinó mediante la coordinación con el Laboratorio de Procesos Estocásticos Meteorológicos del Instituto de Matemática y Cálculo Aplicado (IMYCA) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

Los datos fueron recogidos a lo largo del Río Paíto en cuatro puntos de muestreo:

P1: Puente La Envidia,

P2: Trasvase,

P3: Desparramadero el Paíto y

P4: Puente La Arenosa.

Con una recolección de 14 días en el período de lluvias y 16 días en el período de sequía.

3. Resultados

3.1. Tabulación de los resultados

A los datos de los parámetros físico-químicos de la calidad de agua les fue calculada sus estadísticas principales que están reportadas en las Tablas 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7.

3.1.1. Temperatura

La Tabla 1 muestra que ninguno de los valores de la temperatura supera los 40°C y que no se supera la diferencia de 3°C de las mediciones entre los cuatro puntos de muestreo, como está reflejado en la Figura 3. La figura muestra una diferencia entre los valores de temperatura entre los puntos de muestreo P1, aguas arriba y P2; por esta razón fue realizada la prueba de hipótesis para la diferencia de las medias de las muestras pareadas por observación.

Tabla 1: Estadísticas principales de temperatura de la muestra recolectada en el Río Paíto

Parámetros	Punto de muestreo			
	P1	P2	P3	P4
Media	26,43	28,33	28,55	27,11
Mediana	26,5	28,7	28,4	27,2
Mínimo	25,3	14,2	27,0	25,1
Máximo	27,5	30,0	30,7	29,4
Des. Típ.	0,5286	2,9967	0,8565	0,7839
C.V.	0,0199	0,1058	0,0299	0,0289
Porc. 5 %	25,41	18,37	27,11	25,38
Porc. 95 %	27,28	30,00	30,59	28,79
Rango IQ	0,70	0,80	0,83	0,53
Permitido	< 40°C, Δ < 3°C (ver [1, 13, 14])			

Tabla 2: Estadísticas principales del oxígeno disuelto de la muestra recolectada en el Río Paíto

Parámetros	Punto de muestreo			
	P1	P2	P3	P4
Media	5,2157	0,7224	4,3667	2,906
Mediana	5,225	0,25	4,66	2,89
Mínimo	2,51	0,09	0,16	1,39
Máximo	7,7	4,18	5,48	4,79
Des. Típ.	0,89975	1,02762	1,04218	0,88900
C.V.	0,17251	1,42251	0,23867	0,30592
Porc. 5 %	3,236	0,105	1,326	1,522
Porc. 95 %	7,035	3,835	5,288	4,779
Rango IQ	0,76	0,55	0,60	1,19
Permitido	mayor de 4,0 mg/l (ver [14])			

Tabla 3: Estadísticas principales del pH de la muestra recolectada en el Río Paíto

Parámetros	Punto de muestreo			
	P1	P2	P3	P4
Media	7,35	7,34	7,48	7,24
Mediana	7,42	7,40	7,56	7,25
Mínimo	5,86	7,00	6,70	7,02
Máximo	7,86	7,40	7,82	7,59
Des. Típ.	0,38129	0,10000	0,21788	0,11958
C.V.	0,05189	0,01362	0,02912	0,01653
Porc. 5 %	6,2835	7,03	6,931	7,031
Porc. 95 %	7,7665	7,4	7,765	7,4965
Rango IQ	0,27	0,1	0,225	0,1525
Permitido	6,0 – 8,5 (ver [14])			

Tabla 4: Estadísticas principales de los sólidos totales disueltos de la muestra recolectada en el Río Paíto

Parámetros	Punto de muestreo			
	P1	P2	P3	P4
Media	225	488	282,8	249,8
Mediana	231	493	298	256
Mínimo	149	428	159	124
Máximo	324	506	355	355
Des. Típ.	43,0469	16,9436	46,4939	46,8022
C.V.	0,19132	0,0347	0,1644	0,18735
Porc. 5 %	154,5	435,8	175,5	144,9
Porc. 95 %	302	504,8	344,5	331,9
Rango IQ	60,75	11,5	47	49,25
Permitido	menor a 1500 mg/l (ver [14])			

Tabla 5: Estadísticas principales de la conductividad eléctrica de la muestra recolectada en el Río Paíto

Parámetros	Punto de muestreo			
	P1	P2	P3	P4
Media	451,4	938,2	551,3	488,1
Mediana	462,5	983,5	587,5	503,0
Mínimo	300	658	318	248
Máximo	647	1008	710	709
Des. Típ.	84,1499	100,566	94,9755	101,01
C.V.	0,18642	0,10719	0,17229	0,20693
Porc. 5 %	311,55	665,65	351	291,45
Porc. 95 %	603,55	1006,5	688,55	663,9
Rango IQ	121,25	73,5	129,5	139,25
Permitido	menor a 1000 micromhos/cm (ver [1, 13])			

Tabla 6: Estadísticas principales de la turbidez de la muestra recolectada en el Río Paíto

Parámetros	Punto de muestreo			
	P1	P2	P3	P4
Media	13,75	20,6	17,33	35,56
Mediana	7,7	17,6	12,4	30,3
Mínimo	4	12,1	3,8	22,1
Máximo	53,1	37	55,8	103
Des. Típ.	12,9285	6,83087	13,9409	16,5656
C.V.	0,93991	0,33159	0,80428	0,46585
Porc. 5 %	4,275	12,31	4,515	23,145
Porc. 95 %	47,16	35,35	53,71	82,87
Rango IQ	8,8	10,8	10,75	8,4
Permitido	menor de 250 UNT (ver [14])			

Tabla 7: Estadísticas principales del olor de la muestra recolectada en el Río Paíto

Punto de muestreo	Según normativa (ver [14])	
	permitido %	no permitido %
P1	100	0
P2	0	100
P3	26,67	73,33
P4	0	100

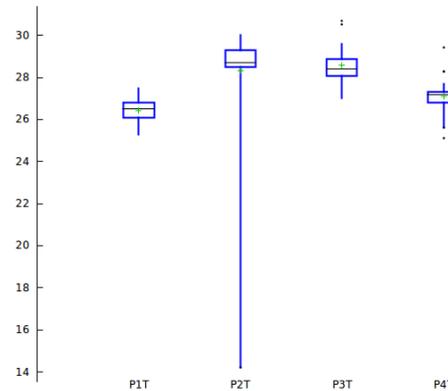


Figura 3: Gráfico de cajas para la temperatura de la muestra por puntos de muestreo.

H_0 : Diferencia de medias ≤ 3
 H_1 : Diferencia de medias > 3 .

Prueba que fue realizada para un nivel de confianza del 99 %, con los siguientes resultados: Tamaño muestral: $n = 25$, hay 5 datos faltantes. Media muestral = 1,888, desv. típica = 3,16588 Estadístico de contraste:

$$\hat{z} = \frac{|1,888 - 3|}{0,633175} = 1,75623,$$

el cual es mayor al t -valor crítico tabulado de 1,71088.

Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y así la diferencia significativa entre las mediciones de los puntos de observación es mayor a 3. Esto implica que las aguas vertidas en el travase tiene una temperatura significativamente superior a las del Río Paíto aguas arriba, lo cual viola la normativa existente.

Adicionalmente fue realizada la prueba de hipótesis de la existencia de diferencia significa-

tiva entre las muestras recogidas en la temporada de lluvias y la temporada de sequias. Con el resultado que no existe diferencia significativa de la temperatura entre las muestras de ambas temporadas.

3.1.2. Oxígeno disuelto

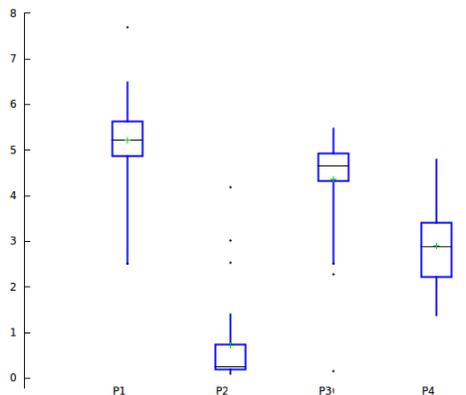


Figura 4: Gráfico de cajas para Oxígeno disuelto de la muestra por puntos de muestreo.

La Tabla 2 muestra que no todos los valores obtenidos en las muestras de Oxígeno disuelto están por encima del límite mínimo permitido de 4,0 mg/l (ver Figura 4), por esta razón fue necesario hacer pruebas de hipótesis para verificar si satisfacen estadísticamente este límite. Estas pruebas fueron realizadas por punto de muestreo.

Puente la Envidia. Para el punto de muestreo P1, los resultados son

H_0 : media poblacional = 4

H_1 : media poblacional > 4

Tamaño muestral: $n = 30$

Media muestral = 5,21567, desv. típica = 0,89975

t -valor calculado: 7,40037

t -valor tabulado (95 %): 1,69913.

Como el t -valor calculado es mayor al t -valor tabulado, hay que rechazar la hipótesis nula, luego la afirmación es que en el punto de muestreo P1 el Oxígeno disuelto supera significativamente el límite establecido.

Trasvase. Para el punto de muestreo P2, la Tabla 2 muestra que el rango de las observaciones

del Oxígeno disuelto es [0,09, 4,18], la prueba estadística con un nivel de confianza del 95 % afirma que Oxígeno disuelto es significativamente menor al límite establecido.

Desparramadero el Paíto. Para el punto de muestreo P3, el rango de las observaciones del Oxígeno disuelto es [0,16, 5,48], la prueba estadística con un nivel de confianza del 95 % afirma que Oxígeno disuelto es significativamente menor al límite establecido.

Puente la Arenosa. Para el punto de muestreo P4, el rango de las observaciones del Oxígeno disuelto es [1,39, 4,79], la prueba estadística con un nivel de confianza del 95 % afirma que Oxígeno disuelto es significativamente menor al límite establecido.

3.1.3. pH

Tabla 8: Rangos observaciones del pH de la muestra

Punto de muestreo	rango
P1	[5,86, 7,86]*
P2	[7,00, 7,40]
P3	[6,70, 7,82]
P4	[7,02, 7,59]
Rango de la norma	[6,00, 8,50]

* En el caso del Puente la Envidia más del 95 % de los valores de la muestra están en el rango de la normativa.

Un análisis de los rangos observaciones del pH muestra (ver Tabla 3) verifica que todas las mediciones están dentro de los rangos de la normativa, como muestra la Tabla 8.

3.1.4. Sólidos Totales Disueltos

Tabla 9: Rangos observaciones de sólidos totales disueltos de la muestra

Punto de muestreo	rango
P1	[148, 324]
P2	[428, 506]
P3	[159, 355]
P4	[124, 355]
Rango de la norma	menor a 1500 mg/l

El estudio de los rangos observaciones sólidos totales disueltos de la muestra dato en la Tabla 3) comprueba que todas las mediciones están dentro de los rangos de la normativa, como muestra la Tabla 9.

Adicionalmente fue realizada la prueba de hipótesis de la existencia de diferencia significativa entre las muestras recogidas en la temporada de lluvias y la temporada de sequías. Con el resultado que la concentración de sólidos totales disueltos es significativamente mayor en la temporada de lluvias.

3.1.5. Conductividad Eléctrica

Todos los valores de la conductividad eléctrica de la muestra son menores al límite permitido en la normativa como puede verse en la Tabla 5, salvo en el punto de muestreo del trasvase donde hay valores por encima de los 1000 micromhos. Por esta razón fue realizada una prueba de hipótesis.

H_0 :media poblacional = 1000

H_1 :media poblacional menor a 1000

Nivel de confianza del 95 %

t -valor calculado 3,07459

t -valor tabulado (24 dg) 1,71088

Como el t -valor calculado es mayor al t -valor tabulado, hay que rechazar la hipótesis nula y luego se afirma que los valores de la conductividad eléctrica son estadísticamente significativamente menor a los 1000 micromhos.

3.1.6. Turbidez

Tabla 10: Rangos observaciones de turbidez en la muestra

Punto de muestreo	rango
P1	[4,0, 53,1]
P2	[12,1, 37,0]
P3	[3,8, 55,8]
P4	[22,1, 103,0]
Rango de la norma	menor a 250 UNT

El estudio de los rangos observaciones turbidez en la muestra dato en la Tabla 6) comprueba que todas las mediciones están dentro de los rangos de la normativa, como muestra la Tabla 10.

3.1.7. Olor

El estudio del olor de la muestra obsevada dado en la Tabla 7 comprueba que sólo en el puente La Envidia, punto de muestreo P1, los datos cumplen con la normativa vigente.

3.2. Análisis de los resultados

Aunque la temperatura de los vertidos en la muestra, no supera los límites establecidos, llama la atención que en el trasvase la temperatura es superior al resto del caudal del río.

El oxígeno disuelto está muy por debajo del límite legal en los puntos del trasvase, el desparramadero el Paíto y el puente La Arenosa.

Los sólidos disueltos se incrementan significativamente en la temporada de lluvias, pero en ningún caso supera los límites de las normativas,

El olor de las muestras está fuera de la norma en los del puntos del trasvase, el Desparramadero El Paíto y el Puente La Arenosa.

4. Conclusiones

Los parámetros estudiados (temperatura, oxígeno disuelto, pH, sólidos totales disueltos, conductividad eléctrica, turbidez y el olor) recogen diferentes características físico-química y organolépticas que son fundamentales en la clasificación calidad de las agua, conforme a las normas usadas en este estudio. La falla en agunas de estas características indican deficiencias graves en la calidad de las aguas estudiadas. El exceso significativi de la temperatura en el punto del transvase es un aspecto que la administración debe considerar al momento de buscar el saneamiento de la cuenca del río Paíto. Los valores bajos obtenidos en los niveles de oxígeno disuelto, los cuales son significativamente inferiores al límite establecido en los puntos del trasvase, el desparramadero El Paíto y el puente La Arenosa, así como el olor de las aguas establecen la conclusión de que las aguas en el caudal del río El Paíto actualmente no cumplen con las características necesarias de aguas que puedan ser acondicionadas por medio de tratamiento convencionales.

Referencias

- [1] OPAS OMS. *Guías para la calidad del agua potable*. Organización Mundial de la Salud, Secretaría General, 1995.
- [2] Patricia Torres, Camilo Hernán Cruz, and Paola Janeth Patiño. Índices de calidad de agua en fuentes superficiales utilizadas en la producción de agua para consumo humano: Una revisión crítica. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 8(15):79–94, 2009.
- [3] GM Polla, FE Horne, and AC Dufilho. Aplicación de un modelo de calidad de agua a un tramo del río Neuquén–Patagonia Argentina. *Agrociencia*, 8(2):61–71, 2004.
- [4] Félix A. Ocasio Santiago. Evaluación de la calidad del agua y posibles fuentes de contaminación en un segmento del río piedras. Trabajo de grado de maestría, Ciencias en Gerencia Ambiental en Evaluación y Manejo de Riesgo Ambiental, Escuela Graduada de Asuntos Ambientales, Universidad Metropolitana, San Juan, Puerto Rico, noviembre 2008.
- [5] Gustavo Eduardo Moreno Ángulo. Análisis ambiental de la cuenca alta del río Cauca, sus actores principales y la afectación en el suministro de agua potable para la ciudad de Santiago de Cali. ¿Qué acción tomar? Trabajo de grado de maestría, Ingeniería industrial, Santiago de Cali, Colombia, junio 2014.
- [6] MF Arce and MA Leiva. Determinación de la calidad de agua de los ríos de la ciudad de Loja y diseño de líneas generales de acción para su recuperación y manejo. Trabajo de grado de maestría, Universidad Técnica Particular de Loja, 2009.
- [7] Ana Gabriela Peñafiel Romero. Evaluación de la calidad del agua del río Tomebamba mediante el índice ICA del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2014. Directora: Gladys Guillemina Pauta Calle.
- [8] Cecilia Jáuregui-Medina, Santiago Ramírez-Hernández, R Espinoza-Rodríguez, Raúl Tovar-Rodarte, Beatriz Quintero-Hernández, and Imelda Rodríguez-Castañeda. Impacto de la descarga de aguas residuales en la calidad del río Mololoa (Nayarit, México) y propuestas de solución. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 3:65–73, 2007.
- [9] Rocio Navas Ramírez. Estudio de las reservas de aguas subterráneas en la cuenca media del río Pao hasta el Lago de Valencia, estado Carabobo. Trabajo especial de grado, Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela, 2008.
- [10] María Leny Matos and Marina Rodríguez de Estaba. Cambios iniciales en la desestratificación del embalse Pao Cachinche por aireación artificial Edo. Carabobo, Venezuela. In *XXVIII Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, pages 1–8, México, octubre 2002. FEMISCA.
- [11] Hidrocentro. Mapa del ordenamiento territorial. Technical report, Gobernación del Estado Carabobo, 2007.
- [12] Covenin 2709:2002. Aguas naturales, industriales y residuales. Guía para las técnicas de muestreo, mayo 2002.
- [13] FAO, editor. *Texto Unificado de Legislación Ambiental*, volume Libro VI, chapter Norma de Calidad Ambiental y de Descarga de efluentes: Recurso agua, Anexo I. FAO, Roma, 2002.
- [14] Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos, octubre 1995. Gaceta Oficial, Decreto 883.

Línea editorial

1. Misión científica

Revista INGENIERÍA UC es el principal organismo de difusión científica y tecnológica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

El objetivo de Revista INGENIERÍA UC es la difusión de trabajos científicos y tecnológicos en todas las áreas de la ingeniería, así como también ciencias afines aplicadas a la ingeniería.

Revista INGENIERÍA UC está adscrita a la Dirección de Investigación de la Facultad de Ingeniería. Es considerada por todos sus profesores como uno de los patrimonios más importantes de la Facultad de Ingeniería. Su primer volumen aparece en diciembre de 1992. Fundada por Dr. Edilberto Guevara en 1992 (actualmente Editor Honorario).

2. Cobertura temática

Revista INGENIERÍA UC considerará para su difusión trabajos *originales e inéditos* (Los autores deben enviar la carta de compromiso), en español e inglés. Manuscritos en las áreas de la ingeniería de todas sus especialidades, pero en particular en las áreas de industrial, eléctrica, mecánica, civil, química y telecomunicaciones; así como de las ciencias básicas aplicadas a la ingeniería: matemáticas, física, química, computación, biología, ciencias ambientales, bioingeniería, biotecnología, estadística, etc.

3. Foro de Revista INGENIERÍA UC

La audiencia a la cual está dirigida consta de todos los investigadores en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas. En particular a los investigadores, profesores y estudiantes de Doctorado, Maestría y pregrado en las áreas de ingeniería y ciencias básicas afines. Esta audiencia es extendida a los gerentes de las áreas de innovación y desarrollo tecnológico del sector industrial. El foro tiene cubre las comunidades a nivel local, Universidad de Carabobo y sus estado de influencia; nivel nacional, toda Venezuela; así como nivel internacional.

Todos los artículos son revisados por el Comité Editorial y arbitrados, a doble ciego, por el Comité Técnico y por especialistas en la materia.

Revista INGENIERÍA UC es publicada cada cuatro meses bajo los auspicios del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC).

ISSN 1316-6832

Depósito Legal pp 92.0200

Dirección de Investigación.

Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo

Campus Bárbula, Naguanagua, Estado Carabobo. Código Postal 2008. Venezuela

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>

Correo-e revistaing@uc.edu.ve

Editorial line.

1. Scientific mission

Revista INGENIERÍA UC is the main body for scientific and technological diffusion at Facultad de Ingeniería of Universidad de Carabobo.

The Revista INGENIERÍA UC objective is the diffusion of scientific – technological works in all areas of engineering, as well as related sciences applied to engineering.

Revista INGENIERÍA UC is subscribed to Dirección de Investigación of Facultad de Ingeniería. It is considered by all its professors as one of the most important patrimonies of the Faculty of Engineering. Its first volume appears in December of 1992. Founded by Dr. Edilberto Guevara in 1992 (currently Honorary Editor).

2. Thematic coverage

Revista INGENIERÍA UC will consider for its diffusion original and unpublished works (The authors must send the commitment letter), in Spanish and English. Manuscripts in engineering areas of all its specialties, but particularly in the areas of industrial, electrical, mechanical, civil, chemical and telecommunications; as well as the basic sciences applied to engineering: mathematics, physics, chemistry, computation, biology, environmental sciences, bioengineering, biotechnology, statistics, etc.

3. Revista INGENIERÍA UC forum

The target audience is made up of all researchers in the areas of science, technology, engineering and mathematics. In particular the researchers, professors and students of Doctorate, Master's and undergraduate in the areas of engineering and related basic sciences. This audience is extended to innovation and technological development areas managers of the industrial sector. This forum has covers local communities, Universidad de Carabobo and their state of influence; national level, all of Venezuela; as well as international level.

All articles are reviewed by Editorial Committee and refereed, double-blinded, by Technical Committee and by specialists in the field.

Revista INGENIERÍA UC is published every four months under the auspices of Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo (CDCH-UC).

ISSN 1316-6832

Depósito Legal pp 92.0200

Dirección de Investigación.

Facultad de Ingeniería, Universidad de Carabobo

Campus Bárbula, Naguanagua, Estado Carabobo. Código Postal 2008. Venezuela

<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>

Correo-e revistaing@uc.edu.ve

Normas para la presentación de artículos

Aspectos Generales

Revista INGENIERÍA UC publica trabajos *originales e inéditos* que estén dentro de su línea editorial (ver Apéndices: 1). Por lo cual, está abierta a la participación de autores, tanto internos como externos a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo.

Los autores firmarán una carta de compromiso de la originalidad de su trabajo (ver Apéndices: 7).

4. Tipos de trabajos

- a Artículos de investigación inéditos con un máximo de veinte (20) páginas.
- b Notas técnicas con un máximo de cinco (5) páginas.
- c Artículos de actualización científica que resuman el Estado del Arte de un área específica de la ingeniería con un máximo de doce (12) páginas.
- d Artículo invitados especiales con un máximo de veinte (20) páginas.
- e Cartas al editor.

Al enviar un artículo a Revista Ingeniería UC, el autor del trabajo está comprometido en forma formal que el trabajo es original e inédito, manifiesta su conocimiento de las normas de la revista y que su trabajo será arbitrado.

5. Estilo

La redacción de los trabajos puede realizarse en idioma castellano o inglés. El trabajo original debe ser redactado en formato \LaTeX o en su defecto en Microsoft Word.

Los trabajos en Word deben emplear una fuente de la familia Times, estar almacenado en disco compacto y presentar tres copias en físico.

Los trabajos en \LaTeX deben incluir los archivos pdf, tex y una carpeta comprimida con las figuras en pdf, eps o png

Figuras

Las figuras deben ser en escalas de grises claros, no color, en formato vectorializado preferiblemente pdf,

eps o png (también se admite el formato jpg, si estas son de alta calidad y trabajó en word) deben añadirse cada una en archivos independientes y numeradas. Las leyendas o descripciones de la figuras no pueden estar embutidas en éstas, deben ser incluidas en el texto del trabajo y en un archivo aparte llamado Leyenda de Figuras.

Tablas:

Las tablas no pueden ser resaltadas por ningún tipo de color. Solamente los textos a resaltar mediante “negritas”. También deben incluirse las tablas en archivos aparte numerados y es necesario incluir un archivo con las leyendas de las tablas.

Toda tabla y/o figura deben ser numeradas en arábigos (1, 2, ...), citadas y suficientemente comentada en el texto del trabajo. La cita sería en la forma: “en la Figura 3”, “en la Tabla 2”, por ejemplo (sin abreviar). Toda tabla o figura debe tener un ancho máximo de 17,5cm.

No es estilo de la revista frases como; “en la Figura siguiente” o en la “Tabla anterior”

Los artículos provenientes del exterior del país serán aceptados a través de correo electrónico.

El orden a seguir para la redacción del trabajo es el siguiente:

1. Portada,
2. Introducción,
3. Metodología o Desarrollo de la Investigación,
4. Análisis y Discusión de Resultados,
5. Conclusiones y
6. Referencias Bibliográficas.

La portada debe contener:

- Título del trabajo en castellano y en inglés, con un máximo de 20 palabras.
- Nombre(s) del autor(es) y su dirección(es) institucionales completa(s), dirección postal, correo electrónico del autor para correspondencia (sólo será publicado el correo electrónico del autor para correspondencia).

- Resumen del trabajo en castellano y en inglés (Abstract) con una extensión máxima de 200 palabras.
- Al final tanto del resumen como del abstract debe agregarse entre tres (3) a cinco (5) palabras clave.
- volumen,
- número,
- páginas y
- año de publicación

Los encabezamientos de cada sección se escriben tipo título, mayúsculas sólo en la primera letra.

Citas

Las citas de referencias en el texto, contendrán el nombre del autor principal seguido de corchetes con el número correspondiente a la referencia, por ejemplo: Beale [9], o simplemente el número de la referencia bibliográfica [9], sin citar al autor.

Referencias

Para los artículos en \LaTeX se usará el estilo de bibliografía “unstr”.

Las referencias bibliográficas se escribirán en orden de citación, deben ser completas y contener todos y cada uno de los datos para identificarla.

Se pueden citar:

- Artículos de revistas.
- Artículos de memorias de congresos.
- Artículos en colecciones.
- Capítulos en un libro.
- Memorias de congresos.
- Libros
- Tesis doctorales.
- Trabajo de grado de materia.
- Trabajos especiales de grado.
- Informes técnicos.
- Manuales técnicos.

No se permiten direcciones electrónicas ni páginas web.

En el caso de artículos de revista contendrán:

- Autor(es) (Apellidos nombres, tipo título).
- Título.
- *Nombre de la revista,*

Por ejemplo:

[9] Beale G.O., Arteaga F.J. y Black W.M. Design and Evaluation of a Controller for the Process of Microwave Joining of Ceramics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 39(4), 301–312, 1998

En caso de libros ha de incluirse: Autor(es), título, editorial, lugar de publicación y año de publicación.

Por ejemplo:

[9] Hill J.M. and Dewynne J.N. *Heat Conduction*. Blackell set. Pub. , London, 1992

En caso de colección editada: Autor(es). Título, En: editor, año, título, volumen, editorial, lugar, número de páginas y año de publicación.

Por ejemplo:

[11] Kalla S. L. and Galué L. (1993): *Generalized fractional Calculus*. Global Publishing Company, USA, 145-178.

Se recomienda a los autores tener en cuenta las normas internacionales de nomenclatura para la utilización de símbolos, unidades y abreviaturas.

6. Notas Finales

Los artículos serán sometidos a arbitraje previa a la publicación. Se podrán entregar separatas impresas por tema a solicitud del autor, cuyo costo será a convenir

REVISTA INGENIERÍA UC
FACULTAD DE INGENIERÍA,
UNIVERSIDAD DE CARABOBO
CAMPUS BÁRBULA, NAGUANAGUA,
ESTADO CARABOBO,
CÓDIGO POSTAL 2008, VENEZUELA
<http://revista.ing.uc.edu.ve/>
<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>
Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Authors Information

General

1. Editorial line

Revista INGENIERÍA UC publishes original and unpublished works that are within its editorial line (see Apéndice: 2). Therefore, it is open to the participation of authors, both internal and external to Faculty of Engineering of University of Carabobo.

The authors will sign a commitment letter of the originality of their work (see Apéndice: 8).

2. Type of Manuscripts

- a Unpublished research articles with a maximum length of twenty (20) pages.
- b Technical Notes, with a maximum of five (5) pages.
- c State of the Art Articles (Update Articles) of a specific engineering field (maximum of twenty (20) pages).
- d Articles sent by invited guests, maximum of twenty (20) pages.
- e Letter to Editor.

Submitting an article to Revista Ingeniería UC, the work author is committed to formal so that the paper is original and unpublished, he shows his knowledge of Revista Ingeniería UC standards and that his work will be refereed.

3. Article Style

Articles may be sent either in Spanish or English. The original work should be written using \LaTeX or in Microsoft WORD.

The Word works must employ a font of family Time, to be stored in compact disk and to present three copies in physical.

The labored in \LaTeX must include the files pdf, tex and a folder with the figure in eps.

Figures

The figures must be in gray scale, no color, preferable in pdf, eps or png format (also admit jpg format, if these are of high quality) must to be added in records separated and numbered. Figures caption or descriptions can not be into these, must be includes in the text of the work and in a file apart called Figure Caption.

Tables

Tables can not be protruded by any type of color. Only the texts to be produced by means of “bold type”. Also must to be included in others files numerated and it is necessary to include a file with table caption.

All table and/or figure must be numbered in arabic (1, 2, 3, ...) and cited in the text of the work. The quote would be in the manner: “In Figure 3”, “in Table 2”, for example (without abbreviating). All board or figure must have a wide maximum of 17,5cm.

The articles coming from other country are accepted through electronic mail (email). The writing sequence for the articles shall have these steps: Title Page, Introduction, Methodology or Research Development, Analysis and Discussion of Results and Conclusions, and References.

The Title page should contain:

- Title of the work in Spanish and English, maximum 20 words.
- Full name(s) of author(s) with Full Institutional Address(es) (Address, Telephone, Email).
- Summary of the work in Spanish and in English (Abstract) with a maximum of 200 words for Unpublished, State of the Art articles and Technical Notes.
- At the end of the Summary in Spanish and Abstract in English three to five (3 to 5) Key Words should be added.

Cites

Text cites must contain the name of the main author followed by the corresponding number of reference; for

example: Jhonson [9], or simply [9] with no author name.

For L^AT_EX work will use bibliography style “unsrt”.

References

References will be written in order of citation, complete and should contain: author(s) (in caps and lower case), full title, journal, volume, number, pages and year of publication. For example:

[9] Beale G. O. Arteaga F. J. and Black W.M., Design and Evaluation of a Controller for the Process of Microwave Joining of Ceramics. *IEEE Transactions of Industrial Electronics*. 39(4), 301-312, 1992.

In the case of Books: Author(s) (in caps and lower case), *title*, publisher, place and year of publication should be included. For example:

[10] Hill J. M. and Dewynne J. N. *Heat Conduction*. Blackell Set. Pub., London, 1987.

Work in an edited collection: Author(s) (in caps and lower case), title. In: editor, *title*, volume, publisher, place and year. For example:

[11] Kalla S. L. and Galué L. Generalized fractional,

in *Calculus*. Global Publishing Company, USA, 145-178, 1997.

It is recommended to the authors to follow the International Nomenclature Norms (symbols, units and abbreviations).

4. Final Notes

Articles will be submitted for the reviewing process before they can be published. Offprints can be sent for article with a request from the Author(s). Any charge will be arranged by mutual agreement.

REVISTA INGENIERÍA UC
FACULTAD DE INGENIERÍA, UNIVERSIDAD DE
CARABOBO
CAMPUS BÁRBULA, NAGUANAGUA, ESTADO
CARABOBO,
CÓDIGO POSTAL 2008, VENEZUELA
<http://revista.ing.uc.edu.ve/>
<http://servicio.bc.uc.edu.ve/ingenieria/revista/>
Correo-e: revistaing@uc.edu.ve

Carta de compromiso

Envíe junto con su trabajo la siguiente carta al Comité Editorial de Revista INGENIERÍA UC:

Ciudadanos
Director Editor en jefe y demás
Miembros del Comité Editorial
Revista INGENIERÍA UC
Presente.

Por medio de la presente envío a Ud.(s) el manuscrito del trabajo titulado: _____

para que sea sometido a evaluación para la publicación.

Manifiesto que:

Este trabajo es original e inédito: no ha sido publicado, no es duplicado, ni redundante; no está siendo sometido simultáneamente a arbitraje para su publicación por ningún medio de difusión, que los datos son originales y verídicos.

El autor y los coautores ceden los derechos de autor a la Revista INGENIERÍA UC, pero mantiene sus derechos como autor intelectual.

El trabajo, tanto en su texto como las tablas y figuras ha sido elaborado de acuerdo a las Instrucciones para los Autores publicadas por Revista INGENIERÍA UC, y que las referencias están directamente relacionadas con el trabajo.

Se designa como autor de correspondencia al autor o coautor que lo indique, con quien el Comité Editorial mantendrá comunicación a través del correo electrónico revistaing@uc.edu.ve, quien será responsable ante autores y coautores y dará respuesta rápida a los requerimientos del Comité Editorial.

No se conocen conflictos de intereses, y de haberlos los autores y coautores están obligados a indicarlo en el original, junto a la fuente de financiamiento.

Firma: _____

Nombre y apellido: _____

El autor para correspondencia

Compromise letter.

Send together with your paper the following letter to Editorial Committee:

Citizens
Director Chief Editor and other
Members of Editorial Committee
Revista INGENIERÍA UC
Present.

I hereby send you the manuscript of the work entitled: _____

to be submitted for evaluation to publication.

I declare that:

This work is original and unpublished: it has not been published, it is not duplicated, nor redundant; it is not being simultaneously submitted to arbitration for publication by any diffusion means, that the data are original and truthful.

The author and coauthors assign the copyright to Revista INGENIERÍA UC, but maintains their rights as an intellectual author.

The work, in its text as the tables and figures has been elaborated according to the Authors Instructions published by Revista INGENIERÍA UC, and that the references are directly related to the work.

The author or coauthor who indicates it is designated as correspondence author, with whom Editorial Committee will maintain communication via email revistaing@uc.edu.ve, who will be responsible for the authors and co-authors, and will respond quickly to the requirements of the Editorial Committee.

There are no known interest conflicts, and if there are the authors and coauthors are obliged to indicate in the original, next to funding source.

Signature: _____

First name and surname: _____

Correspondence author

Comité editorial

Editor Jefe

Dra. Lisbeth Manganiello
Universidad de Carabobo
Facultad de Ingeniería
Valencia, Venezuela

Comité Editorial		Editores Honorarios
Dr Adelmo Ortiz Conde USB, Venezuela	Dra Maura Vázquez de Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela	Dr. Edilberto Guevara Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo
Dr. Ángel Rios Castro Universidad de Castilla La Mancha, España	Dr. Merlin Rosales Universidad del Zulia, Venezuela	Dr. Francisco Arteaga Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo, Venezuela
Dr. Antonino Caralli Universidad de Carabobo, Venezuela	Dr. Pablo Baricelli Universidad de Carabobo	
Dr. Carlos Martínez Universidad de Carabobo, Venezuela	Dr. Roberto Callarotti IVIC, Venezuela	Asesores a la Editora Jefe:
Dr. Enrique Barbien University of Houston, USA	Dr. Sergio Mora Universidad de Santiago de Chile, Chile	Dr. Cristóbal Vega
Dr. Guillermo Ramírez Universidad Central de Venezuela, Venezuela	Dr. Teodoro Garcia Universidad de Carabobo, Venezuela	Ing. Jesús Jiménez, MSc., IMYCA, Facultad de Ingeniería
Dr. Herbert J. Sira R. CINVESTAV-IPN, México	Dr. José A. Díaz Universidad de Florida, USA	CATS, Facultad de Ingeniería Universidad de Carabobo
Dr. johnny Bullon Universidad de los Andes, Venezuela		

Revista INGENIERÍA UC está indexada en Revenicyt, Periódica, IET Inspect, III Actualidad Iberoamericana, Ulrichs Web, Latindex, Redalyc, DRJI y ESCI by Thomson Reuters.

Revista Ingeniería UC, ISSN 1316-6832
Enero – abril 2017, Volumen 24
Número 1

Revista Ingeniería UC se encuentra indexada en:

Revenicyt (Venezuela) – Índice de revistas venezolanas de ciencia y tecnología; Actualidad Iberoamericana (Chile) CIT; IET/INSPEC (United Kingdom); Latindex (México); Redalyc (México); Periódica (México); DRJI Emerging Sources Citation Index, Thomson Reuters.

Contenido general: páginas III y IV.



Revista INGENIERÍA UC
Impreso en Publicaciones de la
Facultad de Ingeniería de la
Universidad de Carabobo,
Campus de Bárbula,
Venezuela