

ISSN: 2007-5448

Volúmen 7 No.2

RECIBE

Revista electrónica

DE COMPUTACIÓN, INFORMÁTICA, BIOMÉDICA Y ELECTRÓNICA

Índice

Computación e Informática

- Aplicación Web: comunicación de las tareas de
estudiantes de primaria
(Web Application: Communication of Elementary
School Homework) 1-15
Jared D. Salinas González
Sodel Vázquez Reyes
Roberto Solís Robles
Carlos H. Castañeda Ramirez
- Análisis de Métodos de Medición de Complejidad
de Imagen 17-46
(Image Complexity Measurement Methods: A
Survey)
Luis Madrid-Herrera
Mario Ignacio Chacón-Murguía
Juan Alberto Ramírez-Quintana
- Algoritmo para transmisión de información segura
en dispositivos NFC 47-64
(Algorithm for secure information transmission in NFC
devices)
Héctor Caballero Hernández
Vianney Muñoz Jiménez
Marco A. Ramos Corchado
Marcelo Romero Huertas
- Aprendizaje Basado en Proyectos Dentro de un
Curso Universitario de Interacción Humano
Computadora 65-91
(Learning Based on Projects Within a University
Course of Human Computer Interaction)
Guadalupe Toledo Toledo
J. Jesús Arellano Pimentel
Francisco Aguilar Acevedo
Edwin Williams Molina Rodríguez

Biomédica

Síntesis y Caracterización de Hidroxiapatita Sintética
para la Preparación de Filmes de PLGA/HAp con
Potencial Uso en Aplicaciones Biomédicas
(Synthesis and Characterization of Synthetic
Hydroxyapatite for the Preparation of PLGA/HAp
Films with a Potential Use in Biomedical Applications)

93-116

Susana Fragoso Angeles
Ricardo Vera-Graziano
Graciela Lizeth Pérez González
Ana Leticia Iglesias
Luis Enrique Gómez Pineda
Luis Jesús Villarreal-Gómez

Etapa de Potencia de un Estimulador Transcutáneo
para Estimulación Funcional y Medular
(Output Stage of a Transcutaneous Stimulator for
Functional Electrical and Transcutaneous Electrical
Spinal-cord Stimulation)

117-135

Alejandro Emilio Leyva Gutiérrez
Ignacio Hernández Popo
Rigoberto Martínez-Méndez
Pedro David Alonso Serrano

*Recibido 9 May 2018
Aceptado 24 May 2018*

ReCIBE, Año 7 No. 2, Noviembre 2018

Aplicación Web: comunicación de las tareas de estudiantes de primaria

Web Application: Communication of Elementary School Homework

Jared D. Salinas González¹
jerad.salinas94@gmail.com

Sodel Vázquez Reyes¹
vazquezs@uaz.edu.mx

Roberto Solís Robles¹
rsolis@uaz.edu.mx

Carlos H. Castañeda Ramirez¹
castr@uaz.edu.mx

¹Universidad Autónoma de Zacatecas, Ingeniería de Software, Campus Siglo XXI, Zacatecas, México.

Abstract: Las tareas asignadas a los estudiantes de educación primaria son generalmente desconocidas por los padres de familia, y es por ello que permitir a un docente de una institución primaria generar avisos de tareas para los padres de familia, con el objetivo de mejorar el proceso de la comunicación de tareas entre el docente y los padres de familia, es de vital importancia. La elaboración de un prototipo de aplicación web que permita a un profesor anunciar/notificar a padres de familia sobre las tareas o avisos de los estudiantes, se logró completar considerando los atributos de calidad como: usabilidad, rendimiento y confiabilidad; brindando así a los docentes y padres de familia una alternativa electrónica enteramente desarrollada para difundir la información dentro de las escuelas primarias. Con el uso de la aplicación web "Alerta a los padres" en la escuela primaria Prof. María Soledad Fernández Bañuelos de la ciudad de Zacatecas, se redujo 9% el incumplimiento de tareas en el último bloque del ciclo escolar. Ahora los padres de familia puedan tener un mejor conocimiento de las tareas y con esa información motivar o ayudar a los estudiantes en la realización de tareas escolares y mejorar el desempeño escolar.

Keywords: educación, mejora de procesos, aplicación web, comunicación.

Abstract: The homeworks assigned to students in primary education are generally unknown by the parents, and for this reason, allowing a teacher of a primary education institution to generate homework notifications to parents is vital in order to improve the process of communication of homeworks between teachers and parents. The development of a prototype web application that allows a teacher to announce / notify parents about the homeworks or notices of the students, was completed by considering the quality attributes such as usability, performance and reliability; thus providing the teachers and parents an electronic alternative entirely developed to disseminate information within primary schools. With the use of the web application "Alerta a los Padres" at the elementary school Prof. María Soledad Fernández Bañuelos of the city of Zacatecas, the non-fulfillment of homeworks in the last bimester of the school year was reduced by 9%. Now parents can have a better knowledge of the homeworks, and with that information motivate or help students in carrying them out and improve school performance.

Keywords: education, process improvement, web application, communication.

1. Introducción

Una de las labores más importantes que un alumno desempeña durante su niñez es la realización de juegos, tareas hogareñas, así como otro tipo de actividades que refuerzan su actividad mental como son las tareas escolares. Los alumnos deben de poner en práctica lo que están aprendiendo para identificar que las cosas que aprenden durante su estadía en la escuela y se pueden manifestar en su vida diaria. A través de una educación básica de calidad, los niños adquieren el conocimiento y aptitudes necesarios para una vida saludable, asumiendo papeles activos en la toma de decisiones de índole social, económica y política a medida que transitan a la adultez.

Para lograr tales beneficios es importante que los tutores de los alumnos, es decir, los padres de familia, se involucren dentro de las tareas de sus hijos. Se puede afirmar que el involucramiento de los padres en la educación del hijo abarca varios aspectos que influyen en el desarrollo del niño, como lo son la autoestima, la formación de expectativas educativas, la formación de actitudes positivas hacia la escuela, etc. Éste involucramiento requiere la disposición de los maestros/profesores, para permitir que los padres los apoyen en su labor profesional.

Por ejemplo, en las escuelas primarias Zacatecanas: Centro Educativo Integrado (CEI) Roberto Cabral del Hoyoⁱ y Prof. María Soledad Fernández Bañuelosⁱⁱ han presentado problemas con la responsabilidad de los estudiantes, originado por el incumplimiento de tareas, principalmente en los grados de cuarto, quinto y sexto.

Actualmente, los docentes redactan las tareas en el pizarrón una vez concluido un tema, el estudiante es el encargado de apuntar la tarea en su libreta y elaborarla. En casa, el estudiante al pasar tiempo con su familia, o recreándose, se ha vuelto recurrente que los padres de familia no sean avisados de las tareas asignadas, o los estudiantes no la apuntaron correctamente, o simplemente olvidó anotarla. Esto ha originado que los docentes y padres de familia hayan presentado conflictos en las reuniones dentro de la escuela por la problemática creada debido a la falta de comunicación de la especificación de las tareas asignadas a los estudiantes.

Con el objetivo de mejorar el proceso de comunicación de las tareas de los estudiantes de primaria entre los docentes y padres de familia, se propone un aplicación web que permitirá a los docentes publicar anuncios y tareas, para que los padres de familia puedan estar informados de dicha información, buscando mejorar la comunicación de esa información y posteriormente mejorar el nivel de responsabilidad de los estudiantes de primaria en el cumplimiento de sus tareas.

2. Trabajos relacionados

En la actualidad hay diferentes aplicaciones como sitios web a nivel mundial que buscan manejar diferentes procesos en las escuelas y al mismo tiempo ofrecer una alternativa comunicativa en las escuelas, tales como:

2.1 Edmodo

Edmodo es un sitio web y aplicación móvil, el cual es similar a una red social como Facebookⁱⁱⁱ, la diferencia es que busca desarrollar un ámbito educativo; dicha plataforma busca mantener en contacto a tres tipos de usuarios: Docentes, Padres de familia y Estudiantes, también ha sido una de las alternativas que ha buscado relacionar la importancia del involucramiento de los padres de familia en las actividades escolares de su hijo (Kothari, 2015), (Edmodo, 2015).

Para que un padre de familia sea informado de los anuncios o tareas del grupo escolar de su hijo mediante Edmodo, es un proceso que puede ser tedioso; primero es necesario que un docente se registre en la página oficial. Posteriormente ingresa al sitio web, y el docente puede crear un grupo (se puede asociar como una página de Facebook, puesto que, permite que cualquier usuario dentro del grupo poder publicar anuncios y comentar en dichas publicaciones; en este caso las tareas, anuncios, entre otros tipos de información). Para generar el grupo, el docente debe asignarle un nombre y el sistema de Edmodo genera una contraseña que es muy importante, debido a que es necesaria para que los estudiantes que se inscriban en Edmodo y puedan autenticar que pertenecen y accedan a dicho grupo.

Una vez registrado el estudiante, también se genera una contraseña relacionada al estudiante, para que el padre de familia pueda vincularse con su hijo al momento de hacer su registro. Registrado y vinculado con su tutorado, el padre de familia se puede mantener enterado de la información de las tareas, así como otros anuncios que se generen dentro de Edmodo.

El principal problema que tiene Edmodo, es que todos los usuarios dentro del grupo pueden publicar anuncios o noticias, puesto que se trata de una red social; permitiendo que se pueda generar contenido “basura” o no muy importante, en lugar de solo mostrar las tareas de los estudiantes. En la Fig. 1 se muestra la página inicial de Edmodo.



Fig. 1. *Página principal de Edmodo.*

2.2 Teacher Assistant Pro

Teacher Assistant Pro es una aplicación móvil para IOS y Android. Funciona como un asistente para el docente; uno de los principales objetivos de la aplicación es registrar la información perteneciente a los estudiantes del docente, por ejemplo: logros, comportamiento, datos personales e información de cómo comunicarse con los padres de familia.

La aplicación permite evaluar el desempeño de los estudiantes, puesto que se puede asignar puntos positivos o negativos a un estudiante dependiendo de su conducta o responsabilidad. Gracias a la aplicación, el docente puede analizar que estudiantes están teniendo un comportamiento no deseado y comunicárselos a los padres de familia. En la Fig 2 se puede ver el registro de un estudiante en la aplicación Teacher Assistant Pro.

2.3 Class Messenger

Class Messenger, es un sitio web y aplicación móvil cuyo objetivo es ser un canal de comunicación entre los miembros de una institución educativa incluyendo estudiantes, docentes, padres de familia y personal académico. Su funcionamiento es similar a Edmodo, pero la diferencia es que mientras Edmodo es muy similar a una página de Facebook, Class Menssenger es similar al chat de Messenger^{iv}, en la Fig. 3 se muestra la interfaz de Class Messenger.

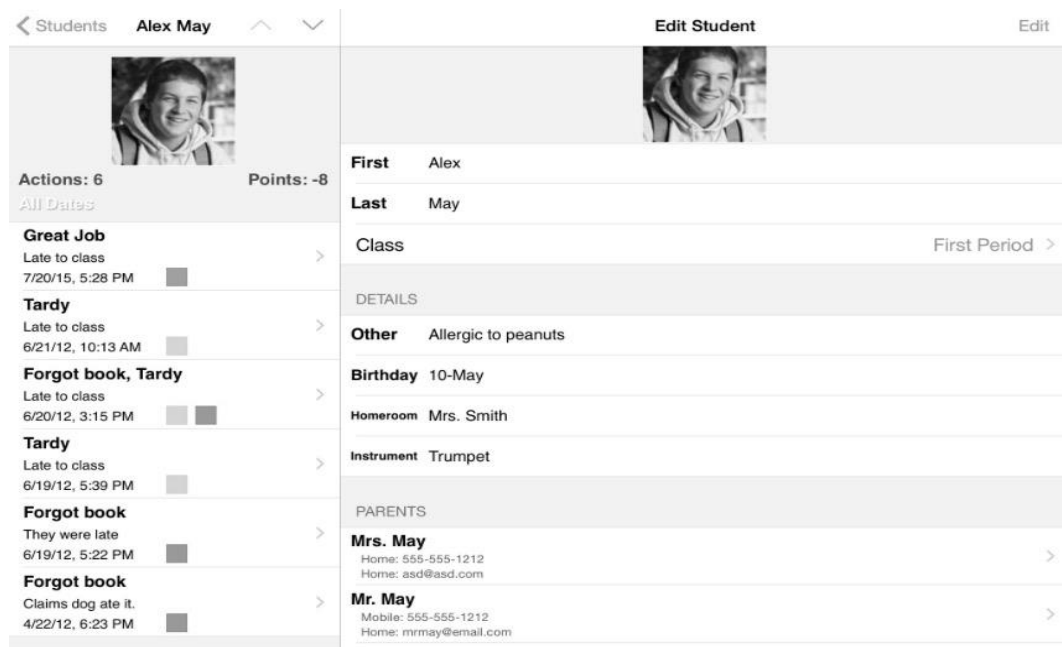


Fig. 2. Información de un estudiante con la aplicación Teacher Assistant Pro.



Fig. 3. Interfaz principal de Class Messenger.

2.4 Comunicaciones Push/Pull

Dentro de la administración de una empresa, uno de los factores que se requiere para su éxito es la comunicación. Los tipos de comunicación descritos en PMBOOK^V también se pueden adecuar a diferentes organizaciones como pueden ser las educativas, mientras más personas estén en una organización es importante tener los medios de comunicación adecuados para evitar conflictos y obtener mejores resultados, es el caso del involucramiento de los padres de familia en las tareas de los estudiantes. PMBOOK hace referencia a tres tipos de comunicación que se requieren para mantener en contacto a una organización, la Tabla 1 muestra los tipos de comunicación establecidos por el PMBOOK.

Nombre del tipo de comunicación	Descripción
Push	Enviada a receptores específicos que necesitan recibir información. Asegura la distribución, pero no garantiza que haya llegado, ni sea comprendida.
Pull	Utilizada para grandes volúmenes de información para audiencias grandes, requiere que los receptores accedan al contenido de la comunicación. (e-Learning).

Tabla 1. Tipos de comunicaciones de acuerdo al PMBOOK(Project Management Institute, 2013)

El método de comunicación push es similar a las notificaciones que manda un dispositivo móvil cuando se ha recibido un mensaje nuevo, mientras que un tipo de comunicación pull es como una pizarra o contenedor de información el cual se deja en un lugar visible en la empresa, similar a los contenedores de información como pueden ser los sitios e-learning como Moodle^{vi}.

3. Análisis y diseño del aplicación web “Alerta a los padres”

“Alerta a los padres” es la aplicación web que se desarrolló para mejorar el proceso de comunicación de las tareas de los estudiantes de primaria entre los docentes y padres de familia. Se diseñó para que fuera como un pizarrón de tareas, asegurando que la información no se altere, sea objetiva y no cause los problemas originados en las escuelas primarias como se ejemplifica en la Sección 1. Lo anterior se cumple porque limita la comunicación, siendo el profesor un publicador de contenido y el padre de familia un subscriptor del contenido que agrega el profesor. Usando el tipo de comunicación pull en el contenedor de las tareas, mientras que, la comunicación de tipo push, se usa al mandar correos electrónicos, en una alerta al padre de familia cada vez que se publique una tarea.

Para el diseño de la aplicación web, se decidió usar el patrón arquitectónico *Modelo Vista Controlador* (MVC), arquitectura estándar en el desarrollo de aplicaciones o sitios web (Junta de Andalucía, 2017). Además, el diseño de la aplicación web fue planeado como responsivo para que los usuarios no tengan problemas de compatibilidad con un sistema operativo o dispositivo móvil en particular. Únicamente se contemplan dos tipos de usuarios: docentes y padres de familia. Un docente, puede crear un grupo y en ese grupo crear avisos de las tareas. Mientras que el padre de familia puede inscribir a su hijo en el grupo del docente, para así simplificar el proceso de registro. Las principales actividades de la aplicación web se muestran en la Tabla II.

Tipo de usuario	Actividades principales	Descripción
Profesor	CRUD Grupos	El maestro puede crear, eliminar o modificar un grupo, un grupo es la forma de unir a los alumnos a la información de ese grupo y por ende las tareas y avisos. Un grupo necesita de una contraseña que le será otorgada a los padres de familia para que puedan estar notificados de las tareas de dicho grupo.
	CRUD Avisos	El maestro puede crear, eliminar y modificar un aviso el cual será publicado dentro de la aplicación web.
	Ver Alumnos	El maestro puede ver que alumnos están registrados por los padres de familia en la aplicación web.
Padre de Familia	Inscribir a alumno	El padre puede inscribir a un alumno en la aplicación web.
	Inscribir grupo	Puede inscribir un alumno a un grupo usando la contraseña que le fue asignada a dicho grupo y de esa manera tener la información de las tareas y avisos.
Todos	Registrarse	El padre de familia como el maestro pueden registrarse para usar la aplicación web.
	Log-in	El padre de familia puede ver las tareas/anuncios/avisos referentes a los diferentes grupos que están inscritos sus alumnos.
	Ver Avisos	El padre de familia puede ver las tareas/anuncios/avisos referentes a los diferentes grupos en que están inscritos sus alumnos. Además, el maestro puede ver los anuncios de los grupos en que da clases.

Tabla 2. Principales actividades de la aplicación web

En la Figura 4 muestra la interfaz de usuario para que pueda ser usado en dispositivos móviles.



Fig. 4. Página de inicio de “Alerta a los padres” redimensionada para verse en dispositivos móviles.

La arquitectura que se ilustra en la Figura. 5, muestra los componentes y tecnologías que se usaron como Yii, Yiistrap, MySQL.

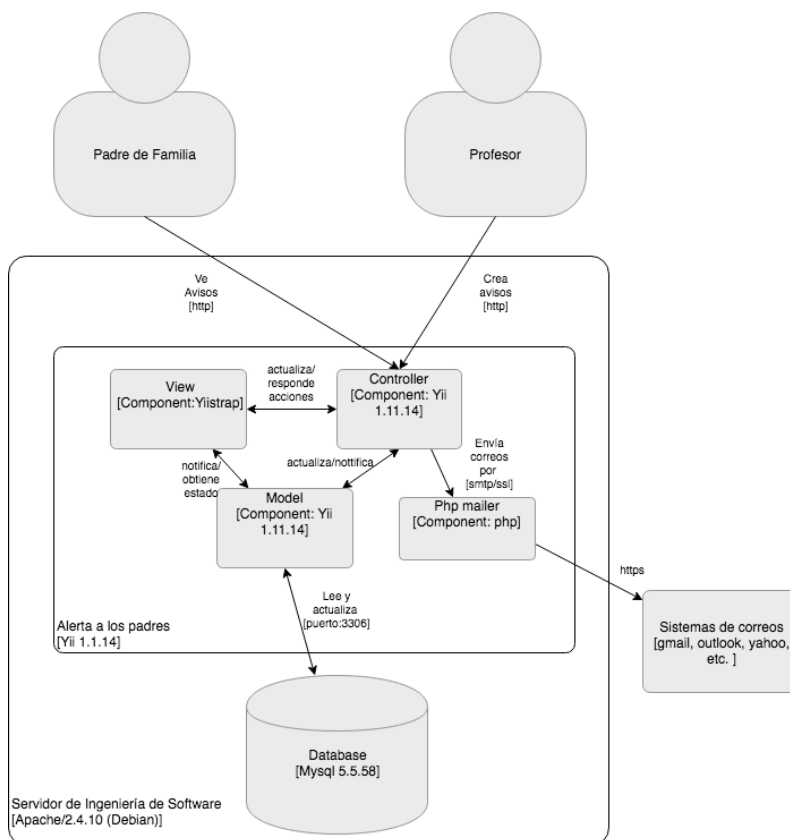


Fig. 5. Arquitectura de “Alerta los padres”

Como se puede observar, la aplicación web está desarrollada en el Framework Yii, el cual usa su implementación del patrón MVC. Con esto se obtiene la ventaja de acelerar el desarrollo usando las herramientas que proporciona tal Framework que son la modularidad, la adaptación de cambios y la extensibilidad.

Para el desarrollo de las actividades ilustradas en la Tabla II, también se tuvo que analizar como sería el flujo de inscripción de los padres de familia, así como la de los profesores. Usando como base el modelo de inscripción de Edmodo, la aplicación web también necesita primero que un profesor se inscriba en la aplicación web, el siguiente paso es que el profesor cree un grupo que es el nexo lógico que une a los estudiantes, tareas y el profesor; gracias al grupo se puede “agrupar” esa información logrando que los maestros como padres de familia no estén expuesto a información que no les sea relevante.

Para que los padres de familia puedan acceder a las tareas de un determinado grupo, es importante que se inscriban en la aplicación web, registren al alumno en un grupo usando una contraseña proporcionada por el profesor, la cual es la contraseña del grupo, y una vez que hayan inscrito a un estudiante en el grupo, podrán visualizar las tareas de los alumnos. Éste flujo de actividades se muestra en la Figura 6.

Gracias a que en la aplicación web ya no se depende de que un alumno se inscriba en la aplicación web para que un padre de familia se pueda registrar, se hace al proceso de notificar las tareas más usable.

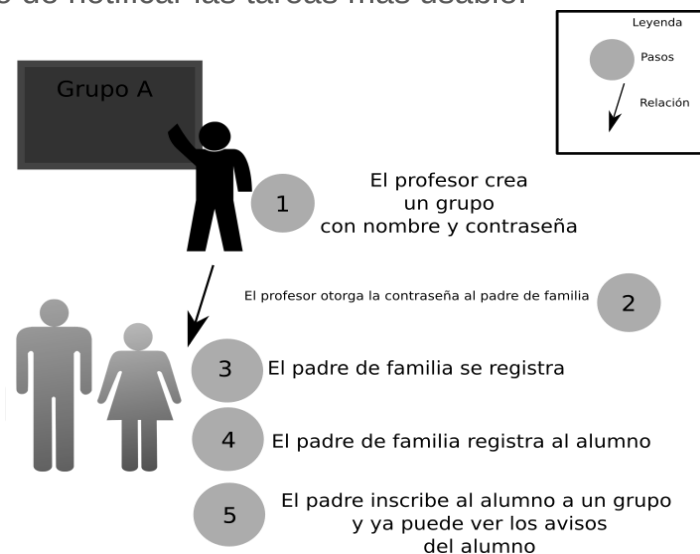


Fig. 6. Número de pasos necesarios y relaciones para que un padre de familia tenga acceso a los anuncios de sus hijos.

4. Resultados

“Alerta a los padres”^{vi} fue probado en mayo del 2017 por los docentes y padres de familia de la escuela primaria Prof. María Soledad Fernández Bañuelos, la aplicación web se encuentra alojada en:

<http://148.217.200.108/VeranoCientifico/>

Cumpliendo con el principal objetivo, que es la elaboración de un prototipo de aplicación web, que permita a profesores de escuelas primarias notificar a un grupo de padres de familia sobre las tareas de un alumno. En la fase de prueba se contó con la participación de ciento cinco padres de familia y seis docentes, los cuales se describen en la Tabla III. El uso se realizó en el último bloque de los cinco bloques de los cuales se encuentran integrados los cursos de primaria.

Grado	Grupo	Estudiantes	Padres de Familia	Tareas por Docentes
4	A	7	7	5
	B	26	26	5
	C	13	14	4
5	B	15	15	0
6	A	22	22	3
	C	21	21	4

Tabla 3. Grados, grupos, estudiantes, padres de familia y tareas publicadas en una semana de evaluación.

Con estos valores podemos observar que se estuvo siendo utilizado al menos para registrar las tareas una vez por día por los maestros. Cabe mencionar que el grupo 5”B” no tiene publicada alguna tarea porque la maestra en ese tiempo se encontraba con un permiso de ausencia debido asuntos de salud. Así también en la Tabla III se puede ver un padre de familia más que un estudiante, debido a que en la aplicación, tanto un padre como una madre puede dar seguimiento a la tarea de sus hijos.

En base a una encuesta hecha con los profesores, la tendencia del desempeño escolar de los estudiantes en los últimos bloques del periodo escolar, así como en los últimos grados escolares (cuarto, quinto y sexto), en promedio es del 35% de incumplimiento de tareas. Lo anterior, se suma a la tendencia que tienen algunos padres de familia de atender menos a los estudiantes mientras la edad del estudiante crece, por lo tanto de forma natural el desempeño escolar de los estudiantes baja cuando el grado de estudio es mayor. Con el uso de la aplicación web de “Alerta a los padres” se combate el bajo desempeño escolar.

Aunque en un principio se estuvo trabajando con la posibilidad de seguir con el proyecto durante el transcurso del ciclo escolar Agosto 2017 - Julio 2018. Este se vio interrumpido en la escuela Prof. María Soledad Fernández Bañuelos porque la mayoría de los profesores que habían apoyado la idea habían sido asignados a otros grupos donde no existía un incumplimiento similar al como sucedía en el comienzo de la investigación (tales como son los grupos de cuarto, quinto y sexto grado escolar). Aunque el sistema no usa la información de los padres de familia o de los estudiantes, la falta de información de los padres de familia con el uso de las tecnologías de la información, ha sido un obstáculo con los padres de familia.

Pese a la no participación en los siguientes bloques escolares. Se realizó una encuesta a los profesores de la institución acerca de la aplicación web *“Alerta a los padres”*, enfocado a identificar otras características clave como la funcionalidad de la aplicación, así como evaluar el propósito de dicha aplicación, los principales hallazgos son que se les fue sencillo crear las anuncios de las tareas, así como también era una buena herramienta gracias a que ellos no tenían que ir a buscar los correos electrónicos de los padres de familia para comunicarse con ellos, eso ayudaba agilizando esa tarea con respecto a otros tipos de métodos que habían usado con anterioridad. Concluyendo que la aplicación web es útil, y en cuestión del cumplimiento de tareas con el uso de la aplicación web el desempeño en vez de tener un 35% de tareas incumplidas (porcentaje promedio en el último bloque del ciclo escolar) solo fue del 26%, siendo un cambio significativo porque se redujo 9%.

5 Conclusiones y trabajo futuro

Debido al periodo corto que se uso la aplicación web *“Alerta a los padres”* en la escuela primaria Prof. María Soledad Fernández Bañuelos, no hay una posible correlación que pueda demostrar que una aplicación web destinada a notificar tareas a padres de familia, pueda aumentar el desempeño escolar de los estudiantes, así como que haya un aumento considerable de entrega de tareas en estudiantes de primaria, por lo tanto se realizará pruebas en otras primarias de la ciudad de Zacatecas para poder comprobar la correlación. Es importante mencionar que, aunque fue probado en la escuela primaria Prof. María Soledad Fernández Bañuelos, es una aplicación web que puede ser utilizado por cualquier docente de escuela primaria, debido a que es un sitio web de uso general.

También es importante seguir desarrollando más aplicaciones de software para ayudar a la educación y asistir a los integrantes de la educación básica, debido a que es una de las iniciativas que busca el Gobierno Federal Mexicano en su Plan Nacional de Desarrollo del periodo 2013-2018(Gobierno de la República,

2013) y el plan de estrategia digital(Federal Government, 2013) para mejorar la calidad de la educación en México.

Notas

ⁱDirección: Terraplén s/n, Zacatecas Centro, 98000 Zacatecas, Zac.

ⁱⁱDirección: Chepinque s/n, Lomas de la Soledad, 98040 Zacatecas, Zac.

ⁱⁱⁱ<https://www.facebook.com>

^{iv}<http://messenger.com>

^v<https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards>

^{vi}<https://moodle.org/?lang=es>

^{vii}<http://148.217.200.108/VeranoCientifico/>

Referencias:

Edmodo. (2015). Edmodo en Twitter_ _Literally couldn't have done it without you. Retrieved April 20, 2016, from <https://twitter.com/edmodo/status/591766822245900289/>

Federal Government. (2013). Estrategia Digital Nacional., 44. Retrieved from <http://cdn.mexicodigital.gob.mx/EstrategiaDigital.pdf>

Gobierno de la República. (2013). Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018. Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki, 183. Retrieved from <http://pnd.gob.mx/>

Gutiérrez, J. J. (2014). ¿` Qué es un framework Web? Available in: [Http://Www.Lsi.Us.Es/~ Javierj/Investigacion_ficheros/Framework. Pdf](Http://Www.Lsi.Us.Es/~Javierj/Investigacion_ficheros/Framework.Pdf) Accessed May, 12, 1-4.

Junta de Andalucía. (2017). Aplicación del patrón MVC en PHP. Retrieved March 10, 2017, from <http://www.juntadeandalucia.es/servicios/madeja/printpdf/572>

Kothari, K. (2015). Is Parental Involvement Important to Student Learning_ Edmodo Teachers Say, "Yes!" Retrieved April 3, 2016, from <https://blog.edmodo.com/2015/04/29/is-parental-involvement-important-to-student-learning-edmodo-teachers-say-yes/>

MySQL. (2015). MySQL :: Top Reasons to Use MySQL. Retrieved May 30, 2016, from <https://www.mysql.com/why-mysql/topreasons.html>

Oracle. (2016). Top 10 Reasons to Choose MySQL for Next Generation Web Applications: A MySQL Whitepaper, (August), 3. Retrieved from <http://www.mysql.com/content/download/id/406/>

Project Management Institute. (2013). Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía del PMBOK). (Quinta). Pensilvania: Project Management Institute.

Yii. (2016). Yii Framework: Performance. Retrieved May 15, 2016, from <http://www.thaicreate.com/yii.html%5Cninternal-pdf://1025/yii.html>

Notas biográficas:



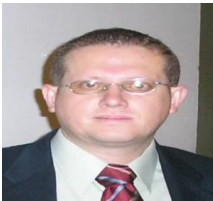
Jared Daniel Salinas González es egresado de la licenciatura en Ingeniería de Software de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). En proceso de titulación. Su interés es el desarrollo de aplicaciones web, arquitectura de software, desarrollo de videojuegos y la ciencia de datos



Sodel Vázquez Reyes recibió el grado de Doctor en Ciencias Computacionales por la Universidad de Manchester, Reino Unido. Obtuvo el grado de Maestría en Ciencias Computacionales en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica y el grado de Licenciatura en la Universidad Veracruzana. Se incorporó a la Universidad Autónoma de Zacatecas en el 2010. Actualmente es profesor investigador con perfil PRODEP, líder del Cuerpo Académico “UAZ-CA-192 Tecnologías de la Información” y Responsable del Programa de Ingeniería de Software. Sodel ha realizado actividades de investigación y desarrollo tecnológico en temas de Minería de Texto e Ingeniería de Software. Además, es miembro del Registro CONACYT de Evaluadores Acreditados (RCEA), evaluador del Consejo para la Acreditación de la Educación Superior (CACEI) e integrante del Consejo Técnico del Examen General para el Egreso de la Licenciatura en Ingeniería de Software (EGEL-ISOFTE) en su carácter de representante de la Universidad Autónoma de Zacatecas.



Roberto Solís Robles es Doctor en Ciencias de la Computación por la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Estados Unidos, donde también realizó un posdoctorado en el Laboratorio de Ciencia Coordinada (CSL). Anteriormente, obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Computación por el ITESM y el título de Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Zacatecas. Es miembro del Cuerpo Académico CA-231 Tecnologías Emergentes de Comunicaciones y Cómputo en la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas, donde actualmente se desempeña como docente-investigador en los programas académicos de Ingeniería de Software e Ingeniería en Computación. Es director de sede del Concurso Internacional de Programación ACM-ICPC en la Región México y profesor líder de la Olimpiada Mexicana de Informática Delegación Zacatecas. Ha publicado artículos técnicos en temas relacionados con redes de sensores y aplicaciones móviles. Como investigador, sus áreas de interés son: Cómputo móvil, Internet de las Cosas y Cloud. Cuenta con diversas certificaciones como lo son PSP, Software Engineering, Java Programming y MySQL entre otras.



Carlos Héctor Castañeda Ramírez, Maestro en Informática Administrativa por la Universidad Autónoma de Durango, Especialidad en Computación por Facultad de ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) e Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Zacatecas. Fue director de la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica UAZ (2012-2016) y responsable del programa de Ingeniería en Sistemas Computacionales de UAZ (2004-2012). Actualmente docente investigador en la Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ) impartiendo clases y asesorando estudiantes de licenciatura y maestría. Sus áreas de interés son seguridad informática, hacking ético, pruebas de penetración, desarrollo de aplicaciones Web. Es evaluador del Consejo de Acreditación de la Enseñanza de la Ingeniería (CACEI) desde 2015.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.

*Recibido 1 Jun 2018
Aceptado 4 Jul 2018*

ReCIBE, Año 7 No. 2, Noviembre 2018

Análisis de Métodos de Medición de Complejidad de Imagen

Image Complexity Measurement Methods: A Survey

Luis Madrid-Herrera¹
lmadrid@itchihuahua.edu.mx

Mario Ignacio Chacón-Murguía¹
mchacon@ieee.org

Juan Alberto Ramírez-Quintana¹
jaramirez@itchihuahua.edu.mx

¹Laboratorio de Sistemas de Percepción Visual con Aplicaciones en Robótica, Tecnológico Nacional de México/ I.T. Chihuahua, México.

Resumen. La complejidad de imágenes ha sido estudiada con la finalidad proponer algoritmos computacionales que puedan estimarla simulando el criterio humano, para su aplicación en diversas áreas de procesamiento de imágenes. En este artículo se presenta un estudio de los métodos para determinar la complejidad de imágenes publicados recientemente, se realiza una clasificación basada en las características utilizadas para determinar la complejidad de una imagen y se describen brevemente. En total se analizaron 28 artículos desde el año 2005 a la actualidad, donde se encontraron 34 métodos, los cuales están basados en enfoques computacionales y enfoques humanos. Las categorías en las que se clasifican son: información de bordes, información del color y/o intensidad, grado de compresión, combinado, criterio humano y reacción humana. También, se dan a conocer las bases de datos utilizadas para evaluar los métodos de medición. Por último, se realiza un análisis de la cantidad de métodos que se encuentran en cada categoría, características más utilizadas, cantidad de métodos que se publicaron por año y sus aplicaciones.

Palabras clave. Complejidad de imágenes, Complejidad visual, Aplicaciones de complejidad de imagen, Seguimiento de ojos, EEG, MEG.

Abstract. Image complexity has been studied with the purpose to propose computational algorithms that may simulate the human behavior for applications in diverse image processing areas. This paper presents a survey of recently published image complexity methods. The paper describes a classification based on the used characteristics to determine image complexity followed by a brief explanation. 28 papers from 2005 to 2018 were analyzed. From this analysis, 34 methods were determined. These methods are based on computational and human approaches. The classification categories are edge information, color and/or intensity information, level of compression, combined, human criterion, and human reaction. The paper also describes the datasets commonly used to evaluate the methods. Finally, it is performed an analysis of the methods in each category, main used characteristics, amount of methods published by year and their applications.

Keywords. Image Complexity, Visual Complexity, Image Complexity Applications, Eye Tracking, EEG, MEG.

1. Introducción

La complejidad de imágenes es un término que en la actualidad no se encuentra formalmente definido, por lo que su definición varía con cada autor. Kolmogorov estudia la complejidad desde el punto de vista computacional y la define relativamente como la longitud del programa más corto que pueda generar un objeto solamente con elementos básicos (Kolmogorov, 1968). El término complejidad visual fue dado a conocer por Snodgrass y Vanderwart (Snodgrass & Vanderwart, 1980) para referirse a la cantidad de detalles o que tan intrincado es el entorno que percibimos mediante el sentido de la vista (Alexandra Forsythe, 2009), y a partir de esta definición se comenzó a utilizar el término complejidad de imágenes, refiriéndose a que tan compleja es una imagen en específico.

Sin embargo, el término complejidad de imágenes continúa siendo subjetivo, ya que no existe una manera concreta para medirla. Lo anterior, llevó a algunos investigadores a trabajar en el diseño de algoritmos para medir la complejidad de las imágenes y comúnmente es definida mediante el método que se utiliza para medirla. En (Chikhman, Bondarko, Danilova, Goluzina, & Shelepin, 2012) mencionan diversas definiciones para la complejidad de imagen, una de ellas se refiere como una medida de aleatoriedad que tiene algo en común con la entropía de Shannon de la imagen, otra menciona que se puede definir cómo el número de frecuencias activas espaciales o número de Wavelets activas, y también que la complejidad se puede estimar como el producto de la media cuadrática de la distribución espacial de frecuencias y el área de la imagen. Para (Chacón, Corral S., & Sandoval R., 2007) el término complejidad de imagen está relacionado a cuánta atención requiere una persona para reconocer y detectar objetos en una imagen. En (Huo, 2016a) se relaciona la complejidad de imagen con la atención visual y el trabajo de la memoria que requiere una persona para entender la imagen, por lo que consideran que está relacionada con la cantidad de objetos contenidos en la imagen. En (Snodgrass & Vanderwart, 1980) definen complejidad de imagen como la cantidad de detalles y que tan confusa es una imagen y en (Heaps & Handel, 1999) como el grado de dificultad de dar una descripción verbal de la imagen (Ciocca, Corchs, & Gasparini, 2015).

Dentro de las aplicaciones de medir la complejidad de imágenes se encontró que: es utilizada para la definición de los bordes de interés en una imagen (Chacón, Aguilar D., & Delgado S., 2002), para obtener el grado de compresión de las imágenes (Chikhman et al., 2012; A. Forsythe, Nadal, Sheehy, Cela-Conde, & Sawey, 2011), un ajuste automático de la tasa de transferencia de bits en transmisiones de videos (Da Silva, Courboulay, & Estrailier, 2011), para definir el grado de marca de agua sin distorsionar las imágenes (Yaghmaee & Jamzad, 2010), evaluar cómo afecta la complejidad de los paisajes urbanos al manejar (Cavalcante et al., 2014), para medir el grado de dificultad al fijar la

atención en los objetos de interés dependiendo el tipo de fondo utilizado en el diseño de páginas web (Huo, 2016b), entre otras.

La contribución de este artículo consiste en presentar los métodos para determinar la complejidad de imágenes existentes en la literatura y proponer una clasificación basada en la técnica que se utiliza para medirla ya sea por enfoques computacionales o enfoques humanos, agrupándolas por categorías con base en las características utilizadas. Además, se presentan las bases de datos reportadas en la literatura utilizadas para realizar estas mediciones.

Este artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección 2 se presentan los métodos para determinar la complejidad de imágenes y la clasificación por tipo de técnica y características. En la Sección 3 se da un pequeño resumen de los métodos basadas en enfoques computacionales y en la Sección 4 de los basados en enfoques humanos. Seguidamente en la Sección 5 se dan a conocer y se describen brevemente las bases de datos utilizadas para evaluar la complejidad de imágenes. Por último, en la Sección 6 se presenta el análisis y en la Sección 7 los resultados y conclusiones.

2. Clasificación general

En esta sección se presenta la clasificación general de los métodos para determinar la complejidad de imágenes estudiados. En total se analizaron 28 artículos del 2005 a la actualidad, de los cuales se obtuvieron 34 métodos de complejidad de imagen. En la Tabla 1 se muestra a que categoría y tipo de técnica pertenece cada uno de los 28 artículos revisados y en la columna características se muestra en que se basa su medición de complejidad.

Los métodos son agrupados en dos tipos de técnicas para determinar la complejidad de las imágenes: enfoques computacionales y enfoques humanos. Los enfoques computacionales son divididos en cuatro categorías, las cuales son: información de bordes, información del color y/o intensidad, grado de compresión, combinado. Por otro lado, los enfoques humanos se dividen en dos categorías: criterio humano y reacción humana. A continuación, se describen cada una de ellas.

	Categorías	Características	Artículos
Enfoques computacionales	Información de bordes	Mediante un sistema difuso basado en el porcentaje de niveles de bordes	(Chacón et al., 2007)
		Cantidad y distribución de bordes	(Machado et al., 2015)
	Información de color y/o intensidad	Se basa en los colores y la resolución	(Ivanovici, 2017)
		Dispersión de color e intensidad de los píxeles	(Perki & Hyvarinen, 2009)
		Complejidad de color, la saturación y la simetría como características	(Guo, Kurita, Muraki Asano, & Asano, 2013)
		Información de las regiones obtenidas por medio de segmentación e histograma	(Rigau, Feixas, & Sbert, 2005)
		Basado en características de contraste local y frecuencia espacial	(Cavalcante et al., 2014)
		Basado en la medida difusa de la entropía	(Cardaci, Di Gesù, Petrou, & Tabacchi, 2009)
		Aproximación de la entropía	(Pham & Yan, 2018)
	Grado de compresión	Análisis del grado de compresión GIF y de la dimensión fractal	(A. Forsythe et al., 2011)
	Combinado	Combinación lineal de características	(S. E. Corchs, Ciocca, Briolo, & Gasparini, 2016)
		Textura, bordes y región significativa	(Chen, Duan, Zhu, Qian, & Xiao, 2015)
		Utilizan características espaciales, espacio-frecuenciales, una combinación de las propiedades del espacio y la transformada de Fourier, y el tamaño de la imagen codificada en formato JPEG	(Chikhman et al., 2012)
		Intensidad, el contraste, la localización, los bordes y la textura	(Yaghmaee & Jamzad, 2010)
		Mapas de atención, sobresalientes y de calor	(Da Silva et al., 2011)
		Transformación de Características Invariantes a la Escala y <i>K-means</i>	(Huo, 2016b)
		La regularidad, rugosidad, direccionalidad, densidad y comprensibilidad	(Guo, Asano, Asano, Kurita, & Li, 2012)
		Información de color, bordes y grado de compresión	(Purchase, Freeman, & Hamer, 2012)
		Coloración, saturación, área, grupos de texto, simetría y equilibrio	(Reinecke et al., 2013)
		Información de la composición, estadística y de la distribución	(Sun, Yamasaki, & Aizawa, 2015)
Enfoques humanos	Criterio humano	Basado en el tiempo de observación	(Da Silva et al., 2011)
		Mediante un cuestionario	(Cardaci et al., 2009)
		Media del criterio humano	(Cavalcante et al., 2014) (S. E. Corchs et al., 2016) (Purchase et al., 2012) (Sun et al., 2015) (Ramanarayanan, Bala, Ferwerda, & Walter, 2008) (Palumbo, Makin, & Bertamini, 2014)
	Reacción humana	Análisis de movimiento ocular	(Bonev, Chuang, & Escolano, 2013) (White, Hirotsu, & Liversedge, 2012) (Roth, Tuch, Mekler, Bargas-Avila, & Opwis, 2013)
		Señales electroencefalográficas (EEG)	(Huo, 2016a)
		Señales magnetoencefalográficas (MEG)	(Cho et al., 2018)
		Señales EEG y MEG	(Hsu, Lee, & Marantz, 2011)

Tabla 1. Clasificación de los métodos para determinar la complejidad de imágenes.

3. Enfoques computacionales

Los métodos para determinar la complejidad de imágenes por medio de técnicas computacionales son aquellos en los que el cálculo de la complejidad se realiza mediante algoritmos que utilizan recursos informáticos. A continuación, en esta sección se describen brevemente los métodos encontrados basados en este tipo de técnica.

3.1. Información de bordes

Los bordes han sido utilizados para medir la complejidad de las imágenes debido a que se considera que estos están directamente relacionados, ya que una imagen difícil de describir normalmente cuenta con una gran cantidad de objetos y detalles, y estos están relacionados con la cantidad de bordes. Diversos trabajos utilizan los bordes como características, sin embargo, no es la única característica que utilizan, es por esto que no todos quedan dentro de esta categoría. En total, se encontraron dos métodos donde se utilizan los bordes como característica principal para determinar la complejidad, uno de ellos es propuesto en (Chacón et al., 2007), donde se basan en el análisis de los porcentajes de niveles de bordes contenidos en toda la imagen. La información que proveen los bordes es procesada por medio de lógica difusa y se calcula el grado de pertenencia de las imágenes a las clases: *Poco Compleja*, *Más o Menos Compleja* y *Muy Compleja*, las cuales son determinadas mediante el algoritmo de agrupamiento difuso (*fuzzy C-means*) descrito en (Corral S., 2003). Los resultados de la medición de complejidad son consistentes y se correlacionan con el criterio humano.

Este método para determinar la complejidad de imágenes fue probado en una base de datos con 150 imágenes. La ventaja principal es que no se involucra el criterio humano, lo que hace que sea muy consistente. Como aplicación del método, se encuentra un algoritmo detector de bordes, el cual utiliza la complejidad de la imagen para determinar cuáles niveles de bordes serán incluidos en la imagen de bordes. También, en (Machado et al., 2015) miden la complejidad de las imágenes mediante el uso de operaciones de detección de bordes, algunas métricas basadas en la compresión de imágenes y la ley Zipf. La información que proveen los bordes es extraída respecto a su cantidad y su distribución, ya que consideran que una imagen es más compleja si cuenta con una cantidad de bordes y su distribución es menos predecible. Para extraer los bordes se utilizan filtros de Canny y de Sobel. Las métricas basadas en compresión son utilizadas ya que existe una relación entre la complejidad y la compresión, debido a que una imagen poco compleja tiene información redundante y predecible, por lo tanto, esta información puede ser representada con menos datos, es decir que puede ser comprimida; y una imagen con complejidad alta, la información no puede ser predicha tan fácilmente, por lo tanto, se vuelve más difícil comprimirla ya que no se quiere perder información importante.

La ley de Zipf es utilizada para calcular el rango y tamaño de frecuencia. Para calcular el rango de frecuencia Zipf es necesario contar el número de veces que se presenta cierta intensidad en los píxeles y ordenarlos. El tamaño de frecuencia Zipf es la diferencia de intensidad que tiene cada píxel con sus vecinos. Los resultados demuestran que la medición por medio de la densidad

de bordes y el grado de compresión fueron el mejor estimador de la complejidad de imágenes de acuerdo con el criterio humano.

3.2. Información del color y/o intensidad

Dentro de esta categoría se encuentran los métodos para determinar la complejidad de imágenes que utilizan características extraídas directamente de la información del color y/o intensidad de los píxeles, uno de ellos es el método propuesto en (Ivanovici, 2017), el cual se basa solamente en los colores y la resolución con la finalidad de mostrar que estas características tienen propiedades interesantes y al ser simples de procesar, el método se vuelve computacionalmente muy eficiente y puede ser utilizado en aplicaciones de tiempo real. Para proponer el método de complejidad estudian el comportamiento de la entropía de Shannon y de esta manera tratan de que tenga un comportamiento parcialmente similar.

Por lo que, el cálculo de complejidad de imagen es el número normalizado de colores distintivos en un soporte espacial definido. Además, se realizaron pruebas con algunas imágenes artificiales donde se varió el número de colores y la resolución, y se extendió su análisis a la base de datos VisTex (Technology, 2002). Los resultados muestran que este sencillo enfoque para la medición de la complejidad de imágenes se correlaciona con algunas otras características como la entropía. En (Perki & Hyvarinen, 2009) presentan un método para evaluar la complejidad de imágenes basado en el Análisis de Componentes Independientes (ICA por sus siglas en inglés). La finalidad de utilizar ICA es tomarlo como una medida de dispersión del color y la intensidad de los píxeles, es decir, se mide el grado de no semejanza a la distribución Gaussiana y se aproxima a una medición de la entropía. Este método muestra que la complejidad es poca si los componentes son escasos, o si los datos están concentrados en subespacios pequeños. Por medio de una Máquina de Vectores de Soporte (SVM por sus siglas en inglés) en (Guo et al., 2013) clasifican a las imágenes como *Poco Compleja*, *Medio Compleja* y *Muy compleja*, un resultado similar al realizado en (Chacón et al., 2007), las características globales que se utilizan como entrada del clasificador son: la medida de complejidad de color (Yoon & Kweon, 2001), la saturación y la simetría.

Para encontrar las características locales primero se segmenta la imagen y se juntan las regiones con color similar y adyacencia (Ning, Zhang, Zhang, & Wu, 2010), posteriormente de cada región se extrae la saturación, el contraste y la intensidad del color, además, también se utiliza el número de segmentos creados, el área y la forma de los segmentos. Este método lo utilizan para evaluar la complejidad visual de las pinturas artísticas y obtienen correlación con el criterio humano, como trabajo futuro se aplicará en diferentes tipos de imágenes. Otro método que se basa en las regiones de la imagen pero con

información del histograma, es el propuesto en (Rigau et al., 2005). En él, se relacionan tanto la complejidad de la imagen como la entropía de la intensidad de su histograma. El proceso para calcular la complejidad toma como entrada la imagen segmentada y el histograma dividido por regiones. De la imagen segmentada se obtiene el número de regiones que se formaron, tomando en cuenta que entre más regiones contenga la imagen más compleja será y el histograma provee información de intensidad de cada una de las regiones. Este método demuestra otra manera en la cual puede ser medida la complejidad de las imágenes, siendo afectada directamente por la resolución de las imágenes, el contraste y la cantidad de detalles contenidos. Por otro lado, en (Cavalcante et al., 2014) proponen un método para evaluar la complejidad percibida de los paisajes urbanos basándose en la estadística del contraste local y la frecuencia espacial. Las características que se extraen del contraste son la media y la desviación estándar. La frecuencia espacial es segmentada por medio de mapas de *Kurtosis* para obtener su valor y la oblicuidad. El objetivo de evaluar la complejidad de estos paisajes es observar cómo afectan a los conductores, con el fin de evitar incidentes como el no divisar a algún peatón. Los resultados demuestran que se tiene una alta correlación con la subjetividad del criterio humano y tiene buen desempeño también con paisajes urbanos nocturnos. Al igual que en (Chacón et al., 2007), en (Cardaci et al., 2009) trabajan con un modelo matemático difuso de complejidad visual basado en la medida difusa de la entropía, para generar una medida objetiva de la complejidad de las imágenes. Para crear el modelo matemático de complejidad visual se utilizaron características locales y globales de las imágenes.

Se eligieron dos características locales, una es la información de los bordes y la otra son las simetrías locales que son obtenidas por la transformada discreta de simetría. De esta manera, los píxeles tienen tres valores: la intensidad de los bordes, la intensidad de borde umbralizada y binarizada de cero a uno, y la intensidad de simetría local. La medida de complejidad global es evaluada usando tres nuevas definiciones de entropía difusa las cuales son detalladas en (Di Gesù & Roy, 2000). Los experimentos que realizaron son comparados con el criterio humano, para ver si existe correlación entre la subjetividad del humano para percibir la complejidad de las imágenes y su algoritmo. El método obtuvo una buena correlación entre las dimensiones espaciales y temporales de la complejidad asemejándose al criterio humano, lo que puede llevar a la posibilidad de incluir el procesamiento de información humana en un estándar para medir la complejidad visual. Por otro lado, en (Pham & Yan, 2018) presentan una estadística de regularidad como una medida de complejidad de imágenes en términos de la entropía. El método que proponen consiste en aproximar la entropía de las imágenes en el marco de una cadena estacionaria de *Markov*, la cual es construida a partir de un gráfico ponderado que viene de la divergencia *Kullback-Leibler* de la imagen. Los resultados de este método demuestran que es un buen enfoque para cuantificar la complejidad de las

imágenes basado en la aproximación de la entropía y que puede ser utilizado para la evaluación de la calidad de imágenes.

3.3. Grado de compresión

Existen varios métodos de complejidad de imágenes que utilizan el grado de compresión, sin embargo, como no es la única característica que utilizan, no todos se encuentran dentro de esta categoría. Solo se encuentra el trabajo de (A. Forsythe et al., 2011) ya que el grado de compresión es la característica principal de su método. Al igual que en (Guo et al., 2013) este trabajo se enfoca en medir la complejidad de pinturas artísticas pero para relacionarla con la estética y la belleza. Su método se basa en el grado de compresión GIF y el cálculo de la dimensión fractal. El grado de compresión GIF fue tomado en cuenta debido a que presentó una fuerte correlación con el criterio humano cuando se trata de pinturas artísticas. Los resultados demuestran que la combinación de la compresión GIF y la dimensión fractal dan una buena aproximación a la belleza de las pinturas en términos de la complejidad.

3.4. Combinado

Los métodos que se encuentran en esta categoría son aquellos que no se les pudo dar una clasificación específica ya que utilizan dos o más características principales. Los investigadores combinan las características ya que opinan que la complejidad de las imágenes depende de varios aspectos, pero se le da un peso diferente a cada una de ellas.

Por medio de una combinación lineal de características en (Ciocca et al., 2015; S. E. Corchs et al., 2016) crean un método para determinar la complejidad de imágenes basándose en características del dominio del espacio y la frecuencia, y las propiedades de color. Para la combinación lineal se utilizan varias características visuales simples y fueron seleccionadas de acuerdo con la literatura referente a complejidad de imágenes, estas características se listan a continuación:

- Contraste de cada pixel con sus vecinos a lo largo de la imagen.
- Cómo se correlaciona cada pixel con sus pixeles vecinos a lo largo de la imagen.
- La energía, la cual es la suma cuadrática de los elementos en GLCM (Matriz de Coocurrencia de Escala de Grises por sus siglas en inglés).
- La homogeneidad, la cual mide la cercanía de las distribuciones de los elementos en GLCM con respecto a la diagonal de GLCM.
- Factor de frecuencia, es la tasa entre la frecuencia correspondiente al 99% de la energía de la imagen y la frecuencia de Nyquist.
- La densidad de los bordes, la cual es obtenida aplicando el detector de bordes de Canny en las imágenes a escala de grises.

- Tasa de compresión JPEG con un factor $Q = 100$ en comparación a la imagen sin comprimir.
- Número de regiones calculadas usando el algoritmo de segmentación descrito en (Comaniciu & Meer, 2002).
- Coloración de la imagen, la coloración de la imagen consiste en una combinación lineal de la media y la desviación estándar de la nube de píxeles en el plano de color (Hasler & Suesstrunk, 2003).
- Número de colores distintos que existen en la imagen.
- La armonía de los colores (Solli & Lenz, 2009).
- Congestión de características, se obtiene una sola métrica utilizando tres mapeos de desorden de las imágenes, representando la congestión de color, textura y orientación (Rosenholtz, Li, & Nakano, 2007).
- Entropía de subbanda, esta métrica está relacionada al número de bits requeridos por subbanda para codificar la imagen (Rosenholtz et al., 2007).

Otro esquema que se ha trabajado es el uso de redes neuronales artificiales, en (Chen et al., 2015) Chen et al. las utilizan para generar un algoritmo que describa la complejidad de las imágenes cuantitativamente tomando en cuenta tres aspectos: la textura, información de los bordes y la región significativa. Las características de la textura son extraídas de la matriz de coocurrencia en escala de gris, las cuales corresponden a la energía, entropía, contraste, homogeneidad y correlación. De los bordes solo se utiliza como característica la tasa de bordes que existen en la imagen, debido a que relacionan que entre mayor cantidad de bordes tenga la imagen, más compleja será.

Para la región significativa se utilizan los coeficientes extraídos mediante la Transformada Discreta del Coseno. La clasificación de las características se realiza con una red neuronal artificial tipo *feedforward* la cual provee un valor que indica la tasa de complejidad de cada una de las imágenes, de esta manera cada imagen se clasifica dentro de tres categorías: *No Compleja*, *Complicada* y *Muy Compleja*. Una ventaja de este método es que puede calcular la complejidad de las imágenes de una manera automática e independiente del humano. En esta categoría también se encuentra el método propuesto en (Chikhman et al., 2012) donde desarrollaron un modelo para medir la complejidad de las imágenes donde utilizan características espaciales, características espacio-frecuenciales, una combinación de las propiedades espaciales y la Transformada de Fourier, y el tamaño de la imagen codificada en formato JPEG.

Se realiza un experimento psicofísico para comparar sus resultados donde algunas personas evalúan la complejidad de dos grupos de imágenes, un grupo son 15 jeroglíficos chinos con los que no están familiarizados y el otro grupo es de 24 imágenes con la silueta de objetos ya conocidos. La finalidad de escoger estos dos conjuntos de imágenes fue para analizar si se requiere medir de diferente manera la complejidad dependiendo del tipo de imagen utilizada. Los

resultados indican que existe correlación entre los métodos que proponen para medir la complejidad y el criterio humano, sin embargo, concluyen que su modelo de medición puede ser usado para estimar la complejidad de las imágenes, pero para diferentes clases de imágenes se tienen que utilizar mediciones distintas. Por otro lado, en (Yaghmaee & Jamzad, 2010) desarrollan un metodo basado en el concepto de Región de Interés (ROI por sus siglas en inglés). Las ROI son aquellas regiones de las imágenes que más atraen la atención humana. La idea principal de este método es encontrar las ROI en las imágenes dividiéndolas por bloques y posteriormente la complejidad de las imágenes se mide basándose en la intensidad, contraste, localización, bordes y textura.

El objetivo principal es aplicar la complejidad de la imagen para estimar la capacidad de marca de agua en imágenes a escala de grises, donde sus resultados demuestran que el método por ROI es mejor que los métodos de Complejidad Compositiva de Imagen (Rigau et al., 2005), Dimensión Fractal (Conci & Aquino, 2005) y el método *Quad Tree* (Jamzad & Yaghmaee, 2006) para calcular la capacidad de marca de agua. En (Da Silva et al., 2011) proponen un método para determinar la complejidad de las imágenes, no directamente en el análisis del contenido de las imágenes, sino a partir de la perspectiva de la complejidad a través de un filtro de atención. Utilizan mapas de atención, mapas sobresalientes y mapas de calor para el cálculo de la complejidad de las imágenes. También, muestran que los puntos de enfoque dinámicos generados por la atención no centralizada pueden generar una mejor estimación de la complejidad visual. Como trabajo futuro proponen enfocarse en el estudio de la complejidad en secuencias de video.

El algoritmo de agrupamiento *K-means* combinado con el algoritmo matemático SIFT (Transformación de Características Invariables a la Escala por sus siglas en inglés) es utilizado por (Huo, 2015, 2016b) para desarrollar un algoritmo que mide el desajuste de los objetos que se desean observar de los objetos más sobresalientes de las imágenes. Este desajuste es utilizado para medir que tan compleja es una imagen, tratando de representar el grado de dificultad que tienen los humanos para poner atención a los objetos de interés cuando existen objetos de no interés sobresalientes. Otro método objetivo de complejidad de imágenes que combina características es el propuesto por (Purchase et al., 2012), donde utilizan siete características: 1) la cantidad de colores distintos en la imagen, 2) la cantidad de colores después de un algoritmo que normaliza el color por regiones similares y adyacencia, 3) la cantidad de colores cuando un algoritmo de posterización es aplicado, 4) la cantidad de regiones después de segmentar la imagen, 5) el área de los bordes al utilizar el algoritmo de detección de Canny (Canny, 1986), 6) la desviación estándar de la intensidad de los pixeles con la imagen en escala de grises y 7) el grado de compresión JPEG, PNG y GIF. Los resultados de este método demostraron que es complicado asimilarse con el criterio humano mediante el uso de características simples, ya que la regresión no dio los resultados esperados.

En el trabajo de (Guo, Asano, Asano, & Kurita, 2011; Guo et al., 2012) no se propone un método para medir la complejidad de las imágenes, pero determinan cinco características que afectan la complejidad de la percepción visual de las texturas, estas características son: la regularidad, rugosidad, direccionalidad, densidad y comprensibilidad. Proponen un conjunto de métodos para medir cada una de estas características, la regularidad es estimada por una función de autocorrelación, la rugosidad es medida basándose en los cambios locales, la direccionalidad es indicada de acuerdo con las direcciones de los bordes, la densidad se calcula mediante la densidad de los bordes y la comprensibilidad es definida mediante el criterio humano. Por lo que, la definición de complejidad de las imágenes está en función de todas estas características basadas en un análisis de la textura. De esta manera, como trabajo futuro proponen crear un método para determinar la complejidad de las imágenes que involucre estas características. Además, se realizaron experimentos para verificar si cada una de las características propuestas se correlaciona con el criterio humano. En (Reinecke et al., 2013) predicen la primera impresión de la estética de las páginas web por medio de la cuantificación de la complejidad visual. Para medir la complejidad utilizan las siguientes características: el promedio del valor de los píxeles en el espacio de color HSV para matiz y saturación, la suma del valor promedio de saturación y su desviación estándar, la suma ponderada de la longitud trigonométrica de la desviación estándar, el número de hojas obtenidas por el método *Quadtree*, el número de áreas de imágenes, número de grupos de texto, relación de área con texto y sin texto, la simetría a lo largo del eje horizontal y vertical, y el equilibrio.

Los resultados demuestran que la complejidad visual tiene gran importancia para la impresión de los usuarios en páginas web, sin embargo, concluyen que las características utilizadas no son universales para evaluar complejidad visual, es decir, los usuarios de las páginas web perciben la complejidad de diferente manera de acuerdo con sus antecedentes demográficos. Otro método para determinar la complejidad que utiliza diversas características es el propuesto en (Sun et al., 2015), el cual es utilizado para analizar la relación de la complejidad con la estética y de esta manera poder predecir la belleza en las fotos. Las características utilizadas para medir la complejidad son extraídas de la composición, la estadística y la distribución de los píxeles. La composición es calculada utilizando el método momentos ortogonales variantes descrito en (Martín H., Santos, & de Lope, 2010) y las características que se extraen son los segmentos, el color, la nitidez y la información de color relativo. Como información estadística se utilizan los bordes para contar el número de objetos, la curvatura, y textura calculan la entropía y áreas.

La distribución es representada como la combinación del histograma y sus diferencias con algunas plantillas de histograma predefinidas. De esta manera muestran que el nivel de complejidad que calculan por las características

propuestas tiene una relación similar con la expectativa de belleza de los seres humanos en miles de fotos.

4. Enfoques humanos

Los métodos para determinar la complejidad de imágenes por enfoques humanos son aquellos que la medición de la complejidad se realiza mediante un estudio psicológico o físico de lo que sucede al presentar imágenes con diferentes grados de complejidad a los sujetos de pruebas. De esta manera, en esta sección se resumen los métodos encontrados que se basan en este tipo de técnica.

4.1. Criterio humano

Dentro de los artículos revisados acerca de la complejidad de imágenes, se encontraron algunos experimentos para poder evaluar el criterio humano y tener una medida subjetiva contra la cual comparar los métodos que proponen o para estudios psicológicos. La mayoría de los métodos consiste en presentar imágenes con diferentes grados de complejidad a personas, para que de esta manera se puedan realizar diferentes análisis y evaluaciones.

Un *ground-truth* para complejidad de imágenes es propuesto en (Da Silva et al., 2011), donde consideran que la complejidad está relacionada a la dificultad que se tiene para describirlas. Miden el tiempo de observación promedio de un conjunto de 148 imágenes de dos bases de datos que contienen información de movimiento ocular para imágenes con diferentes grados de complejidad (Bruce, Bruce, Tsotsos, & Tsotsos, 2009; Le Meur, Le Callet, Barba, & Thoreau, 2006). Se les pidió a 12 sujetos que observaran cada imagen de la base de datos el tiempo suficiente para poder describirlas con una cantidad media de detalles, posteriormente el tiempo fue normalizado, promediado y ordenado para poder obtener el ranking promedio de tiempo de observación. La complejidad de las imágenes la estiman por medio del área bajo la curva ROC, donde toman en cuenta la variación del tiempo de cada participante con la media. Un método diferente es propuesto en (Cardaci et al., 2009), donde participan dos grupos, uno de 50 sujetos y otro de 15 sujetos, para evaluar la complejidad de seis pinturas artísticas en tres categorías: baja, media y alta.

Los dos grupos pertenecen a diferentes universidades con diferentes carreras, esto se realizó con la finalidad de evitar algún sesgo cultural. Cada imagen se mostró durante 90 s, después de este tiempo una persona les realizaba las siguientes preguntas a los participantes:

- ¿Definirías la imagen cómo agradable o molesta?
- ¿Definirías la imagen cómo silenciosa o llena de actividad?

- ¿Cuántas personas había en la imagen?
- ¿Cuántas mujeres y hombres estaban en la imagen?
- ¿Definirías la imagen cómo violenta o alegre?
- ¿Hubo algún niño?
- ¿Qué estación del año era?
- ¿La escena es por la mañana o por la tarde?
- ¿Había animales en la escena?
- ¿Cuántos tonos de color distintos puedes recordar?
- ¿Ha percibido líneas curvas o rectas en la imagen?
- ¿Cuántas formas distintas había en la imagen?

Posteriormente, se evalúan las respuestas de cada uno de los sujetos para cada imagen, y con esto se mide el grado de complejidad basándose también en el tiempo que tardan para analizar cada una. Otro método se presenta en (S. E. Corchs et al., 2016), donde realizan 4 experimentos para evaluar la complejidad de las imágenes en una escala de 0 a 100, las imágenes son presentadas por un tiempo indefinido hasta que el sujeto envía su respuesta, la complejidad es determinada por la media del ranking que se le da a cada imagen. En el experimento 1 participan 26 sujetos, 15 mujeres y 11 hombres con edad promedio de 37 años, en un rango de 18 a 53 años, utilizan 49 imágenes de la base de datos RSIVL (“Imaging and Vision Laboratory, Department of Informatics, Systems and Communication, University of Milano-Bicocca”, 2016).

Para el experimento 2 participan 16 mujeres y 20 hombres con edad promedio de 33 años, en un rango de 18 a 53, para este experimento se usan 49 imágenes diferentes a las del experimento 1, las cuales se encuentran en la base de datos LIVE (Sheik, Wang, Cormakc, & Bovik, 2006; Sheikh, Sabir, & Bovik, 2006; Wang, Bovik, Sheikh, & Simoncelli, 2004) y IVL (S. Corchs, Gasparini, & Schettini, 2014; “Imaging and Vision Laboratory, Department of Informatics, Systems and Communication, University of Milano-Bicocca”, 2014). En el experimento 3 participan 17 sujetos 5 mujeres y 12 hombres con edad promedio de 35 años en un rango de 23 a 51, en este experimento se utilizan 54 imágenes de textura, el conjunto TXT1 de la base de datos VisTex (“MIT Media Lab, Vision Texture”, s/f). Por último, para el experimento 4 participan 10 mujeres y 13 hombres con edad promedio de 28 años en un rango de 19 a 68, y para este experimento utilizan 68 imágenes de la base de datos RawFoot (Cusano, Napoletano, & Schettini, 2016; “RawFoot DB - Imaging and Vision Laboratory - Department of Systems, Informatics and Communication - University of Milan-Bicocca, Italy”, 2016).

Por otro lado, en (Cavalcante et al., 2014) proponen un ranking subjetivo donde involucran a 40 sujetos de dos nacionalidades: 27 japoneses y 13 argelinos. En el experimento, los sujetos son colocados a una distancia aproximada de 80 cm del monitor donde se muestran las imágenes a evaluar. Los sujetos debían

agrupar según su criterio las imágenes de los paisajes urbanos en tres grupos: *simples*, *normales* y *complejos*. Después, se les pidió que ordenaran las imágenes de menor a mayor complejidad para cada grupo. De esta manera, la complejidad de las imágenes fue estimada por la media del ranking que dieron cada uno de los sujetos participantes. En (Sun et al., 2015) también proponen un ranking subjetivo donde utilizan 80 fotografías (de animales, arquitectura, paisajes urbanos, flores, comida, retratos y naturaleza muerta) para que cinco sujetos, dos mujeres y tres hombres con edad entre 23 y 28 años evalúen su complejidad en una escala del uno al cinco, donde uno es una fotografía muy sencilla y cinco es una muy compleja. Para cada imagen se calcula la media y la desviación estándar de la complejidad prevista por los sujetos.

Otro método basado en el criterio humano es el propuesto por (Ramanarayanan et al., 2008), las pruebas piloto para entender como es la complejidad de las imágenes consistieron en que 21 sujetos ordenaran por grado de complejidad 40 imágenes obtenidas de la web. Cabe mencionar que no se les dio una explicación de lo que es complejidad, sino que cada sujeto realizó el experimento según su definición de complejidad. Después de este experimento se eligieron solamente 21 imágenes para las pruebas, donde los sujetos comparaban las imágenes por pares, diciendo cual es más compleja. Finalmente, los resultados obtenidos fueron comparados contra algunos métodos para determinar la complejidad de imágenes por enfoques computacionales, como el conteo de polígonos de escena y el grado de compresión de imágenes JPEG, donde se dieron cuenta de que no existía gran correlación. Por otro lado, en (Palumbo et al., 2014) miden la complejidad de imágenes mediante dos experimentos subjetivos 1A y 2A. El experimento 1A consistió en evaluar imágenes de patrones de bloques a blanco y negro. Participaron 10 sujetos con edad entre 19 y 45 años, cinco hombres y cinco mujeres. Los patrones de bloques fueron presentados a los sujetos aleatoriamente y tuvieron que evaluar su complejidad en una escala de 1 a 6, donde 1 es muy simple y 6 muy compleja, en total se les presentaron 180 imágenes por lo que la evaluación duró aproximadamente 20 min. Los resultados de este experimento demostraron una correlación positiva con una medida de complejidad computacional basada en el grado de compresión GIF (Alex Forsythe, Mulhern, & Sawey, 2008). El experimento 2A participaron 10 sujetos con edad entre 17 y 76 años, seis mujeres y seis hombres. Este experimento es similar al 1A con la diferencia en que se utilizaron bloques de distintos tamaños. Para el experimento 2A se obtuvo una alta correlación positiva con el grado de compresión GIF.

Además de proponer un método computacional, (Purchase et al., 2012) también proponen una medida subjetiva de la complejidad de imágenes donde recolectan la información por medio de un sitio web, esto con la finalidad de que lo puedan hacer desde el lugar donde se encuentren. La primera etapa del experimento consiste en pedirles a los sujetos que ordenen cuatro imágenes basándose en que tan complejas son para ellos, cada imagen es mostrada dos veces durante

esta etapa, y cada sujeto realiza esta acción 30 veces, por lo tanto, se tiene un total de 60 imágenes distintas. En la segunda etapa se les muestran las 60 imágenes a los sujetos y se les pide que valoren la complejidad de cada una de acuerdo con la escala Likert de cinco puntos. Este experimento duró en promedio 13 minutos y lo realizaron 54 sujetos. Los resultados de este experimento demostraron que la evaluación subjetiva de complejidad de los humanos es consistente tanto individual como grupal.

4.2. Reacción humana

La complejidad de imágenes no solo ha sido estudiada para lograr definirla o cuantificarla, algunos trabajos de investigación se enfocan en estudiar cómo es la reacción de los seres humanos al observar imágenes con diferentes grados de complejidad. Las reacciones estudiadas pueden ser desde el movimiento ocular hasta las señales eléctricas que se generan en el cerebro.

El análisis del movimiento ocular al observar imágenes con diferentes grados de complejidad ha sido estudiado por (Bonev et al., 2013), y su hipótesis es que la complejidad de las imágenes está relacionada con la cantidad de tareas que se tienen que realizar para entenderlas. Para su experimento utilizan a ocho personas, y consiste en mostrarles imágenes mientras que se utiliza un dispositivo para registrar el movimiento ocular (SR Research Eyelink II) y otro para registrar el movimiento de la cabeza (VICON MX). Los autores comparan los resultados obtenidos contra un método que calcula la complejidad de las imágenes por medio de densidad de potencia espectral. Sus resultados difieren debido a que el movimiento de los ojos puede depender del tamaño de las imágenes, ya que, aunque se trate de la misma imagen pero con diferente tamaño, el movimiento de los ojos será menor o mayor. Por lo tanto, concluyen que el movimiento de los ojos para encontrar objetos en una imagen no está relacionada la complejidad de la imagen.

En (White et al., 2012) también analizan el movimiento ocular, pero con la finalidad de observar el comportamiento de los ojos al leer oraciones japonesas y los efectos en palabras largas o con complejidad visual alta. Para los experimentos participan diez estudiantes de la universidad de Teikyo en Japón, cuyo idioma natal es el japonés. El movimiento ocular fue monitoreado utilizando el dispositivo seguidor de ojos Dual Purkinje generación 5.5. Los participantes leen un total de 142 oraciones, de las cuales se les pide que las lean hasta que sean comprendidas totalmente. Los resultados demuestran que la complejidad de las oraciones influye significativamente en el tiempo de lectura.

Por otro lado, en (Roth et al., 2013) analizan el movimiento ocular para medir como es la experiencia de los usuarios en una página web ficticia con la finalidad de ver cómo afecta la localización de los objetos en tiendas en línea, páginas de noticias o de compañías. 40 sujetos participan en este experimento y el

movimiento ocular es registrado mediante el dispositivo Tobii 1750 eye-tracker. Los resultados muestran que el colocar los objetos en posiciones esperadas de los usuarios y diseñar su apariencia de acuerdo con la orientación ayuda a mejorar la primera impresión de las páginas web y también la navegación en éstas.

En (Huo, 2016a) además de proponer un método para evaluar la complejidad de las imágenes, también realizó un experimento para medir si existe correlación entre su método y la actividad que tiene el cerebro humano mediante señales electroencefalográficas (EEG) cuando se observan imágenes con diferentes grados de complejidad. El experimento se realiza con cuatro hombres y cuatro mujeres con una edad promedio de 23.8 años donde se le pidió recordar cuantos objetos observan en una imagen que les es presentada en un monitor, las cuales van variando de simples a complejas. El número de objetos a recordar es de 3 a 50 en cada imagen. Los resultados obtenidos demuestran que existe correlación entre el método para medir la complejidad de imágenes que utilizan (Huo, 2015, 2016b) y el resultado del experimento con señales electroencefalográficas. En (Cho et al., 2016) también realizaron un estudio electroencefalográfico, además de uno magnetoencefalográfico (MEG) para medir la actividad cerebral de las personas cuando se les presentan imágenes 3D estereoscópicas, y de esta manera poder analizar su respuesta en imágenes con profundidad excesiva, diferentes tipos de complejidad en las texturas, objetos en movimiento, entre otras. La hipótesis de este trabajo es que la actividad cerebral puede aumentar a medida que aumenta la complejidad de forma de la imagen estereoscópica.

Para probar su hipótesis proponen un experimento que usa tres imágenes distintas, consiste en recolectar las señales EEG y MEG de 10 sujetos de pruebas sanos (seis hombres y cuatro mujeres con edad promedio de 24.4 años) y ver si existe correlación de la actividad cerebral con la complejidad de las imágenes. Después del análisis de los experimentos se presentaron varios resultados donde se comprueba que existe correlación entre la actividad cerebral del área occipital y el tipo de imágenes que se les fueron mostradas. Basándose también en un estudio magnetoencefalográfico, en (Hsu et al., 2011) estudian los efectos de la complejidad visual con un experimento que consiste en analizar las respuestas M100 y M170 en las zonas occipital y temporal de personas inglesas y chinas al observar caracteres chinos. Los resultados demostraron que para los ingleses y los chinos la M100 tiende a incrementar cuando se presentan caracteres con alto número de trazos, pero la M170 en el hemisferio izquierdo tiende a incrementar solo con los chinos cuando están leyendo los caracteres con alto número de trazos, y la M170 del hemisferio derecho incrementa cuando leen los caracteres menos complejos.

De esta manera, es posible darse cuenta de que la complejidad de imágenes sigue siendo subjetiva aún y cuando se analiza la actividad cerebral, lo cual es causado por una gran cantidad de aspectos psicológicos y demográficos.

5. Bases de datos utilizadas para medir la complejidad de imágenes

En esta sección se muestran las bases de datos abiertas al público que se encontraron a través del análisis de la literatura, que han sido utilizadas para estudios de complejidad de imágenes. Algunas de ellas no son específicamente para la medición de complejidad de imágenes, pero debido a las características que presentan las imágenes en diferentes tipos de texturas, entornos reales con diversos números de objetos o imágenes con patrones artificiales, se consideró que pueden ser utilizadas para evaluar los métodos de medición de complejidad. En la Tabla 2 se muestra el nombre de las bases de datos encontradas, así como vínculo de la página web donde se encuentran.

La base de datos VisTex fue creada con la intención de proveer un conjunto de imágenes de texturas de alta calidad para aplicaciones de visión por computadora. RSIVL es una base de datos que contiene imágenes de escenarios reales la cual fue creada para analizar la influencia del color en la percepción de complejidad de imágenes y medir la complejidad de las imágenes. La base de datos IVL fue utilizada originalmente para la evaluación de la calidad de las imágenes, al igual que la base de datos LIVE y CSIQ *Image Quality Database*. Por otro lado, la base de datos RawFoot Texture fue diseñada para investigar la robustez de los métodos descriptores y de clasificación con respecto a las variaciones del color por los cambios de la iluminación. La base de datos *Pictures for psycholinguistic studies*, contiene un conjunto de imágenes que fueron diseñadas para analizar la familiaridad conceptual, la complejidad visual, la variabilidad de las imágenes, entre otras aplicaciones. Por último, la base de datos AVA contiene una inmensa cantidad de imágenes para el análisis visual de estética.

Base de datos	Ubicación (Vínculo)
Vision Texture (VisTex) ("MIT Media Lab, Vision Texture", s/f)	http://vismod.media.mit.edu/vismod/imagery/VisionTexture/vistex.html
RSIVL ("Imaging and Vision Laboratory, Department of Informatics, Systems and Communication, University of Milano-Bicocca", 2016)	http://www.ivl.disco.unimib.it/activities/complexity-perception-in-images/
IVL (S. Corchs et al., 2014) ("Imaging and Vision Laboratory, Department of Informatics, Systems and Communication, University of Milano-Bicocca", 2014)	http://www.ivl.disco.unimib.it/activities/imagequality/
LIVE (Sheik et al., 2006)	http://live.ece.utexas.edu/research/quality/
Raw Food Texture (Cusano et al., 2016) ("RawFoot DB - Imaging and Vision Laboratory - Department of Systems, Informatics and Communication - University of Milan-Bicocca, Italy", 2016)	http://projects.ivl.disco.unimib.it/minisites/rawfoot/
Pictures for psycholinguistic studies (Bonin, Peereman, Malardier, Méot, & Chalard, s/f)	http://leadserv.u-bourgogne.fr/bases/pictures/
CSIQ Image Quality Database (Chandler, 2010) (Larson & Chandler, 2010)	http://vision.eng.shizuoka.ac.jp/mod/page/view.php?id=23
AVA (Murray, Marchesotti, & Perronnin, 2012) (Murray, Marchesotti, & Perronnin, s/f)	https://github.com/mtobeify/ava_downloader

Tabla 2. Bases de datos utilizadas para medir la complejidad de imágenes.

6. Análisis

Los 34 métodos para determinar la complejidad de imágenes que se encontraron en la literatura fueron obtenidos mediante el análisis de 28 artículos. Estos métodos fueron analizados y resumidos en la Sección 3 y 4. En algunos artículos se proponen hasta dos diferentes métodos, normalmente uno por enfoques computacionales y otro basado en enfoques humanos. Los 34 métodos encontrados se clasificaron en seis categorías con base en el tipo de características que utilizan para determinar la complejidad, estas categorías son: información de bordes, información del color y/o intensidad, grado de compresión, combinado, criterio humano y reacción humana. En la Figura 1 se muestra un gráfico donde se indica la cantidad de métodos por cada categoría propuesta. Cabe mencionar que debido a que no se tiene una definición concreta de lo que es complejidad de imágenes, muchos investigadores del área de procesamiento digital de imágenes o visión por computadora la utilizan de una forma indirecta, es decir, utilizan características para realizar ajustes en los parámetros de sus algoritmos que también son utilizadas para el cálculo de la complejidad, por ejemplo, la entropía es utilizada para ajustar parámetros en algunos algoritmos, y existen investigadores que relacionan directamente la entropía con la complejidad de las imágenes.

Para la categoría información de bordes se encontraron dos métodos, para información de color y/o intensidad siete, para grado de compresión solo se

encontró uno y en el caso de combinado se encontraron diez. Se encontraron también ocho métodos basados en el criterio humano y seis en la reacción humana. Las categorías información de bordes y grado de compresión son las que contienen una menor cantidad de métodos. Sin embargo, por lo general estas características son utilizadas en combinación con otras. Por lo que, algunas de las medidas en la categoría combinado incluyen también características de bordes y grado de compresión. La categoría combinado es la que contiene la mayor cantidad de métodos para determinar la complejidad de imágenes, esto es debido a que la mayoría de los investigadores optan por usar más de una característica para realizar la medición, ya que tratan de aproximarse más al criterio humano y definen que la complejidad está en función de diversas características. La categoría criterio humano es la segunda con mayor cantidad, dentro de esta categoría entran los métodos que tienen como finalidad el análisis de aspectos psicológicos o también tener una comparación para los métodos computacionales propuestos.

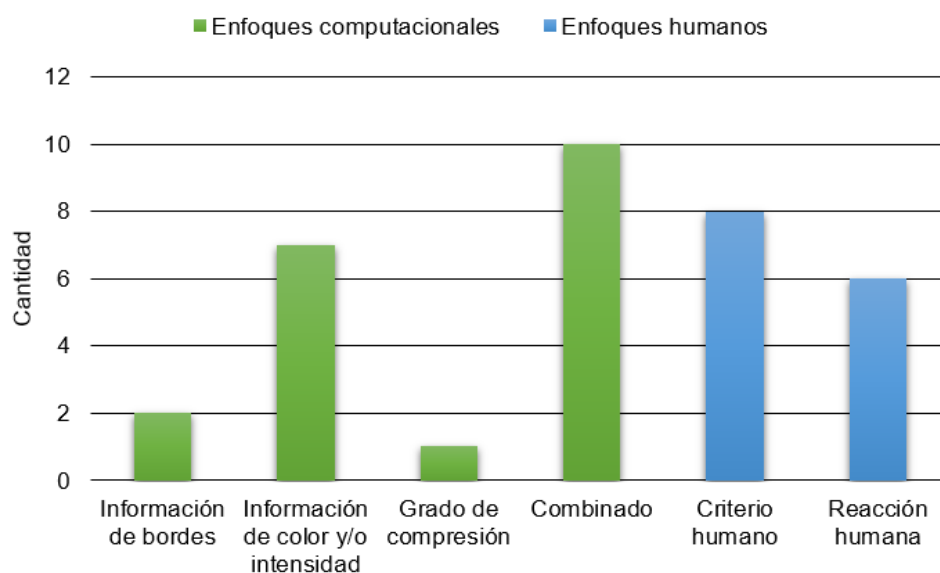


Figura 1. Cantidad de métodos por categoría.

La búsqueda de artículos se realizó considerando artículos del 2005 a la actualidad, y como se puede observar en la gráfica de la Figura 2 la mayor cantidad de métodos publicados fue del 2009 al 2016. Los años donde se encontraron la mayor cantidad de publicaciones fue en el 2012 y 2016 con cinco métodos. Sin embargo, a partir del 2017 los métodos de complejidad de imágenes publicados decayeron considerablemente, donde solo se encontró uno. Pero, las características utilizadas para la medición de la complejidad de imágenes siguen siendo utilizadas para desarrollar algoritmos de áreas como procesamiento digital de imágenes y visión por computadora, por lo que se concluye que la complejidad de imágenes no siempre es estudiada de una forma directa, y se sigue realizando investigación en esta área aún y cuando no se le dé este nombre en específico.

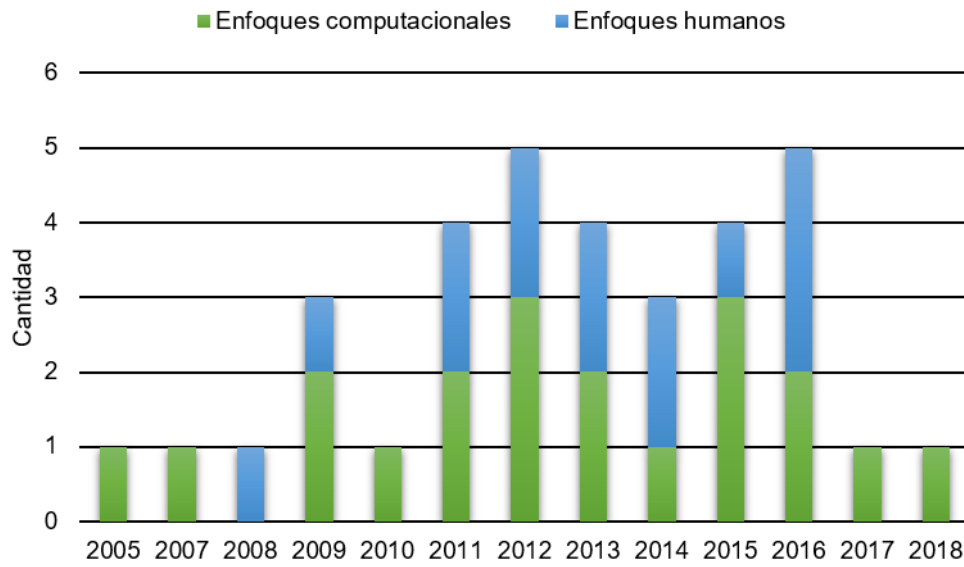


Figura 2. Cantidad de métodos encontrados por año de publicación.

En la gráfica mostrada en la Figura 3 se observan las características relevantes que utilizan los métodos de complejidad de imágenes por enfoques computacionales estudiados en este artículo. Las características más utilizadas son la información de color, la cual es utilizada diez veces y la información de bordes que se utiliza ocho veces. Seguidamente, se encuentra la entropía como característica para este tipo de medición, la cual es utilizada por cinco diferentes métodos, y el grado de compresión y las regiones de la segmentación se utilizan cuatro veces. Las características restantes son aquellas que se utilizan para casos particulares de cada una de las mediciones de complejidad propuestas. Con esto, es posible darse cuenta de que la mayoría de los investigadores relaciona a la complejidad de imágenes con la información que provee el color ya que de aquí se pueden extraer datos importantes para asemejarse a el criterio humano, y la información de los bordes que provee información de la cantidad de detalles contenidos, así como la cantidad de objetos.

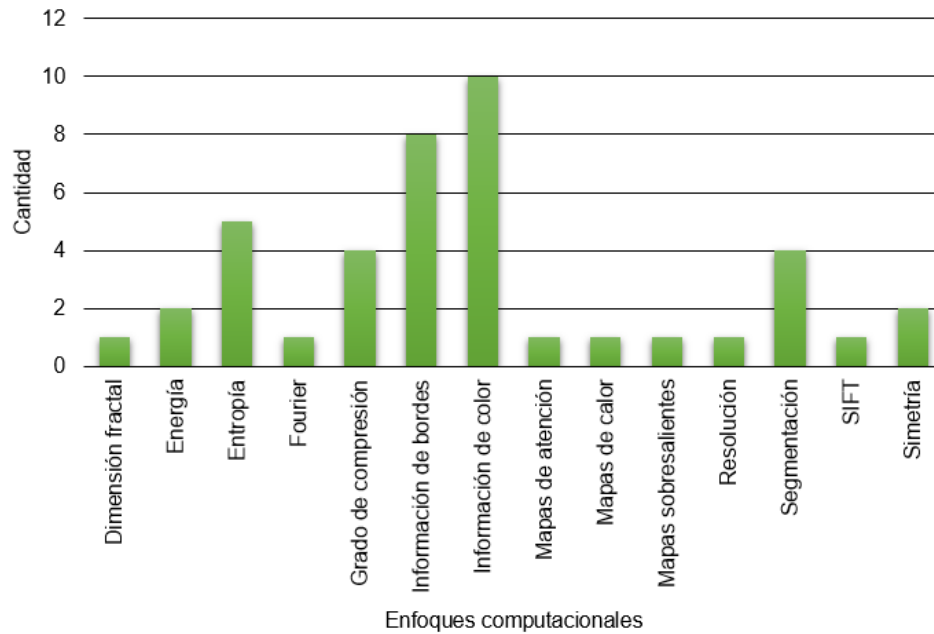


Figura 3. Cantidad de características utilizadas por los enfoques computacionales.

Con lo referente a los enfoques humanos, se encontraron siete tipos de características o métodos para la medición de la complejidad de imágenes, los cuales son mostrados en la Figura 4. La más utilizada es la media del criterio humano, la cual trata de que los sujetos participantes en los experimentos evalúen dentro de una escala la complejidad de cada imagen que se les presenta. Tres medidas donde se trabaja con el movimiento ocular fueron encontradas, para este tipo de método la complejidad de imágenes depende proporcionalmente del movimiento ocular necesario para analizar las imágenes. También, las señales EEG y MEG fueron estudiadas para cuantificar la complejidad, las cuales fueron utilizadas dos veces cada una. Además, se utilizó el tiempo de observación de las imágenes y el realizar un cuestionario para evaluar el criterio.

Como se aprecia en la información anterior, se encontraron diversas aplicaciones para los métodos de medición de complejidad de imágenes, algunos métodos son aplicados para el desarrollo de algoritmos computacionales y otros para analizar la impresión de las personas a los diferentes grados de complejidad. De los 34 métodos analizados, 19 de ellos tienen una aplicación práctica, distribuidos en la creación de algoritmos computacionales o análisis de cómo perciben la complejidad las personas. Los otros 15 métodos que no tienen una aplicación práctica son propuestos principalmente con la finalidad de demostrar que las medidas computacionales de complejidad de imágenes se correlacionan con el criterio humano y viceversa.

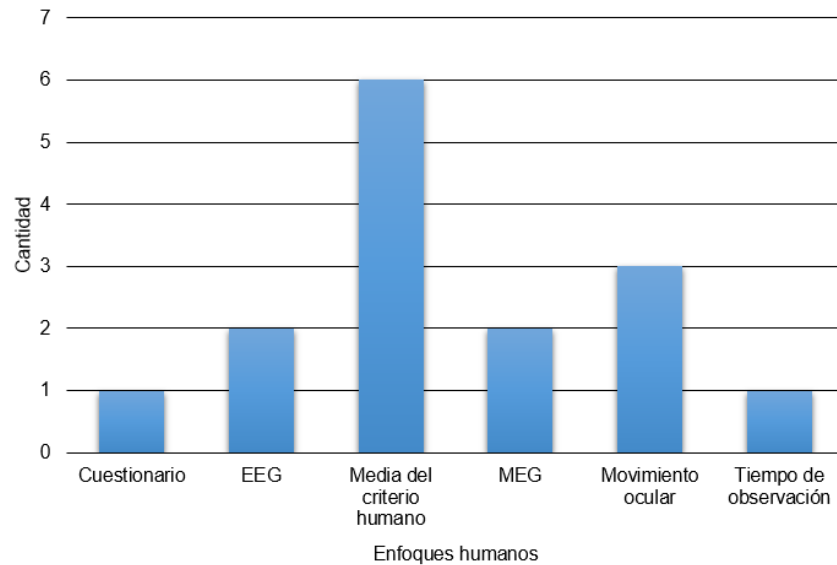


Figura 4. Cantidad de características utilizadas por los enfoques humanos.

7. Resultados y conclusiones

Como se pudo observar a lo largo de este artículo, la cantidad de publicaciones donde se proponen métodos para determinar la complejidad de imágenes es escasa, esto puede ser debido a que no siempre es utilizada directamente. Sin embargo, la medición de la complejidad de imágenes ha contribuido a que muchos algoritmos computacionales del área de procesamiento digital de imágenes, visión por computadora, entre otras, cada vez sean menos dependientes del humano, es decir contribuye a la autoadaptabilidad, la cual es una cualidad importante ya que la tendencia de los algoritmos hoy en día es depender menos de la interacción humana. También, puede contribuir en lo referente a la impresión humana, como el diseño de páginas web con un acomodo de objetos más eficientes y estético, saber cómo será la experiencia de los usuarios al navegar en la web y la predicción de la belleza en pinturas artísticas. Además, puede contribuir en diversos estudios psicológicos.

Referencias

Bonev, B., Chuang, L. L., & Escolano, F. (2013). How do image complexity, task demands and looking biases influence human gaze behavior? *Pattern Recognition Letters*, 34(7), 723–730. <http://doi.org/10.1016/j.patrec.2012.05.007>

Bonin, P., Peereman, R., Malardier, N., Méot, A., & Chalard, M. (s/f). Pictures and norms for psycholinguistic studies. Recuperado el 2 de mayo de 2018, a partir de <http://leadserv.u-bourgogne.fr/bases/pictures/>

Bruce, N. D. B., Bruce, N. D. B., Tsotsos, J. K., & Tsotsos, J. K. (2009). Saliency, attention, and visual search: An information theoretic approach. *Journal of Vision*, 9(2009), 1–24. <http://doi.org/10.1167/9.3.5.Introduction>

Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 8(6), 679–698. <http://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>

Cardaci, M., Di Gesù, V., Petrou, M., & Tabacchi, M. E. (2009). A fuzzy approach to the evaluation of image complexity. *Fuzzy Sets and Systems*, 160(10), 1474–1484. <http://doi.org/10.1016/j.fss.2008.11.017>

Cavalcante, A., Mansouri, A., Kacha, L., Barros, A. K., Takeuchi, Y., Matsumoto, N., & Ohnishi, N. (2014). Measuring streetscape complexity based on the statistics of local contrast and spatial frequency. *PLoS ONE*, 9(2), 1–13. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0087097>

Chacón, M. I., Aguilar D., L. E., & Delgado S., A. (2002). Fuzzy adaptive edge definition based on the complexity of the image. En *IEEE International Conference on Fuzzy Systems* (Vol. 2, pp. 675–678). <http://doi.org/10.1109/FUZZ.2001.1009045>

Chacón, M. I., Corral S., A. D., & Sandoval R., R. (2007). A Fuzzy Approach on Image Complexity Measure. *Computación y Sistemas*, 10(3), 268–284. Recuperado a partir de <http://www.scielo.org.mx/pdf/cys/v10n3/v10n3a6.pdf>

Chandler, D. M. (2010). Most apparent distortion: full-reference image quality assessment and the role of strategy. *Journal of Electronic Imaging*, 19(1), 1–21. <http://doi.org/10.1117/1.3267105>

Chen, Y.-Q., Duan, J., Zhu, Y., Qian, X.-F., & Xiao, B. (2015). Research on the image complexity based on neural network. En *Proceedings of the 2015 International Conference on Machine Learning and Cybernetics* (pp. 295–300).

Chikhman, V., Bondarko, V., Danilova, M., Goluzina, A., & Shelepin, Y. (2012). Complexity of images: experimental and computational estimates compared. *Perception*, 41(6), 631–647. <http://doi.org/10.1068/p6987>

Cho, H., Kang, M. K., Ahn, S., Kwon, M., Yoon, K. J., Kim, K., & Jun, S. C. (2016). Cortical responses and shape complexity of stereoscopic image - A simultaneous EEG/MEG study. *NeuroSignals*, 24(1), 102–112. <http://doi.org/10.1159/000442617>

Ciocca, G., Corchs, S., & Gasparini, F. (2015). Complexity Perception of Texture Images. En Springer International Publishing Switzerland 2015 (Vol. 9281, pp. 119–126). <http://doi.org/10.1007/978-3-319-23222-5>

Comaniciu, D., & Meer, P. (2002). Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 24(5), 1–18. <http://doi.org/10.1109/34.1000236>

Conci, A., & Aquino, F. (2005). Fractal coding based on image local fractal dimension. *Computational & Applied Mathematics*, 24(1), 83–98. <http://doi.org/10.1590/S0101-82052005000100005>

Corchs, S. E., Ciocca, G., Bricolo, E., & Gasparini, F. (2016). Predicting complexity perception of real world images. *PLoS ONE*, 11(6), 1–22. <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0157986>

Corchs, S., Gasparini, F., & Schettini, R. (2014). No reference image quality classification for JPEG-distorted images. *Digital Signal Processing: A Review Journal*, 30, 86–100. <http://doi.org/10.1016/j.dsp.2014.04.003>

Corral S., A. D. (2003). Modeling edge perception using fuzzy logic. Master Thesis.

Cusano, C., Napoletano, P., & Schettini, R. (2016). Evaluating color texture descriptors under large variations of controlled lighting conditions. *Journal of the Optical Society of America*, 33(1), 17–30. <http://doi.org/10.1364/JOSAA.33.000017>

Da Silva, M. P., Courboulay, V., & Estrailier, P. (2011). Image Complexity Measure Based on Visual Attention. En *IEEE International Conference On Image Processing* (pp. 3281–3284).

Di Gesù, V., & Roy, S. (2000). Fuzzy measures for image distance. En *Advances in Fuzzy Systems and Intelligent Technologies*. NL: Shaker Publishing.

Forsythe, A. (2009). Visual Complexity: Is That All There Is ? *Complexity*, 5639, 158–166. http://doi.org/10.1007/978-3-642-02728-4_17

Forsythe, A., Mulhern, G., & Sawey, M. (2008). Confounds in pictorial sets: The role of complexity and familiarity in basic-level picture processing. *Behavior Research Methods*, 40(1), 116–129. <http://doi.org/10.3758/BRM.40.1.116>

Forsythe, A., Nadal, M., Sheehy, N., Cela-Conde, C. J., & Sawey, M. (2011). Predicting beauty: Fractal dimension and visual complexity in art. *British Journal of Psychology*, 102(1), 49–70. <http://doi.org/10.1348/000712610X498958>

Guo, X., Asano, C. M., Asano, A., & Kurita, T. (2011). Visual complexity perception and texture image characteristics. En 2011 International Conference on Biometrics and Kansei Engineering (pp. 260–265). <http://doi.org/10.1109/ICBAKE.2011.13>

Guo, X., Asano, C. M., Asano, A., Kurita, T., & Li, L. (2012). Analysis of texture characteristics associated with visual complexity perception. *Optical Review*, 19(5), 306–314. <http://doi.org/10.1007/s10043-012-0047-1>

Guo, X., Kurita, T., Muraki Asano, C., & Asano, A. (2013). Visual complexity assessment of painting images. En *Image Processing (ICIP)*, 2013 20th IEEE International Conference on (pp. 388–392).

Hasler, D., & Suesstrunk, S. E. (2003). Measuring colourfulness in natural images. En *Electronic Imaging 2003* (pp. 87–95). <http://doi.org/10.1117/12.477378>

Heaps, C., & Handel, S. (1999). Similarity and features of natural textures. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 25(2), 299–320. <http://doi.org/10.1037/0096-1523.25.2.299>

Hsu, C. H., Lee, C. Y., & Marantz, A. (2011). Effects of visual complexity and sublexical information in the occipitotemporal cortex in the reading of Chinese phonograms: A single-trial analysis with MEG. *Brain and Language*, 117(1), 1–11. <http://doi.org/10.1016/j.bandl.2010.10.002>

Huo, J. (2015). A measurement method for the mismatch between the image target and salient points as a metric for image complexity. En *Science and Information Conference, SAI 2015* (pp. 645–649). <http://doi.org/10.1109/SAI.2015.7237210>

Huo, J. (2016a). An image complexity measurement algorithm with visual memory capacity and an EEG study. En *SAI Computing Conference* (pp. 264–268). <http://doi.org/10.1109/SAI.2016.7555993>

Huo, J. (2016b). Image Complexity and Visual Working Memory Capacity. *Emerging Trends and Advanced Technologies for Computational Intelligence*, 647, 301–314. <http://doi.org/10.1007/978-3-319-33353-3>

Imaging and Vision Laboratory, Department of Informatics, Systems and Communication, University of Milano-Bicocca. (2014). Recuperado el 2 de mayo de 2018, a partir de <http://www.ivl.disco.unimib.it/activities/image-quality>

Imaging and Vision Laboratory, Department of Informatics, Systems and Communication, University of Milano-Bicocca. (2016). Recuperado el 2 de mayo de 2018, a partir de <http://www.ivl.disco.unimib.it/activities/complexity-perception-in-images>

Ivanovici, M. (2017). A Naive Complexity Measure for Color Texture Images. En 2017 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS) (pp. 1–4).

Jamzad, M., & Yaghmaee, F. (2006). Achieving higher stability in watermarking according to image complexity. *Scientia Iranica Journal*, 13(4), 404–412. Recuperado a partir de http://www.plan.sid.ir/en/VEWSSID/J_pdf/95520060405.pdf

Kolmogorov, A. N. (1968). Three approaches to the quantitative definition of information. *International Journal of Computer Mathematics*, 2(1–4), 157–168. <http://doi.org/10.1080/00207166808803030>

Larson, E. C., & Chandler, D. M. (2010). Databases: CSIQ Image Quality Database. Recuperado el 2 de mayo de 2018, a partir de <http://vision.eng.shizuoka.ac.jp/mod/page/view.php?id=23>

Le Meur, O., Le Callet, P., Barba, D., & Thoreau, D. (2006). A coherent computational approach to model bottom-up visual attention. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(5), 802–817. <http://doi.org/10.1109/TPAMI.2006.86>

Machado, P., Romero, J., Nadal, M., Santos, A., Correia, J., & Carballal, A. (2015). Computerized measures of visual complexity. *Acta Psychologica*, 160, 43–57. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.06.005>

Martín H., J. A., Santos, M., & de Lope, J. (2010). Orthogonal variant moments features in image analysis. *Information Sciences*, 180(6), 846–860. <http://doi.org/10.1016/j.ins.2009.08.032>

MIT Media Lab, Vision Texture. (s/f). Recuperado el 2 de mayo de 2018, a partir de <http://vismod.media.mit.edu/vismod/imagery/VisionTexture/>

Murray, N., Marchesotti, L., & Perronnin, F. (s/f). AVA Dataset. Recuperado el 5 de mayo de 2018, a partir de https://github.com/mtobeiyf/ava_downloader

Murray, N., Marchesotti, L., & Perronnin, F. (2012). AVA: A large-scale database for aesthetic visual analysis. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 2408–2415. <http://doi.org/10.1109/CVPR.2012.6247954>

Ning, J., Zhang, L., Zhang, D., & Wu, C. (2010). Interactive image segmentation by maximal similarity based region merging. *Pattern Recognition*, 43(2), 445–456. <http://doi.org/10.1016/j.patcog.2009.03.004>

Palumbo, L., Makin, A. D. J., & Bertamini, M. (2014). Examining visual complexity and its influence on perceived duration. *Journal of Vision*, 14(14), 1–18. <http://doi.org/10.1167/14.14.3>.doi

Perki, J., & Hyvarinen, A. (2009). Modelling image complexity by independent component analysis, with application to content-based image retrieval. En *Artificial Neural Networks–ICANN 2009* (pp. 704–714). http://doi.org/10.1007/978-3-642-04277-5_71

Pham, T. D., & Yan, H. (2018). A regularity statistic for images. *Chaos, Solitons and Fractals*, 106, 227–232. <http://doi.org/10.1016/j.chaos.2017.11.033>

Purchase, H. C., Freeman, E., & Hamer, J. (2012). An Exploration of Visual Complexity. En *International Conference on Theory and Application of Diagrams* (Vol. 7352, pp. 200–213). http://doi.org/10.1007/978-3-642-31223-6_22

Ramanarayanan, G., Bala, K., Ferwerda, J. a., & Walter, B. (2008). Dimensionality of Visual Complexity in Computer Graphics Scenes. En *Proceedings of SPIE 6806, Human Vision and Electronic Imaging XIII* (pp. 1–12). <http://doi.org/10.1117/12.767029>

RawFoot DB - Imaging and Vision Laboratory - Department of Systems, Informatics and Communication - University of Milan-Bicocca, Italy. (2016). Recuperado el 2 de mayo de 2018, a partir de <http://projects.ivl.disco.unimib.it/rawfoot>

Reinecke, K., Yeh, T., Miratrix, L., Mardiko, R., Zhao, Y., Liu, J., & Gajos, K. Z. (2013). Predicting users' first impressions of website aesthetics with a quantification of perceived visual complexity and colorfulness. En *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2049–2058). <http://doi.org/10.1145/2470654.2481281>

Rigau, J., Feixas, M., & Sbert, M. (2005). An Information-Theoretic Framework for Image Complexity. En *Computational Aesthetics in Graphics, Visualization and Imaging* (pp. 177–184). <http://doi.org/10.2312/COMPAESTH/COMPAESTH05/177-184>

Rosenholtz, R., Li, Y., & Nakano, L. (2007). Measuring visual clutter. *Journal of vision*, 7(2), 1–22. <http://doi.org/10.1167/7.2.17>

Roth, S. P., Tuch, A. N., Mekler, E. D., Bargas-Avila, J. A., & Opwis, K. (2013). Location matters, especially for non-salient features-An eye-tracking study on the effects of web object placement on different types of websites. *International Journal of Human Computer Studies*, 71(3), 228–235. <http://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.09.001>

Sheik, H., Wang, Z., Cormack, L., & Bovik, A. (2006). LIVE Image Quality Assessment Database Release 2. Recuperado el 2 de mayo de 2018, a partir de <http://live.ece.utexas.edu/research/quality/>

Sheikh, H. R., Sabir, M. F., & Bovik, A. C. (2006). Image Quality Assessment Algorithms. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 15(11), 3441–3452. <http://doi.org/10.1109/TPCG.2004.1314471>

Snodgrass, J. G., & Vanderwart, M. (1980). A standardised set of 260 pictures: normal for name agreement, familiarity and visual complexity. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, 6(2), 174–215.

Solli, M., & Lenz, R. (2009). Color harmony for image indexing. En 2009 IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops, ICCV Workshops 2009 (pp. 1885–1892). <http://doi.org/10.1109/ICCVW.2009.5457512>

Sun, L., Yamasaki, T., & Aizawa, K. (2015). Relationship Between Visual Complexity and Aesthetics: Application to Beauty Prediction of Photos. En *Computer Vision - ECCV 2014 Workshops* (Vol. 8925, pp. 20–34). <http://doi.org/10.1007/978-3-319-16199-0>

Technology, M. I. of. (2002). Vision Texture. Recuperado el 14 de abril de 2018, a partir de <http://vismod.media.mit.edu/vismod/imagery/VisionTexture/vistex.html>

Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600–612. <http://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>

White, S. J., Hirotsu, M., & Liversedge, S. P. (2012). Eye movement behaviour during reading of Japanese sentences: Effects of word length and visual complexity. *Reading and Writing*, 25(5), 981–1006. <http://doi.org/10.1007/s11145-010-9289-0>

Yaghmaee, F., & Jamzad, M. (2010). Estimating watermarking capacity in gray scale images based on image complexity. *Eurasip Journal on Advances in Signal Processing*, 2010, 1–9. <http://doi.org/10.1155/2010/851920>

Yoon, K. J., & Kweon, I. S. (2001). Color image segmentation considering the human sensitivity for color pattern variations. En *Photonics Boston, SPIE*, Page (s) (Vol. 4572, pp. 269–278). <http://doi.org/10.1117/12.444191>

Notas biográficas



Luis Madrid Herrera. Obtuvo el grado de Ingeniero en Mecatrónica del Instituto Tecnológico Superior de Nuevo Casas Grandes en 2015 y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Chihuahua en 2018. Actualmente, es estudiante de Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Chihuahua.

Su investigación es en el área de procesamiento digital de señales e imágenes, enfocado a complejidad de imágenes e interfaces cerebro computadora.



Mario Ignacio Chacón Murguía. (M'86–SM'04) obtuvo el grado de Ingeniero Industrial en Electrónica, 1982, y el grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica, en 1985 del Instituto Tecnológico de Chihuahua, México, y el grado de Doctor en Ciencias, 1998, de la Universidad Estatal de Nuevo México, EEUU. Ha desarrollado varios proyectos para varias compañías.

Actualmente trabaja como Profesor Investigador en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Ha publicado más de 175 trabajos y publicado 3 libros. Su investigación actual incluye Visión por Computadora y procesamiento de imágenes y señales usando Inteligencia Computacional. El Dr. Chacón es miembro Senior de la IEEE, y miembro de las sociedades IEEE; Inteligencia computacional, Procesamiento Digital de Señales y Miembro del SNI en México.



Juan Alberto Ramírez Quintana. Recibió los grados de ingeniería (2004), maestría (2007) y doctorado (2014) en ingeniería electrónica del Instituto Tecnológico de Chihuahua, México. Actualmente trabaja como profesor-investigador en el Instituto Tecnológico de Chihuahua. Sus áreas de interés son visión por computadora, procesamiento de señales, percepción

visual, inteligencia computacional. El Dr. Ramírez es miembro del Sistema Nacional de Investigadores de México.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.

Recibido 11 Sep 2018
Aceptado 29 Sep 2018

ReCIBE, Año 7 No. 2, Noviembre 2018

Algoritmo para Transmisión de Información Segura en Dispositivos NFC

Algorithm for secure information transmission in NFC devices

Héctor Caballero Hernández¹
hcaballero240@profesor.uaemex.mx

Vianney Muñoz Jiménez¹
vmunozj@uaemex.mx

Marco A. Ramos Corchado¹
maramosc@uaemex.mx

Marcelo Romero Huertas¹
mromeroh@uaemex.mx

¹Dept. Posgrado en Ciencias de la Ingeniería
Universidad Autónoma del Estado de México, México.

Resumen: En este artículo se presenta un nuevo algoritmo para la transmisión de información segura en dispositivos NFC (Near Field Communication), debido a la facilidad de uso de esta tecnología, se han desarrollado aplicaciones para la adquisición de bienes y servicios, así como implementaciones de redes de sensores en ecosistemas naturales, aplicaciones médicas, entre otras. Por lo tanto, es de gran importancia implementar mecanismos de seguridad que permitan el resguardo de información transmitida vía NFC. El algoritmo que se presenta, manipula técnicas de esteganografía combinadas con técnicas de criptografía para garantizar la transmisión de información segura en los dispositivos NFC.

Palabras clave: Criptografía, esteganografía, Vernam, Arduino, matrices.

Abstract: This article presents a new algorithm for the transmission of secure information in NFC (Near Field Communication) devices, due to the ease use of this technology, applications have been developed for the acquisition of goods and services, as well as network implementations of sensors in natural ecosystems, medical applications, among others. Therefore, it is of great importance for implement security mechanisms that allow the protection of information transmitted via NFC. The algorithm presented consists of manipulating steganography techniques combined with cryptography techniques guarantee the transmission of secure data in NFC devices.

Keywords: Cryptography, steganography, Vernam, Arduino, matrix.

1. Introducción

El uso de estándares inalámbricos permite la comunicación entre dispositivos electrónicos para facilitar las actividades humanas en distintos ámbitos (Coskun, Ok & Ozdenizci, 2012). Hoy en día se cuenta con una gran cantidad de estándares para la transmisión inalámbrica de datos y con ello atender necesidades específicas, tales como: alta velocidad de transferencia de datos en corta o larga distancia, con o sin prioridad al consumo energético, transmisión segura de datos, entre otras.

Una de las aplicaciones específicas para la transmisión de datos en corta distancia es NFC (*Near Field Communication*), esta tecnología permite el envío y recepción de información en distancias cortas con bajas tasas de datos, lo cual la hace ideal para transmitir información en aplicaciones de comercios, medicina, lectura de códigos, etc. Debido a su concepción original la tecnología NFC no fue pensada para soportar de forma nativa algún protocolo de seguridad, lo cual le hace susceptible a la manipulación intencional de terceros o al robo de datos.

En este artículo se presenta una propuesta innovadora para la transmisión de información segura mediante la tecnología NFC, aplicando la combinación de técnicas de criptografía y esteganografía para garantizar la seguridad los datos que se transmiten canales de comunicación. Adicionalmente se propone la generación de un análisis léxico de las cadenas de texto que se transmitan con NFC para tarjetas de almacenamiento de datos.

1.1 Conceptos teóricos

NFC es una tecnología de comunicación tipo semi-dúplex de corto alcance, fue desarrollada por Philips y Sony en 2002 para transmisión de datos sin contacto, y esta basada en el acoplamiento inductivo entre dispositivos. NFC, generalmente se ha utilizado para sustituir códigos de barras, transferencia de datos en teléfonos inteligentes (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam & Cayirci, 2002), entre otros, así como formar redes de sensores como son WSN (*Wireless Sensor Networks*), y se encargan, por ejemplo de monitorear incendios forestales mediante una red inalámbrica de sensores y actuadores WSN (*Wireless Sensor and Actuator Network*). El estándar NFC maneja una frecuencia de transmisión de 13.56 MHz, con velocidades de transferencia de 106, 212, 424 y 848 Kbit/s y está especificado en la norma ISO/IEC 18090-3.

NFC normalmente maneja tres tipos de dispositivos, estos son: teléfonos inteligentes, etiquetas (*tags*) y lectores, los cuales cumplen con tres tipos de funcionamiento: lector/escritor, *peer-to-peer* y emulación de tarjeta. La Figura 1 ilustra los tres modos de transmisión (funcionamiento) del NFC (Coskun, Ok &

Ozdenizci, 2013), resaltando que el último modo de funcionamiento consiste en establecer comunicación entre un teléfono inteligente y un lector NFC.

La tecnología NFC incorpora los modos de comunicación activo y pasivo, en el primero, ambos dispositivos usan su propia energía para generar un campo de Radio Frecuencia (RF) para transmisión de datos, en el segundo modo de comunicación, el primer dispositivo inicia generando el campo RF, mientras que el segundo dispositivo hace uso de la energía que ya esta generada por el primer dispositivo (ECMA, 2018).

La técnica de modulación empleada en un dispositivo activo o pasivo es ASK (*Amplitude Shift Keying*) con codificación Manchester o Miller. Algunos de los sistemas de codificación que se emplean además de ASK son: sin retorno a cero (NRZ-L) y PSK (*Phase Shift Keying*) (Yi & Saniie, 2013).

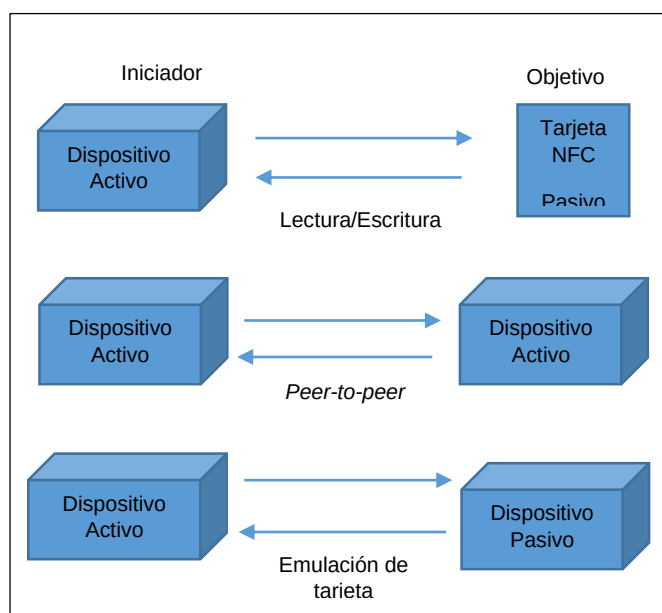


Figura 1. Modos de transmisión de NFC.

Para garantizar la transmisión de información de forma segura, en telecomunicaciones generalmente se emplean técnicas de criptografía y esteganografía. La esteganografía se define como un conjunto de técnicas para ocultar la información. Los elementos más importantes que se utilizan en esteganografía son: el objeto de cubierta, el estego-objeto y el objeto a ocultar. El objeto de cubierta es el medio en el que se embeberá la información a transmitir. El estego-objeto, se obtiene al combinar el objeto de cubierta con el mensaje oculto y finalmente, el objeto a transmitir que representa la información que debe viajar sin ser descubierta (Choudry & Wanjari, 2015).

En el área de la esteganografía, se utilizan técnicas o métodos en el dominio del espacio y frecuencial. Los métodos espaciales son responsables de generar modificaciones sobre los bits del objeto de cubierta para incrustar el objeto a transmitir (la información) y así dar origen al estego-objeto. A continuación se enlistan las técnicas más empleadas de esteganografía:

- Bit menos significativo (LSB, por sus siglas en inglés)
- Diferenciación del valor del píxel (PVD, por sus siglas en inglés)
- Método de incrustación de datos basado en los bordes (EBE, por sus siglas en inglés)

De la lista anterior, la técnica más explotada es la LSB, consiste en insertar información a través de la modificación del bit menos significativo que conforman el objeto de cubierta, con la finalidad de interferir lo menos posible con su calidad (Yi & Saniie, 2013). PVD es otra técnica ampliamente utilizada para esteganografía, permite seleccionar dos píxeles consecutivos para insertar datos, los datos insertados se obtienen cuando se determina la diferencia escalar entre dos píxeles consecutivos correspondientes a un área de borde o a una área lisa de una imagen (Dhruw & Tiwari, 2016).

Los métodos basados en el dominio de la frecuencia emplean transformaciones del espacio utilizando funciones tales como (Vaithyanathan, Karthikeyan, Anischin, Reddy, Priyanka & Abinaya, 2015), (Djebba, Ayad, Meraim & Hamam, 2012), (Di Laura, Pajuelo & Kemper, 2016):

- Técnica discreta de transformación de Fourier (DFT, por sus siglas en inglés)
- Técnica de transformación discreta del coseno (DCT, por sus siglas en inglés)
- Técnica de transformación discreta de Wavelet (DWT, por sus siglas en inglés)

Las técnicas de esteganografía actualmente se aplican para archivos de video (Choudry & Wanjari, 2015), comunicación de voz IP (Tian, Qin, Huang, Chen & Wang, 2015), transmisión de datos en teléfonos inteligentes (Chappleand & Solomon, 2005), entre otros.

Por otro lado, la criptografía es la rama de la seguridad informática con mayor auge en la actualidad, debido a que permite transmitir información de forma eficiente y eficaz, se basa en los principios de confiabilidad, autenticación, integridad de datos, no rechazo y control de acceso (Delfs & Helmut, 2007). La criptografía refiere a una serie de procesos para transformar los mensajes en otros, pero sin perder la lógica del mensaje, su etimología proviene de la palabra griega *Kryptos*, que significa oculto, y *graphikos*, que significa escribir.

En criptografía existe el texto claro, el cual representa al mensaje original y *cipher* es el algoritmo utilizado para cifrar el mensaje (Childs, 2000). Las técnicas criptográficas que actualmente son mas extendidas son:

AES (*Advanced Encryption Standard*). Es un estándar de encriptación de acceso público, se basa en sustituciones, permutaciones y transformaciones lineales, cada una ejecutada en bloques de datos de 16 bytes. Esas operaciones se repiten varias veces, y se denominan rondas. Durante cada ronda, una clave circular única se calcula a partir de la clave de cifrado y se incorpora en los cálculos (Dworkin, Barker, Nechvatal, Foti & Bassham, 2016).

RSA (*Rivest Shamir Adleman*). Trabaja con dos claves, una pública y una privada. Ambas claves trabajan como complementarias entre sí. La clave privada no puede calcularse a partir de la clave pública, ésta está generalmente disponible para el público (Rivest, Shamir & Adleman, 1978).

Tanto la criptografía como la esteganografía se pueden combinar para generar comunicación entre sistemas, ya sea utilizando técnicas espaciales como LSB en combinación con AES y RSA (Mishra & Tripathi, 2015), o basadas en el dominio de la frecuencia que combinen técnicas como DWT y RSA (Tripathi, Singh & Singh, 2016). Cualquiera de ellas puede ser aplicadas en archivos multimedia que se reproducen en computadoras y teléfonos inteligentes (Mazurczyk & Caviglione, 2014), con la finalidad de aumentar la complejidad matemática de la criptografía para evitar que la información sea entendida en forma clara (desde la perspectiva de un atacante) y la imperceptibilidad que provee la esteganografía, para evitar que un atacante se de cuenta de la existencia de un mensaje oculto en un objeto.

1.2 Revisión del estado del arte

El incremento de la aplicación de la tecnología NFC ha despertado el interés de investigadores para formular técnicas y métodos que garanticen la confiabilidad de este tipo de tecnología, a continuación se presentan investigaciones que han abordado con distintas técnicas la transmisión segura de información con dicha tecnología.

En Dragan (2015) se propone un nuevo modelo para incrementar la seguridad en dispositivos NFC mediante un sistema de encriptación, empleando un código de autenticación con SHA1 (*Secure Hash Algorithm 1*), AES y ECB (*Electronic Code Book*). Las pruebas se ejecutaron en el sistema operativo Android de forma exitosa.

En el trabajo de Sankpal, Mundhe, Kotwal, Machale & Malchikare (2017) se propone una metodología en la cual se genera un control de permisos de acceso, y posteriormente, la información se oculta embebiendo el código de acceso en

una fotografía que está almacenada en un teléfono celular. El hardware empleando es un smartphone con sistema operativo Android y un Arduino para el control de lectura de tarjetas NFC.

Por otro lado Kim (2016) propone un sistema de autenticación que utilice un algoritmo simétrico de cifrado, y un código de detección de modificaciones. El algoritmo de cifrado es AES, tanto el código de cifrado como el de autenticación se envían de forma independiente. El sistema propuesto utiliza un teléfono inteligente con un lector y grabador de tarjetas NFC y un estego-objeto para acceder a los datos grabados en la tarjeta. De forma similar en Muke, Shinde, Mistry & Jawalkar (2015) proponen un sistema de autenticación para acceso, empleando el ocultamiento de claves en imágenes a escala de gris mediante esteganografía en combinación de teléfonos inteligentes con la capacidad de manejar NFC.

Schürmann, Dechand & Wolf (2017) implementaron criptografía para la transmisión de información con NFC mediante Android, además de emplear criptografía de clave pública. Con la arquitectura de clave pública lograron diseñar un sistema al cual pudieran acceder un máximo de 100,000 usuarios, los cuales pueden enviar correos electrónicos, mensajes y administración de contraseñas a través de tarjetas NFC empleando un sello de anillo. El sistema propuesto fue evaluado en una empresa para medir la facilidad de configuración y el uso de las tarjetas NFC en un ambiente real con cuarenta participantes, los resultados obtenidos fueron exitosos.

Kavya, Pavithra, Rajaram, Vahini & Harini (2014) presentan un estudio sobre las vulnerabilidades de NFC, obteniendo como resultado los elementos del sistema que deben de analizarse, como es el caso del mecanismo de modulación de la onda que se genera en el dispositivo para aprovechar de forma satisfactoria las técnicas de cifrado.

Haselsteiner & Breitfub (2016) analizan los tipos de ataques que pueden ser efectivos para NFC, tales como: denegación de servicio, alteración de las codificaciones Miller y Manchester empleadas en ASK y captación de señal con otro dispositivo receptor. De acuerdo con su investigación, los ataques *man in the middle* no son efectivos debido a las cortas distancias que maneja esta tecnología y la velocidad a la que se envían los datos. Concluyen que es conveniente emplear técnicas de claves de autenticación, así como los mecanismos de emparejamiento y cifrado para establecer conexiones seguras que no demanden grandes cantidades de energía y procesamiento.

2. Metodología propuesta

En esta investigación se propone un nuevo algoritmo para transmisión de datos seguros para la tecnología NFC. El Algoritmo 1, consiste en generar una distribución de datos a través del reordenamiento del alfabeto extraído de las cadenas de texto que se deseen almacenar. Cada conjunto de símbolos únicos es almacenado en matrices cuadradas, las cuales se guardan en una memoria, cuyo acceso a sus localidades es a través del NFC. El Algoritmo 1 propuesto se especifica a continuación.

Algoritmo 1 Distribución de símbolos y reglas en memoria

1. Leer la cadena C a insertar
2. Extraer los símbolos de C
3. Introducir el texto en una matriz cuadrada cuyo número base se aproxime a la longitud de la cadena de texto $L(C)$
4. Generar un número de matrices igual a la cantidad de símbolo obtenidos de la cadena C
5. Insertar únicamente un sólo tipo de símbolo por matriz representado por 1 o 0
6. Generar el mapeo de matrices
7. Grabar cada matriz en la tarjeta NFC
8. Cifrar las reglas de extracción
9. Grabar las reglas de extracción
10. Finalizar secuencia

El proceso propuesto en el Algoritmo 1 permite distribuir la información extrayendo los símbolos de una cadena de texto como se observa a continuación en el ejemplo del Cuadro 1.

Cadena de texto: Prueba de inserción

Alfabeto obtenido: P.r.u.e.b.a, d.i.n.s.c.o.

Longitud de la cadena: 19

Cantidad de elementos del alfabeto: 14

Matriz cuadrada de 5x5: 25 celdas

Cuadro 1. Ejemplo de distribución de información.

De acuerdo con los datos que se presentan en el Cuadro 1, la información estará distribuida en una matriz cuadrada (primera fase), como se muestra en la Figura 2, siendo de 5x5 celdas, aunque las últimas localidades de la matriz no se empleen, una matriz de 4x4 no sería suficiente para almacenar los datos de la cadena.

P	r	u	e	b
a		d	e	
i	n	s	e	r
c	i	o	'	n

Figura 2. Distribución de información en una matriz cuadrada.

En la Figura 3 se puede observar que se forma una matriz por cada conjunto de símbolos únicos (por cada símbolo del alfabeto), para este ejemplo, el primer símbolo es “P” y se le asigna su matriz de 5x5, posteriormente se ha tomado el símbolo “r” y se asigna de igual forma su matriz de 5x5, lo mismo con el símbolo “u”. Observando el contenido de las matrices existe un sólo tipo de símbolo, además de que la referencia de ubicación de los símbolos con respecto a la matriz de la primera fase se mantiene.

P				

	r			
			r	

		u		

Figura 3. Distribución de datos en matrices.

La memoria de una tarjeta NFC se mapea en su totalidad para almacenar los símbolos en sus espacios correspondientes, y al momento de realizar su escritura, todos los símbolos son sustituidos por un sólo símbolo el cual puede ser “1” o “0” para evitar que se identifique el tipo de dato almacenado. La Figura 4 muestra gráficamente lo descrito anteriormente.

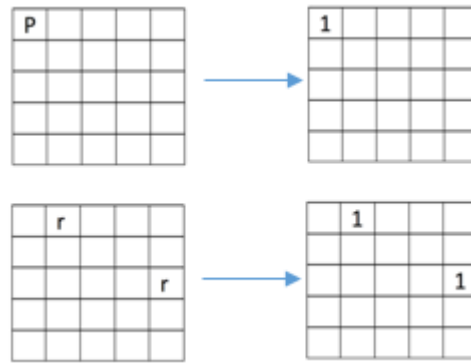


Figura 4. Asignación de valores para cada matriz.

Siguiendo las indicaciones del Algoritmo 1, se generan las reglas de extracción, las cuales son la representación de los datos almacenados, para ello se selecciona una zona de memoria de la tarjeta para almacenar los símbolos, estos deben de estar cifrados, y el orden de almacenamiento de los símbolos determina la secuencia de las matrices en que fueron insertadas. El dispositivo encargado de generar tanto el proceso de escritura y lectura de datos de la tarjeta deberá contener el alfabeto ASCII para interpretar los símbolos y su cifrado.

En esta propuesta se utiliza el cifrado (Vernam, 1926) para codificar el alfabeto, el cual consiste en convertir el mensaje original en binario y realizar una operación XOR con una palabra clave, la cual está también en binario, al final la cadena resultante es el mensaje cifrado. La palabra secreta es la cadena de identificación (UID) de la tarjeta NFC (todas las tarjetas cuentan con un número de identificación), además este identificador único, al ser una cadena alfanumérica, puede ser procesada por una operación de permutación, la cual este programada en el dispositivo encargado de procesar el Algoritmo 1, aumentando la complejidad de extracción de datos.

El proceso de recuperación de la información de la tarjeta NFC consiste en leer los datos en el área reservada para el alfabeto (AMR), posteriormente a la obtención de la cadena del área reservada (CAR) se procede a leer la cadena de identificación de la tarjeta (UID). A la cadena obtenida, se le aplica una función de permutación de datos (determinada por el usuario) y se realiza el proceso inverso de Vernam, para obtener los símbolos que se han empleado. Al obtener el alfabeto del mensaje original, se genera el mapeo de la memoria para reconstruir las matrices, las cuales están distribuidas a lo largo de la memoria, además de omitir la zona que está reservada para el alfabeto, una vez reconstruidas las matrices, se sustituyen los símbolos que contienen el símbolo correspondiente con base al alfabeto obtenido. Al finalizar el proceso se superponen las matrices y se extrae el texto, el cual fue distribuido como en el ejemplo de la Figura 2. En este proceso, la fase de esteganografía se puede

observar en la lectura de los símbolos que son representados por 0 o 1, dado que es la unidad mínima de representación en sistemas computacionales, y su impacto sobre la memoria de la tarjeta es mínima debido a que lo ocupan un bit, y se aplica el principio del bit menos significativo (LSB). La parte del cifrado se observa en la técnica Vernam, en donde el proceso de transformación del mensaje original es transformado por operaciones XOR. El proceso anteriormente descrito se ilustra en la Figura 5.

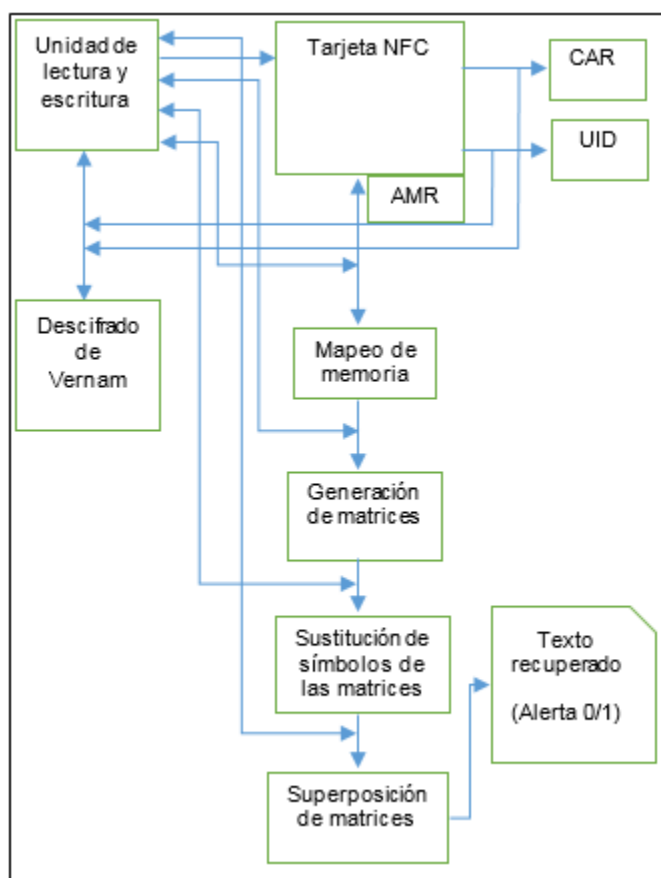


Figura 5. Proceso de extracción de datos de memoria.

Si el proceso de extracción no se concluye exitosamente, se envía una alerta indicando que existe modificación sobre los datos extraídos. Las condiciones de un fallo implican que los símbolos se superpongan en la misma posición al momento de generar el traslape de todas las matrices, o bien, cuando se detecta un símbolo distinto a 0 o 1.

Para esta propuesta el Algoritmo 1 se codificó en un Arduino Mega para corroborar su funcionamiento práctico. Al Arduino se le ha conectado un módulo PN532 para lectura y escritura de tarjetas NFC, este dispositivo puede realizar las acciones de escritura, lectura y verificación de integridad de los sectores de la memoria. La elección del Arduino para ejecutar las tareas de procesamiento

se debe a que el sistema sólo ejecutará operaciones de lectura y escritura sobre tarjetas NFC, además del bajo consumo energético que presenta (puede trabajar con baterías de 3v y 5v), además es una plataforma electrónica de bajo costo, multiplataforma y de código fuente abierto. El módulo PN532 es un hardware ampliamente utilizado para este tipo de tareas por lo tanto presenta fiabilidad para ejecutar operaciones de lectura y escritura de dispositivos NFC. La combinación de ambos dispositivos cumple con el objetivo de implementar el Algoritmo 1 de seguridad propuesto en este trabajo. El diagrama general de los componentes electrónicos se muestra en la Figura 6.

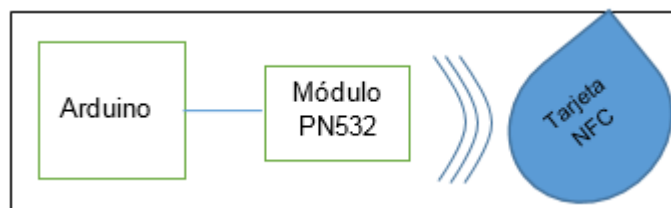


Figura 6. Diagrama de distribución de componentes.

3. Análisis de resultados y discusión

Para validar los resultados de la propuesta, el Algoritmo 1 se implementó en un Arduino Mega, el cual se programó mediante un equipo Macbook Air con sistema operativo macOS High Sierra versión 10.13.6. Las pruebas realizadas están orientadas a corroborar la eficacia del algoritmo propuesto, desde una perspectiva general, para la transmisión de datos seguros en tarjetas NFC. Los recursos empleados en la ejecución de las pruebas son:

- 1.- Cuatro tarjetas NFC de 1 KB.
- 2.- Módulo de grabado PN532.
- 3.- Arduino Mega

Todas las tarjetas fueron grabadas a una distancia de 3 cm para evitar pérdidas de datos o constantes repeticiones de grabaciones.

En la Figura 7 se muestra el prototipo implementado con el Arduino Mega y el lector PN532 en funcionamiento.

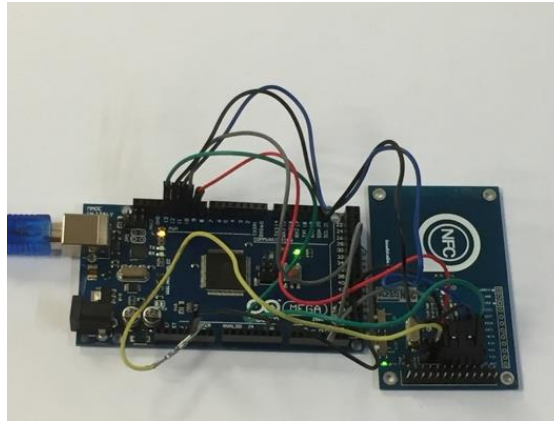


Figura 7. Prototipo de NFC en funcionamiento.

El proceso de validación de datos en las tarjetas NFC consiste en embeber cadenas con una longitud de 30 caracteres, para posteriormente validar el funcionamiento del Algoritmo 1. Las tarjetas NFC reciben las siguientes acciones.

- En la tarjeta 1, se inserta la cadena C1="Prueba de almacenamiento de 22", y no se modifica su contenido.
- En la tarjeta 2, se inserta la cadena C2="qwertyuiopasdfghjklñ'<zxcvbnm,", y se modifica al menos un bit en memoria.
- En la tarjeta 3, se inserta la cadena C3="Desbordamiento en memoria B450", y se modifican varios bits de forma aleatoria.
- En la tarjeta 4 y en C4 no se escribieron datos.

Conforme a las pruebas que se ejecutaron en proceso de validación, se realizó la Tabla 1 para presentar las observaciones sobre los resultados obtenidos.

Número de prueba	Acción	Resultado
1	Validar la cadena C1	El software reconoció correctamente la cadena grabada en la tarjeta NFC
2	Validar la cadena C2	El software detectó la modificación de la cadena
3	Validar la cadena C3	El software detectó la modificación de la cadena
4	Validar la cadena C4	Se retoma error de contenido, sin datos

Tabla 1. Resumen de resultados de las pruebas efectuadas.

Con base a los datos escritos en la Tabla 1, el software logró detectar correctamente las modificaciones cuando se alteraron las cadenas en las pruebas 2 y 3, mientras que en la cadena sin alteraciones (prueba 1) se validó correctamente. En la prueba 4, el software detectó que no existía contenido por analizar, por lo tanto indicó un mensaje controlado de “sin datos”. En base a las pruebas realizadas se pudieron reproducir los casos de cuando los datos son correctos, cuando los datos son corrompido por una entidad externa (prueba 2 y 3) de forma específica o aleatoria, así como el control de excepciones cuando no existen datos.

La combinación de los principios de esteganografía y criptografía propuestos en este trabajo, muestran de forma eficaz que el empleo de información expresada a través de la reducción de datos (representación por un sólo símbolo) para la validación de datos en la tecnología NFC, permite generar validaciones correctas sobre los datos que se han grabado en un medio de almacenamiento. Como puede observarse en la revisión literaria, las mayoría de los trabajos expresan que es necesario la implementación de criptografía para la transmisión de datos como es el caso de Dragan (2015), Kim (2016) y Schürmann, Dechand & Wolf (2017) para evitar el robo o manipulación de datos en texto plano, mientras que en Sankpal, Mundhe, Kotwal Machale & Malchikare (2017) y Muke, Shinde, Mistry & Jawalkar (2015) proponen enviar los datos ocultos en imágenes utilizando teléfonos inteligentes, para sistemas de autenticación. En esta propuesta el diseño se desarrolló para aplicarse, de forma general, para transmitir datos en NFC, debido a que no solo esta enfocada a aplicaciones de autenticación para acceso a datos o lugares físicos, si no que también para el intercambio de información entre dispositivos pares, aplicaciones comerciales, entre otras.

4. Conclusiones

De acuerdo con las pruebas realizadas en la sección III y los datos obtenidos, se ha observado que el reordenamiento de información propuesto en el Algoritmo 1 logró validar correctamente la cadena C1, la cual no contenía modificaciones, mientras tanto en C2 y C3 el software detectó que hubo cambios en la cadena debido a que no se logró formar correctamente la matriz final para recuperar la información. En la cuarta prueba se verificó correctamente que no existían datos grabados.

El cifrado Vernam permite incrementar el nivel de seguridad de los datos embebidos, debido a que la permutación ejecutada sobre la palabra clave impide conocerla si no se conoce el código fuente que se está ejecutando en el Arduino. Debido a las capacidades de procesamiento limitadas del Arduino Mega no se emplearon algoritmos avanzados como AES o RSA, dado que esto consume

una mayor cantidad de recursos en el procesador y memoria, por lo cual se determinó evitar retrasos en el accionar del hardware.

El Algoritmo 1, está adaptado para trabajar en el software de codificación de Arduino y en el posible tamaño de memoria de las tarjetas NFC, aunque también es posible su implementación en otras aplicaciones ya sea de esteganografía y/o criptografía.

La propuesta está enfocada a un uso general del algoritmo, lo cual es independiente al tipo de transacción para la que se aplique, como se mencionó en la revisión literaria la tecnología NFC es multipropósito, por consiguiente, el Algoritmo 1, presentado, se ha adaptado a esa característica y puede ser empleado en transacciones comerciales, médicas, de acceso a áreas restringidas, entre otras aplicaciones.

Es importante señalar que el Algoritmo de seguridad propuesto tiene la particularidad de que, cuando el tamaño del alfabeto se incrementa, surge la necesidad de abarcar mayor espacio en memoria. Por lo tanto, como trabajo a futuro se estudiará el cómo realizar solapamiento de matrices y así reducir la cantidad de matrices en el espacio físico. Por otro lado, se implementará el cifrado AES o RSA en un teléfono inteligente, lo cual brindará mayor seguridad, además de que el aprovechamiento del microprocesador del teléfono permitirá ejecutar las sentencias del código con mayor velocidad.

Agradecimientos

Agradecemos a CONACYT por la asignación de la beca con número de registro 445998 para estudios de posgrados.

Referencias

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. & Cayirci, E. (2002). A Survey on Sensor Networks. *Commun. Mag.* 102-114.

Al Husainy, M. A. F. (2012). Message Segmentation to Enhance the Security of LSB Image Steganography. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 57-62.

Chappleand, M. & Solomon, M. (2005). *Information Security Illuminated*. Primera edición. Estados Unidos: Jones and Bartlett Publishers.

Childs, J. R. (2000). *General Solution of the ADFGVX Cipher System*. Estados Unidos: Aegean Park Press.

Choudry, K. N. & Wanjari, A. (2015). A Survey Paper on Video Steganography. IJCSIT.

Coskun, V., Ok, K. & Ozdenizci, B. (2012). Near Field Communication (NFC): From Theory to Practice. Primera edición. UK: John Wiley and Sons.

Coskun, V., Ok, K. & Ozdenizci, B. (2013). Professional NFC Application Development for Android Primera edición. UK: John Wiley Sons, Wrox.

Delfs, D. & Helmut, H. (2007). Introduction to Cryptography: Principles and applications. Segunda edición. Springer & Business Media.

Dhruw, T. & Tiwari, D. N. (2016). Different Method used in Pixel Value Differencing Algorithm. IOSR Journal of Computer Engineering. 102–109.

Di Laura, C., Pajuelo, D., and Kemper, G. (2016). A novel steganography technique for SDTV H.264 AVC encoded video. International Journal of Digital Multimedia Broadcasting. 1–9.

Djebba, F., Ayad, B., Meraim, K. A. & Hamam, H. (2012). Comparative study of digital audio steganography techniques. EURASIP Journal on Audio, Speech, and Music Processing. 1–16.

Dragan, A. (2015). Encryption and Decryption on Messages on Android using NFC Tags. Journal of Mobile, Embedded and Distributed Systems. 130-135.

Dworkin, M. J., Barker, E. B., Nechvatal, R. J., Foti, J., Bassham, L. E., Roback, E. & Dray, J. F. (2016). Advance Encryption Standard (AES). NIST publications.

ECMA. (2018). Near Field Communication Interface and Protocol 1 (NFCIP-1). ECMA International. Disponible: <http://www.ecma-international.org/publications/standards/Ecma-340.htm>. (Consultado 5-9-2018).

Haselsteiner, E. & Breitfub, K. (2016). Security in Near Field Communication (NFC). Philips Semiconductors.

Kavya, S., Pavithra, K., Rajaram, S., Vahini, M. & Harini, N. (2014). Vulnerability Analysis and Security System For NFC-Enabled Mobile Phones. International Journal of Scientific and Technology Research.

Kim, H. (2016). A study on the Cryptographic Algorithm for NFC. Indian Journal of Science and Technology. 1-5.

Mazurczyk, W. & Caviglione, L. (2014), Steganography in Modern Smartphones and Mitigation Techniques. Polish National Science Center.

Mishra, B. & Tripathi, M. (2015). Information security through digital image Steganography using multilevel and Compression technique. International Research Journal of Computer Science IRJCS. 23-31.

Muke, S., Shinde, S., Mistry, C. & Jawalkar, P. (2015). NFC Hardware Device Based Access Control System using Information Hiding. International Journal of Innovative Research in electrical, electronics, Instrumentation and Control Engineering. 69-72.

Rivest, R., Shamir, A. & Adleman, L. (1978). A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. Communications of the ACM. 120-126.

Sankpal, L. J., Mundhe, S., Kotwal M., Machale, P. & Malchikare S. (2017). NFC Based Access Control System Using Image Hiding. International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering. 5352-5355.

Schürmann, D., Dechand, S. & Wolf, L. (2017) OpenKeychain: An Architecture for Cryptography with Smart Cards and NFC Ring son Android", ACM Interact Mob. Werable Ubiquitous Tech. 1-24.

Tian, H., Qin, J., Huang, Y., Chen, Y., Wang, T., Liu, J., & Cai, Y. (2015). Optimal matrix embedding for Voice-over-IP steganography. College of Computer Science and Technology. National Huaqiao University China. 33-43.

Tripathi, D., Singh, Y. K. & Singh, R. (2016). A survey on Image Steganography With its Related Technique and its Types. IJSART. 163-169.

Vaithiyanathan, V., Karthikeyan, B., Anischin Raj, M. M., Reddy, R., Priyanka, S. & Abinaya, K. (2015). An Amalgamated Approach of cryptography and steganography using IWT and Random pixel selection for secure transmission. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2352-2357.

Vernam, G. S. (1926). Cipher Printing Telegraph Systems For Secret Wire and Radio Telegraphic Communications. Journal of the IEEE. 109-115.

Yi, W. J. and Saniie, J. (2013). Smart Mobile System for Body Sensor Network. Estados Unidos. Proceedings of the IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT). 1-4.

Notas biográficas:

Héctor Caballero recibió el título de Ingeniero en Computación de la Universidad del Estado de México, México en 2011, y es estudiante de doctorado en Ciencias de la Ingeniería, en la Universidad del Estado de México, México. Sus temas de investigación son la esteganografía y la ciencia basada en lenguaje natural.

Vianney Muñoz es Profesor investigador en procesamiento de imágenes y visión computacional en la Universidad Autónoma del Estado de México. En 2009, recibió su doctorado de la Universidad Paris 13, Francia. Su trabajo de investigación es sobre visión computacional, procesamiento de imágenes, compresión de video, inteligencia artificial, entre otros.

Marco A. Ramos es Profesor investigador en Inteligencia Artificial y Realidad Virtual en la Universidad Autónoma del Estado de México. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Toulouse en 2007, Francia. Sus temas de investigación son: Vida artificial, técnicas de animación, sistemas distribuidos, agentes inteligentes, etc.

Marcelo Romero Huertas es Profesor investigador en ciencias de la computación en la Universidad Autónoma del Estado de México. Obtuvo su doctorado en la Universidad de York en el 2010, Reino Unido. Sus temas de investigación son: tratamiento de imágenes, reconocimiento de patrones, puntos antropométricos, etc.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.

*Recibido 13 Jun 2018
Aceptado 22 Oct 2018*

ReCIBE, Año 7 No. 2, Noviembre 2018

Aprendizaje Basado en Proyectos Dentro de un Curso Universitario de Interacción Humano Computadora

Learning Based on Projects Within a University Course of Human Computer Interaction

Guadalupe Toledo Toledo¹
gtoledo@sandunga.unistmo.edu.mx

J. Jesús Arellano Pimentel¹
jjap@sandunga.unistmo.edu.mx

Francisco Aguilar Acevedo¹
aguilar.afco@sandunga.unistmo.edu.mx

Edwin Williams Molina Rodríguez¹
williamsrdz495@gmail.com

¹Universidad del Istmo, Departamento de Ingeniería en Computación, México.

Resumen: Hablar de un software de calidad involucra tratar con dos disciplinas importantes, la ingeniería de software y la interacción humano computadora, esta segunda atiende el desarrollo bajo el acompañamiento de los usuarios finales, por lo que resulta atractivo integrar el aprendizaje basado en proyectos como seguimiento de un curso universitario, los cuales estarán diseñados a corto plazo resolviendo una problemática real y afín al estudiante con la intención que éste se comprometa en proporcionar su solución, tomando como guía curricular el diseño centrado en el usuario. La determinación de los puntos de control bajo esta metodología ha permitido relacionar con éxito los conceptos de la asignatura con proyectos que ofrezcan un beneficio a la sociedad, al cierre de las actividades y productos solicitados se espera que los estudiantes puedan desarrollar artículos de divulgación.

Palabras clave: Aprendizaje basado en proyectos, Interacción humano computadora, Diseño centrado en el usuario, Pruebas de usabilidad.

Abstract: Talking about quality software involves dealing with two important disciplines, software engineering and human computer interaction, this second deals with development under the guidance of end users, so it is attractive to integrate project-based learning as a follow-up to a university course, which will be designed in the short term solving a real problem and related to the student with the intention that this is committed to provide your solution, taking as a curriculum guide the user-centered design. The determination of the control points under this methodology has made it possible to successfully relate the concepts of the subject with projects that offer a benefit to society. At the closing of the activities and products requested, it is expected that students can develop dissemination articles.

Keywords: Project-based learning, human computer interaction, user-centered design, usability testing.

1. Introducción

La influencia que ha comenzado a adquirir la Interacción Humano Computadora (IHC) junto al de usabilidad para el desarrollo de aplicaciones efectivas, eficientes y que satisfacen el gusto de los usuarios, compactando con ello el concepto de calidad, ha abierto a debate la finalidad que le corresponde a la ingeniería de software como el marco conceptual más influyente en la construcción de aplicaciones que automatizan procesos y que a su vez son considerados de calidad.

Y es que, existe una diferencia trascendental entre estos dos enfoques respecto a la calidad del producto de software, por una parte la Ingeniería de Software según (S. Pressman, 2006) se encarga de cumplir requerimientos funcionales solicitados por un cliente, empleando las mejores prácticas para dar seguimiento al desarrollo y garantizar la ausencia de errores. No obstante, los clientes que son tratados en este formalismo no son necesariamente los mismos que utilizarán el sistema, sino son solo quienes indicarán sus necesidades y pagarán por el producto, para posteriormente implantar el sistema en su modelo de negocios e invertir en el proceso de capacitación que permita su aceptación por parte de sus empleados.

Sin embargo, la calidad en IHC radica en la idea de que el software debe estar definido bajo la participación integral del usuario final (persona quien realmente utilizará el sistema) en la construcción y determinación de cada fase del software (AENOR, 2000). Ya que, el criterio más importante para la aceptación del producto final reside en lograr interpretar el modelo mental de estos usuarios al realizar sus procesos en cotidianidad para posteriormente replicarlos en el software, logrando así su aceptación de manera inmediata, con muy poca o nula necesidad de capacitación.

Por tanto, la integración de ambas disciplinas es de relevancia para obtener productos de calidad, es decir, desde la aceptación del cliente con el que trata el equipo de desarrollo (persona que financia el producto y quién da los requerimientos) como la aceptación del usuario final. Por lo que la transmisión de ese conocimiento y su aclaración es de vital importancia durante la formación de profesionistas en el área de cómputo (quiénes se convertirán en desarrolladores de software).

Bajo esta consigna e independientemente del orden en que son atendidos estos tópicos dentro del marco curricular de las carreras universitarias afines, y debido a que la ingeniería de software es un rubro mejor documentado para su comprensión, se busca partir de atender la participación de la IHC en la integración de conceptos preliminares para la construcción del software, el cual se hace bajo la metodología del Diseño Centrado en el Usuario (DCU) (AENOR,

2000). Esta metodología atiende los factores relacionados con la usabilidad del software mediante la norma ISO 13407, así como la identificación de artefactos o herramientas para cubrir sus cuatro etapas.

Una estrategia útil para la incursión de estos conceptos dentro de un curso universitario se da bajo el esquema del Aprendizaje basado en proyectos (ABP) (Coria Arreola, 2011), ya que resulta trascendental involucrar a los estudiantes bajo un escenario real que les permita asociar su nuevo conocimiento con una experiencia afín a sus intereses así como también contribuir a la sociedad y/o escuela con soluciones de software de calidad.

El presente trabajo es una propuesta metodológica para el desarrollo de un curso de IHC, llevado a cabo en la Universidad del Istmo, ubicado en Santo Domingo Tehuantepec, en el estado de Oaxaca; tomando como eje principal el DCU y la estrategia ABP. Se espera que el estudiante adquiera los conocimientos elementales del enfoque centrado en el usuario para el desarrollo de software de calidad y a su vez desarrolle capacidades de emprendimiento para proponer soluciones que representen beneficios a la sociedad, logrando con ello obtener mejores competencias para su vida profesional.

2. Trabajo Relacionado

Incorporar a un curso de IHC los conceptos del DCU, implica consultar la norma ISO 13407 (AENOR, 2000). El DCU busca entender cuáles son las necesidades del usuario, lo que sienten y cómo piensan, usando herramientas específicas para poder obtener esta información en cada una de las etapas arriba señaladas. Sin embargo, la decisión de esas herramientas y actividades no son aspectos triviales que puedan encontrarse descritas fácilmente en el estado del arte y mucho menos desglosadas para un curso Universitario.

Se han encontrado cursos de especialización sobre IHC en instituciones de educación superior (véase Tabla 1). Sin embargo, la integración de la Metodología del DCU es evidente en algunas de ellas, y pese a eso resulta difícil identificar herramientas y/o mecanismos para cumplir con sus etapas, así como tampoco se logró identificar la estrategia de aprendizaje empleada, es decir, si estuviesen empleando ABP, éste no se describe claramente en sus programas del curso.

Institución	Asignatura	Duración	Temas Principales	Nivel académico
(Universidad de Chile, 2017)	Curso de experiencias de usuario en sitios web y soportes digitales	28 hrs en 7 sesiones	Metodología DCU, estrategias de recolección de requisitos, pruebas de usabilidad	Licenciatura
(Universidad Autónoma de Barcelona, 2017)	Curso de Diseño Centrado en el usuario	No lo específica	Metodología DCU, estrategias de recolección de requisitos, pruebas de usabilidad	Maestría
(Universidad de California en San Diego, 2017)	Human-Centered Design: an Introduction	Un mes	Metodología DCU, prototipado, evaluación heurística	Licenciatura
(Universidad de Minnesota, 2018)	User Interface Design	Cinco meses	Factores Humanos en el diseño del software, instrumentos para levantar requisitos, prototipado, evaluación de usabilidad	Licenciatura
(Universidad de Michigan, 2017)	User Experience (UX) Research and Design	Doce meses	Factores Humanos en el diseño del software, instrumentos para levantar requisitos, prototipado, evaluación de usabilidad	Licenciatura
(Universidad de Stanford, 2017)	Design Thinking for User Experience Design, Prototyping & Evaluation	Cuatro meses	Principios de Diseño, prototipado y evaluación.	Licenciatura
(Universidad de Uppsala, 2018)	Human-Computer Interaction	No lo específica	Psicología cognitiva, métodos de análisis de usuarios, definición de tareas, pruebas de usabilidad.	Maestría
(UNAM, 2016)	Computación Gráfica e interacción humano computadora	Seis meses	Diseño de interfaces	Licenciatura

Tabla 1. Universidades que ofrecen cursos de IHC. Fuente: Elaboración propia.

Para la presente investigación, se ha encontrado como una guía el trabajo de (Valero, 2008) quien a través de su tesis de pregrado denominado *Formalización del modelo para el Diseño de la Interacción Humano Computadora (MODIHC)* resume los artefactos mínimos a obtenerse para cumplir con el Diseño Centrado al Usuario guiado a través de la Norma ISO 13407, integrando también algunos instrumentos para la recolección de la información.

Sumado a ello, aplicar una estrategia basada en proyectos (ABP) para el seguimiento del DCU sobre un escenario de la vida real, permite vincular al

estudiante a instruirse en un ambiente de trabajo en equipo, colaborativo y que inclusive le permiten identificar participaciones multidisciplinarias para hallar la solución de una problemática, que en el mejor de los casos represente un beneficio para la sociedad.

Son diversos los autores que han aplicado esta estrategia como una solución didáctica durante el seguimiento de un curso escolar (véase Tabla 2). Incluso en (Astorga Vargas, Flores Rios, & Ibarra Esquer, 2015) se realiza el estudio a detalle del impacto del ABP como estrategia de enseñanza-aprendizaje en diferentes universidades de nuestro país. Sin embargo, su definición e integración dentro de un curso de IHC hasta el momento de esta publicación no ha podido ser identificada, por lo que su inclusión resulta atractiva para mejorar la experiencia de aprendizaje de los estudiantes.

Artículo	Institución	Asignatura
(Hernández, Heydrich, Rojas, & Hernández, 2010)	Universidad de la Habana	Ecología Microbiana
(Pérez, 2008a)	Universidad de Caracas	Tecnología de Materiales
(ITESM, 2005)	Tecnológico de Monterrey	Ecología Aplicada Avanzada
(Labra Gayo, Fernández Lanvin, Calvo Salvador, & Cernuda del Río, 2006)	Universidad de Oviedo	Programación Declarativa
(Aliane, 2006)	Universidad Europea de Madrid	Robótica
(Arellano-pimentel, Nieva-garcía, & Algreto-badillo, 2013)	Universidad del Istmo	Compiladores

Tabla 2. Instituciones que se han convertido en casos de éxito por emplear ABP como estrategia de enseñanza-aprendizaje. Fuente: Elaboración propia.

3. Marco Teórico

3.1 Diseño Centrado en el Usuario bajo la Norma ISO 13407

(Lorés, Granollers, & Lana, 2002) define al DCU como una metodología de diseño de software para desarrolladores y diseñadores que emerge de la IHC, ayudando esencialmente a construir aplicaciones que conozcan las necesidades de sus usuarios finales. Por tanto, es una estrategia para gestionar proyectos de creación, mejora e implementación de productos interactivos, de tal manera que se garantice el éxito del sistema resultante. El DCU no es un proceso genérico independiente del proyecto, sino que se encuentra fuertemente relacionado con los usuarios, las funcionalidades y el contexto (Domingo & Pera, 2010).

La Norma originalmente nombrada ISO 13407:1999 especifica las recomendaciones necesarias para la inclusión de la metodología del DCU en el ciclo de vida del desarrollo del software interactivo, entendiendo a la interactividad como el proceso para establecer comunicación entre hombre y computadora mediante una interfaz (Usability Net, 2006). Esta norma la cual es objeto de nuestro estudio, define al DCU como *“un método iterativo donde se enfatiza involucrar de forma activa al usuario y el entendimiento claro de los requerimientos de la tarea y el usuario”* (AENOR, 2000).

Su esquema general puede verse en la Figura 1.

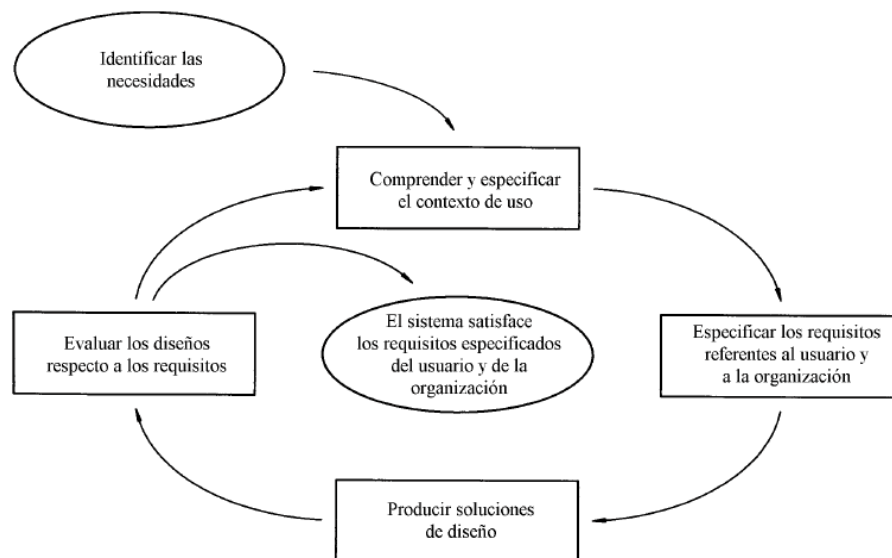


Figura 1. Metodología del Diseño Centrado en el Usuario. Fuente: ISO 13407 (AENOR, 2000)

La descripción de las etapas que la conforman se establece a continuación:

- **ETAPA 1 Comprensión y especificación del contexto de uso:** corresponde a la identificación de los usuarios (perfil del usuario), tareas (requerimientos funcionales), y entornos de organización y físicos que definen el contexto en el que se utilizará el sistema (aspectos que pueden reflejarse en el diseño de la interfaz).
- **ETAPA 2 Especificación de los requisitos referentes al usuario y a la organización:** representa a las características funcionales del sistema, requisitos legislativos, de seguridad, la cooperación y comunicación entre usuarios y su logística propia, reparto de las tareas entre usuarios, el diseño y organización del trabajo, el diseño de la interfaz y la distribución del puesto de trabajo. Es importante que se aclare qué actividades serán propias con ayuda de la tecnología y cuáles no.
- **ETAPA 3 Producir soluciones de diseño:** etapa en la que se establecen prototipos a partir de la información colectada en los puntos anteriores, la experiencia y los conocimientos de los desarrolladores.
- **ETAPA 4 Evaluar los diseños respecto a los requisitos:** se determinan los procedimientos de evaluación a emplear que permitirán contribuir a la mejora del diseño de la interfaz, determinar si se han alcanzado los objetivos del usuario y de la organización, etc.

Para una mejor comprensión de los productos que conforman la ETAPA 1 se sugiere la revisión de una norma complementaria denominada ISO 9241-11.

3.2 ISO 9241-11

La Norma ISO: 9241-11:1998 fue publicada en su versión en español por la *Asociación Española de Normalización y Certificación AENOR* la cual la nombró como Norma Española UNE-EN-ISO 9241-11, ésta *“explica cómo las medidas de los resultados obtenidos por el usuario y su propia satisfacción pueden utilizarse para determinar de qué manera afecta cualquier componente del sistema a su totalidad durante su funcionamiento”*. Una de sus principales aportaciones radica en su ANEXO A, en cual detalla un formato ejemplo para la definición del contexto de uso, correspondiente a uno de los entregables de la primera etapa del DCU, de igual manera en el ANEXO B se define a través de un ejemplo los indicadores para medir la usabilidad del software desarrollado, útil en la etapa de evaluación (AENOR, 1998).

3.3 Aprendizaje basado en proyectos

Surge del enfoque constructivista de Piaget, Dedwey, Bruner y Vigotsky, el cual sostiene que el estudiante “construye” nuevo conocimiento a partir de conocimientos actuales o previos, por lo que la manera idónea para promover construcciones mentales radica en permitirles a los estudiantes trabajar en escenarios o problemáticas reales y familiares para él, es decir, que representen un valor personal que lo ayude a comprometerse con su solución, permitiendo con ello adquirir aprendizaje significativo (Pérez, 2008a).

(Coria Arreola, 2011) señala algunas ventajas de integrar el ABP dentro de cursos universitarios, entre ellos se encuentran: Promueve que los estudiantes piensen y actúen con base en el diseño de un proyecto, elaborando un plan con estrategias definidas para dar solución a una interrogante, permite el aprender en la diversidad al trabajar en equipo, estimula el crecimiento emocional, intelectual y personal mediante experiencias directas con personas y estudiantes ubicados en diferentes contextos, aprenden a evaluar el trabajo de sus pares, a dar retroalimentación constructiva tanto para ellos mismos como para sus compañeros, alienta a los estudiantes a experimentar al realizar aprendizaje basado en descubrimientos, aprenden de sus errores a enfrentar y superar retos difíciles e inesperados.

En (ITESM, 2005) se sugiere una serie de pasos a seguir cuando se desea plantear un ABP, los cuales consisten en:

- a) **Antes de la planeación del proyecto:** se define la duración, complejidad, tecnología, alcances y personal de apoyo involucrado en el éxito de la dinámica.
- b) **Metas:** representan los objetivos académicos que se espera logren los alumnos al finalizar el proyecto.
- c) **Resultados esperados en los alumnos:** se identifican los objetivos específicos de aprendizaje en base a las metas establecidas.
- d) **Preguntas guía:** conducen al alumno hacia el logro de los objetivos del proyecto.
- e) **Productos:** son construcciones, presentaciones y exhibiciones realizadas durante el proyecto.
- f) **Actividades de Aprendizaje:** llevan a los alumnos a profundizar en los contenidos de conocimientos y a desarrollar actividades de frente a las necesidades del proyecto.
- g) **Apoyo instruccional:** representa a la instrucción y apoyo que permite guiar el aprendizaje de los alumnos y facilitar el desarrollo del proyecto.
- h) **El ambiente de aprendizaje:** se considera establecer las condiciones de trabajo de tal manera que estimule el interés de los alumnos por sus proyectos.

- i) **Identificación de recursos:** representan a los recursos de información y tecnológicos para que los alumnos logren desarrollar sus proyectos.

Bajo la integración de todas estas vertientes, se describe a continuación la propuesta metodológica empleada.

4. Propuesta Metodológica

Dentro de la Universidad del Istmo campus Tehuantepec, en la carrera de Ingeniería en Computación, se imparte durante el séptimo semestre la asignatura denominada “Interacción Humano Computadora” (IHC), la cual tiene como objetivo principal *“Proporcionar al estudiante las bases generales para el desarrollo de software centrado en el usuario, mostrando conocimiento en las áreas de usabilidad, desarrollo centrado al usuario y el desarrollo de interfaces.”* (Universidad del Istmo, 2016) y se encuentra conformado por 7 unidades temáticas: i) Introducción a la IHC, ii) Diseño Centrado en el Usuario, iii) Análisis de requerimientos de usuarios, iv) Diseño conceptual, v) Diseño e implementación, vi) Evaluación de usabilidad, vii) Panorama de investigación en IHC.

Como parte del contenido temático presente en la asignatura de IHC se identifica a la Unidad 2 como la columna vertebral del curso, debido a que es en ésta cuando se presenta la metodología que encausará la dinámica de trabajo durante el semestre, obteniéndose como producto final un software funcional o semifuncional, así, el seguimiento del proyecto deberá corresponder a la integración de los conceptos involucrados en las unidades 2-6 considerando el enfoque de ABP.

4.1 Alcance del Proyecto

Para la integración de la dinámica de ABP se decidió trabajar con proyectos a corto plazo, con una complejidad manejable para el estudiante en el transcurso de un semestre, de tal manera que esta dinámica le permita integrar conceptos asociados de la IHC, Ingeniería de Software, Programación, Bases de Datos, Diseño Gráfico, etc., empleando para ello toda la tecnología a su alcance y sujeto a las características propias del problema a resolver; se espera que los proyectos tengan un beneficio a la sociedad, de tal manera que sus usuarios finales sean seleccionados alrededor del contexto en el que viven los alumnos, teniendo finalmente el apoyo del docente adscrito a la asignatura, así como también de colaboradores en diseño gráfico y cómputo para retroalimentar sus avances.

Para este primer esfuerzo se considera la configuración de los productos entregables y los tiempos asociados como una Autonomía limitada por parte del usuario, debido a que el docente requiere llevar un control de los temas vistos y

solicitar los entregables en tiempos determinados ya que se corre el riesgo de no terminarlos sino se enmarca las actividades desde el inicio.

4.2 Metas

El desarrollo semestral de estos proyectos se realizó en el marco de que los estudiantes puedan cumplir las siguientes metas:

- Identificar la relación existente entre los estándares ISO 13406 Y 9241-11.
- Aplicar el DCU a un producto de software que resuelva una necesidad de la vida real.
- Integrar los conceptos atendidos en las unidades temáticas en el producto de software mientras el estudiante demuestra un incremento gradual de sus conocimientos y dominio de los términos durante sus discusiones.
- Identificar y aplicar pruebas de usabilidad con y sin la intervención del usuario.
- Presentar formalmente su solución al cierre del curso mediante una defensa justificada de su solución.

4.3 Resultados esperados en los alumnos

A continuación, en la Tabla 3 se describen algunos aspectos considerados como los resultados idóneos que serán adquiridos por los estudiantes durante la aplicación del ABP.

Conocimiento y desarrollo de habilidades	Resultados del proceso de trabajo
Al finalizar el proyecto, el alumno será capaz de: • Identificar áreas de oportunidad para desarrollo de software en que pueda integrar el DCU como marco de trabajo. • Relacionar e integrar en su léxico conceptos del área de IHC tales como: modelo mental, usuario final, perfil del usuario, metáfora, estilo de interacción, usabilidad, etc. • Aplicar estrategias de recolección de datos en el escenario de estudio para recabar información que les permita proponer sus soluciones de diseño. • Aplicar pruebas de usabilidad formales en función al número de usuarios y las variables que desee medir. • Desarrollar su capacidad para interactuar con el grupo de usuarios seleccionados.	Las competencias y actitudes que los alumnos aprenderán serán: • La capacidad de proporcionar críticas constructivas a los proyectos de sus compañeros. • Desarrollar una capacidad de compromiso y profesionalismo para entregar un software de calidad. • Un mejor dominio de sus conocimientos en IHC, así como de su dicción para justificar la solución de su problemática. • Desarrollará una mayor disposición para emprender retos semejantes en futuras asignaturas. • Descubrirá lo valioso de su labor, así como su participación activa en un grupo multidisciplinar.

Tabla 3. Resultados esperados en los alumnos bajo el ABP. Fuente: Elaboración propia.

4.4 Preguntas guía

A continuación se enlistan las preguntas de referencia que enmarcan el logro de las metas establecidas en el punto 4.2:

1. ¿Qué problemática social identificas en tu localidad que pueda ser resuelta mediante un software interactivo? Considera que deberá ser necesario la presencia de usuarios reales que darían uso a tu solución.
2. ¿Cuáles son los productos relevantes en cada fase del DCU?
3. ¿Qué perfil describiría a tus usuarios finales?
4. ¿Cómo es el contexto de uso del usuario?
5. Bajo observación ¿cómo describirías el modelo mental de tu usuario final?
6. ¿Cuáles son los requerimientos funcionales y no funcionales de tu solución?
7. ¿Cómo organizarás los requerimientos funcionales del software junto al perfil del usuario en un prototipo?
8. Identifica las tareas de usabilidad que emplearás al aplicar alguna de las técnicas de usabilidad vistas en clase (por ejemplo, *Thinking Aloud*).

4.5 Productos

En cada una de las fases del DCU se detallan las actividades que deberán cumplirse dejando a la tarea del alumno-desarrollador los métodos o estrategias a emplear para su realización. Por ejemplo, si bien el DCU señala dentro de la etapa 4 que deben efectuarse procedimientos de evaluación (véase sección 3.1), la norma no establece qué pruebas de usabilidad emplear, dejándolo a criterio del desarrollador en función a coste y tiempo.

Tratando de resolver esta situación y durante una revisión en los trabajos relacionados, se identificó la propuesta de (Valero, 2008) como aporte crucial para la identificación de requisitos elementales durante el seguimiento de las primeras 2 etapas del DCU. Para dar solución a dicho inconveniente, se integraron en un solo esquema de trabajo los productos relevantes que se deben cubrir en cada etapa, fusionando los aportes de la ISO 13407 (AENOR, 2000) y la ISO 9241-11 (norma que sugiere atributos para conformar el perfil del usuario) (AENOR, 1998), junto con la de (Valero, 2008) e integrando conceptos adicionales propios de los contenidos temáticos del curso de IHC. Además, se sugieren estrategias de recolección de información y herramientas de software que agilizan la captación de la información en el esquema de trabajo diseñado para el curso semestral, véase la Tabla 4.

A continuación se describen los entregables de las dos últimas etapas de la metodología por considerarse la principal aportación de esta investigación:

1. **PRUEBA DE USABILIDAD: REVISIÓN POR EXPERTOS:** Consiste en una sesión de retroalimentación entre profesores expertos en el área de diseño, de IHC y alumnos para que estos últimos puedan coleccionar las observaciones pertinentes y con ello mejorar sus propuestas iniciales (prototipos de baja-mediana gama), dicha acción permite reflejar a los miembros participantes en la dinámica como un grupo multidisciplinar, en el que cada rol contribuye en una sección particular de la solución. Como resultado de la dinámica, el alumno obtiene un listado de mejoras futuras que serán trabajadas sobre el prototipo. Mas sin embargo, son los alumnos quienes determinan las mejoras pertinentes a ser tomadas en cuenta.

Una vez efectuada las mejoras, se obtendría una segunda versión del prototipo en mediana gama, que será reportada a criterio del estudiante en su documentación. Posteriormente, se procederá a efectuar:

2. **PRUEBA DE USABILIDAD THINKING ALOUD:** el estudiante como parte de su aportación documental, describirá la técnica y definirá las tareas de usabilidad que desee probar en su prototipo, para posteriormente seleccionar a 2 usuarios potenciales que cubran el perfil de usuario descrito. Seguido de ello, se aplicará la prueba de usabilidad y se enlistarán los problemas de usabilidad detectados con la clasificación a la que pertenecen (ya sea fallo en la tarea -FT-, pérdida de funcionalidad -PF-, problema mayor -PM-, problema menor -PMEN-, molestia -MOL-) ya analizados previamente en clase, reportando sus resultados en un tabulador. La técnica de evaluación *Thinking Aloud* fue seleccionada para esta actividad ya que es una de las pruebas más sencillas dentro de los métodos que involucran al usuario, así como por su popularidad (Nielsen, 2012) debido a que el atributo que nos interesa medir es la facilidad de aprendizaje de la herramienta en el usuario final y dicha prueba es la adecuada para ello. Su aplicación y la forma de reportar los resultados de la dinámica provienen del autor Soren Lauesen (Lauesen, 2005) por su claridad al efectuarla.

Finalmente, el estudiante reportará la tercera versión de su software en un prototipo de alta gama con las mejoras aplicadas a partir de los problemas de usabilidad detectados. Para homogeneizar el seguimiento del proyecto se procedió a definir un esquema de trabajo a partir de entregables y tabuladores que resumiesen los aspectos principales de cada una de las etapas definidas en el DCU.

El Cierre del curso se verá representado por una ponencia formal por parte de los estudiantes quienes presentarán los aspectos relevantes de su software solución y los resultados de las pruebas de usabilidad empleadas a sus prototipos, obteniendo de ello una retroalimentación inmediata por parte de un

equipo de profesores pertenecientes a la plantilla de la carrera de Ingeniería en Computación para señalarles las mejoras y los trabajos futuros.

4.6 Actividades de Aprendizaje

Como puede comprobarse en la sección 4.5 algunas actividades de aprendizaje irán orientadas a la Planeación de su marco de trabajo en función a la delimitación del problema que se atenderá. Así como también se promoverá la Investigación sobre conceptos y estrategias de recolección de información, posteriormente el estudiante aplicará los conceptos en su proyecto y desarrollará prototipos de su solución que será sometido a pruebas para su mejora continua, finalizando con una presentación formal.

4.7 Apoyo Instruccional

A lo largo del desarrollo del curso de IHC se guiará el aprendizaje del grupo mediante sesiones diseñadas para exposición y discusión de temas por parte del docente, así como su intervención con escenarios de ejemplos apoyado de recursos digitales y/o herramientas de su interés. Se eligieron 3 puntos de control relevantes dentro de la dinámica de trabajo, el primero corresponde a la definición de los entregables de la unidad 2 y 3 de la Tabla 4, el segundo correspondería a los entregables y primer prototipo de las unidades 4, 5 y 6 junto con los resultados de la prueba con expertos, para posteriormente cerrar el proyecto con el tercer punto correspondiente a la versión mejorada del prototipo y los resultados de la prueba *Thinking Aloud* bajo una presentación formal de resultados.

4.8 Ambiente de Aprendizaje

En todo momento se busca promover al estudiante un entorno de motivación para mejorar la calidad de sus productos, a su vez, los proyectos serán diseñados para ser trabajados individualmente o en parejas dependiendo el tamaño del grupo. Durante las sesiones de clase, el grupo se distribuye de tal manera que visualmente tengan acceso a la proyección del material digital y de otros recursos de apoyo a la clase que sean pertinentes para debatir las ideas.

4.9 Identificación de Recursos

Desde la primera sesión de clases, los estudiantes tienen acceso a la bibliografía de la asignatura, de igual manera conforme se atienden tópicos se les proporcionan los recursos digitales necesarios para atenderlos en sus proyectos, además del acceso al proyector para sus presentaciones de avances pertenecientes a los puntos de control mencionados en la sección 4.7, cada estudiante hace uso de la tecnología disponible por él. El docente ocasionalmente proporciona plantillas Word prediseñadas que compactan en un

formato específico los aspectos a cubrir en cada fase del DCU, de tal manera que todos los proyectos presentan un formato de informe homogéneo.

Etapa del DCU	Unidad (es) que cubre	Productos generados	Estrategias de recolección y/o evaluación	Herramientas de Software para su realización
ETAPA 1: Comprensión y especificación del contexto de uso	Unidad 2	• Perfil del usuario • Características de las tareas que los usuarios deben realizar • Tabulador con factores a considerar en el ambiente de trabajo (organizacional, físico y social.) • Dispositivos de entrada, salida, entrada/salida involucrados • Estilos de interacción a emplear	• Técnica de observación • Técnica de entrevista	• Procesadores de texto bajo el formato de una plantilla preestablecida: Word, Open Office, etc.
ETAPA 2: Especificación de los requisitos referentes al usuario y a la organización	Unidad 3	• Características funcionales del sistema, reparto de tareas entre usuario y el sistema	• Técnica de observación • Técnica de entrevista	• Procesadores de texto bajo el formato de una plantilla preestablecida: Word, Open Office, etc.
ETAPA 3: Producir soluciones de diseño	Unidad 4 y 5	• Software similares • Metáforas de la interfaz • Principios de Gestalt • Prototipo de baja o mediana gama • Prototipo de mediana gama después de la 1era. Evaluación (Evaluación por expertos) • Prototipo de alta gama después de la 2da. Evaluación (<i>Thinking Aloud</i>)	• Investigación de trabajos relacionados (software similares)	• Proto.io (desarrollo de prototipos de baja-media gama) • Gamemaker (prototipo de alta gama) • Photoshop • Dreamweaver • Cualquier entorno de programación • Cualquier gestor de base de datos
ETAPA 4: Evaluar los diseños respecto a los requisitos	Unidad 6	• Prueba de revisión con expertos (para prototipo de baja o mediana gama) ◦ Lista de observaciones encontradas • Prueba de usabilidad "<i>Thinking Aloud</i>" ◦ Descripción de la técnica ◦ Tareas a evaluar ◦ Perfil de los usuarios reales a evaluar ◦ Gráficos del análisis de resultados ◦ Tabulador sobre los problemas detectados y clasificación de éstos en problemas de usabilidad ◦ Reporte de mejoras a la interfaz a partir de los problemas detectados • Video demostrativo de la aplicación de la prueba.	• Evaluación con expertos • <i>Thinking Aloud</i>	• Herramientas para tratamiento estadístico (Excel) • Aplicaciones para grabar audio y video • Procesadores de texto: Word, Open Office, etc.

Tabla 4. Propuesta sobre elementos a cubrir, estrategias de recolección y herramientas de software a utilizar en cada etapa del DCU. Fuente: Elaboración propia.

5. PUESTA EN PRÁCTICA DE LA ESTRATEGIA ABP

La dinámica consistió en proporcionarles a los estudiantes durante el primer mes del curso los conceptos preliminares concernientes a las Unidades 1 y 2. Llegado el segundo mes, se solicitó al estudiante una propuesta de su proyecto considerándose título, giro, y justificación, con la intención de brindarles el asesoramiento que permitiera acotarlos a requerimientos alcanzables en el periodo escolar, así como el de comprender sus propuestas (tal como lo estipula el ABP).

Uno de los proyectos más sobresalientes se denominó *Corrector Ortográfico*, propuesto por el estudiante Edwin Williams Molina Rodríguez en el ciclo escolar 2014-2015 perteneciente a la carrera de Ingeniería en Computación; el estudiante se inspiró debido a la necesidad de contar con una aplicación móvil que les permitiese a los niños practicar su ortografía, particularmente en el uso de la H, S, C, Z, etc. Para ello, identificó en su entorno a usuarios potenciales y le dio seguimiento bajo la estrategia planteada en la Tabla 4.

Aceptado el proyecto y durante ese mes, además de los temas atendidos en clase, se le fueron solicitando a los estudiantes integrar los conceptos vistos a través de los entregables sugeridos en la Etapa 1 de la Tabla 4, algunas de las cuales se encuentran ejemplificada por el proyecto *Corrector Ortográfico* en la Figura 2 y Tabla 5. Durante el tercer y cuarto mes, el estudiante recibió la presentación de los temas de las Unidades 3-5, y durante la atención de los temas, ellos procedieron a complementar su proyecto con los entregables correspondientes a las Etapas 2-3 de la Tabla 4, en la Figura 3 se presentan las metáforas aplicadas al proyecto *Corrector Ortográfico*, las cuales forman parte del diseño de la propuesta de interfaz que resuelve las necesidades de su usuario, así también cumplieron con el desarrollo de un prototipo de baja gama y la identificación de los principios de Gestalt inmersos en sus interfaces (véase la Figura 4a).



Nombre: Gael Gonzales Molina.

Sexo: Masculino

Edad: 10 años

Lugar de residencia: Salina cruz, Oaxaca

Ocupación: Estudiante de 5°.

Dispositivos favoritos: Celulares, Tablet, Reproductor, tv, Xbox, etc.

Juegos que le gusta: Juegos de plataforma. en una Tablet, con el objetivo de ganar el mayor puntaje posible y competir, basquetbol.

Habilidades: inteligente, observador, etc.

Modelo mental: En clase los ponen a escribir un texto, les encierran las palabras con un color rojo, hacen una plana y buscan el significado del mismo, usan libros para leer y comentan entre ellos mismo los errores.

Necesidades: El usuario necesita retroalimentación constante mientras asiste a clases para mejorar su ortografía, además de que lo ayuda al buen desempeño de sus notas, tener más claro lo que lee y aprender más rápido.

Actividades: Practica futbol, realiza tareas de investigaciones y recreativas por (medio del internet, revistas, libros), ve la tv, juega con sus amigos, etc.

Figura 2. Representación de la plantilla “Perfil de usuario” para la aplicación “Corrector Ortográfico”. Fuente: Alumno Edwin Williams Molina Rodríguez.

Comenzado el quinto mes de trabajo y atendiendo la Unidad 6, se presentó el prototipo de baja gama a un experto en diseño gráfico y al titular de la materia para retroalimentación sobre aspectos a mejorar. Como resultado de la dinámica, el estudiante generó la plantilla correspondiente a la Etapa 4 de la Tabla 4, en la cual incluye las pantallas de su interfaz con las mejoras implementadas, agregando colores a su prototipo y acabados semejantes a una pantalla de un sistema de cómputo o dispositivo móvil; obteniéndose con ello el prototipo de gama media (véase la Figura 4b). Dentro de este caso de estudio, se aplicó el estilo de interacción por manipulación directa.

Tarea	Características	Tiempo a realizar (máximo)
Instalar el software	Esta instalación se llevará en cada dispositivo a utilizar.	1 a 3 min.
Crear un usuario	Con los avances realizados para el mejor control de su desarrollo.	1 min.
Crear un avatar del mismo	Simular su interacción con el juego	Indefinido
Escoger un sexo (Multiusuario)	El usuario introducirá el sexo y de acuerdo al mismo se utilizarán las herramientas necesarias así como colores.	30 seg.
Seleccionar tema dentro del menú	El usuario podrá escoger el nivel o práctica.	5 seg.
Guardar cambios	El mismo sistema guardara cambios lapsos de tiempo	3 seg.
Realizar los ejercicios	El usuario tendrá variedad en formas y gráficos para los repasos.	Dependerá de la tarea (2-5) min.
Obtener recompensas por los diferentes ejercicios	El usuario podrá tener recompensas de las tareas realizadas (dependiendo el sexo).	Dependerá de la tarea
Calificar al sistema	Al término de cierre de la aplicación le desplegará una nota mostrando al usuario la manera de calificar al sistema con 4 opciones: mala, regular, buena, excelente	1 min.
Competir con otros usuarios	El usuario podrá competir con otros usuarios. (Desacuerdo a su nivel)	Dentro de 4-6 min.
Consultar marcador de desempeño	El usuario podrá ver a su avatar y su desempeño realizado	Indefinido

Tabla 5. Representación de la plantilla “Especificación de tareas funcionales” para la aplicación “Corrector Ortográfico”. Fuente: Alumno Edwin Williams Molina Rodríguez.

	Deshacer		Nuevo usuario
	Respuesta correcta		Ayuda
	Continuar		Jerarquía de temas y subtemas
	Jugar		Ir a menú de inicio

Figura 3. Metáforas de la aplicación “Corrector Ortográfico”. Fuente: Alumno Edwin Williams Molina Rodríguez.



a)



b)

Figura 4. Comparación entre a) prototipo de gama baja contra b) prototipo gama media de la aplicación “Corrector Ortográfico”. Fuente: Alumno Edwin Williams Molina Rodríguez.

Durante el mismo mes, el estudiante conoció sobre las pruebas de usabilidad, de tal manera que pudo aplicar la técnica “Thinking Aloud” a su propuesta, con los usuarios reales, dando como resultado la última iteración de la metodología del DCU, reportando con ello un formato semejante al descrito en la Etapa 4 de la Tabla 4 junto a la videograbación de la prueba. Durante el último mes se refinaron los prototipos, para convertirlos en uno de gama alta y se realizó una presentación ante integrantes de la carrera de ingeniería en computación a fin de poder obtener una calificación por la presentación de su trabajo, (véase Figura 5).



Figura 5. Presentación final de la aplicación “Corrector Ortográfico” ante profesores de la carrera. Fuente: Alumno Edwin Williams Molina Rodríguez.

6. Discusión

Como puede destacarse en la sección anterior, se logró adecuar a los tiempos del semestre las actividades propuesta por la estrategia ABP (ITESM, 2005) tomando en cuenta la distribución de las unidades temáticas del curso de IHC (véase Tabla 4). No obstante, las impresiones de las generaciones de estudiantes partícipes en esta estrategia de trabajo resultan de valiosa aportación para confirmar los aciertos del ABP y realizar mejoras futuras al curso.

Por lo tanto, se procedió a realizar una breve encuesta a estudiantes de las generaciones 2014-2015 y 2016-2017, algunos de ellos ya egresados y otros aún continúan su formación académica. Cabe mencionar que los grupos atendidos en la Universidad del Istmo son reducidos, contemplado una población total de 12 estudiantes entre ambas generaciones, de los cuales solo 10 pudieron establecer contacto para fines de la encuesta.

Con ayuda del instrumento utilizado, se logró coleccionar impresiones importantes sobre el punto de vista de dos generaciones que dieron uso a la estrategia ABP; entre algunas de las preguntas consultadas se solicitaba al estudiante proporcionar sus impresiones generales sobre el curso, así como las opiniones positivas y negativas encontradas en el transcurso del desarrollo del proyecto, cerrando con sugerencias de mejora y consultando algunos de los conceptos adquiridos en IHC que hasta ahora siguen aplicando en otras asignaturas o en su vida profesional según fuera su caso; las opiniones fueron congruentes y compartidas, a continuación se enlistan algunas de ellas.

6.1 Impresiones Generales al Utilizar la Estrategia de Trabajo

La mayoría de los estudiantes coincidieron en que los alcances de la asignatura eran tan grandes que creían difícil terminarlos y su satisfacción fue grata al percatarse que la metodología de trabajo que los guiaba aceleró la materialización de sus soluciones. A su vez, destacaron la aceptación de tener retroalimentación constante de sus proyectos por parte del docente y la satisfacción obtenida al trabajar con usuarios reales para proponer soluciones innovadoras y apegadas a sus necesidades que les permitieran la mejora de competencias tales como su dicción y redacción.

A continuación se comparte un fragmento proporcionado como respuesta por parte del alumno Carlos Antonio Ortega Vázquez perteneciente a la generación 2016-2017: *“La estrategia me pareció adecuada debido a que fue una gran manera de motivación, pues se logró hacer que mis habilidades pudieran desarrollarse, además, las metas puestas fueron alcanzadas y eso me motivó aún más, dado que me demostró que incluso puedo hacer más de lo que podría*

haber creído en un principio, con lo cual adquirí experiencia y empecé a confiar más en mí”.

6.2 Aspectos Negativos Identificados Durante el Desarrollo del Proyecto

Dentro de las impresiones encontradas por los estudiantes, la mayoría coincidió en sus dificultades para proponer soluciones de diseño, esto debido a que si deseaban incluir animaciones, la manera de plasmar eso dentro de un prototipo de baja gama era muy tedioso; de la misma manera, resultó de dificultad el diseño del instrumento para la recolección de los requisitos del software, esto debido a que nunca habían tenido contacto para tratar con usuarios reales, además de señalar la necesidad de ampliar tiempos para la entrega de los avances del proyecto y su respectivo refinamiento.

Dichas aseveraciones permitieron identificar algunos tiempos desaprovechados en el primer mes del curso escolar en los que se imparte solo teoría para considerar arrancar sus proyectos desde el comienzo del ciclo y así aprovechar al máximo la temporalidad disponible en futuras generaciones.

6.3 Aspectos Positivos Identificados Durante el Desarrollo del Proyecto

Los estudiantes demostraron aprobación con la idea de poner en práctica los conocimientos vistos en clase a partir de un proyecto de la vida real que les permitiera tener contacto con los usuarios que realmente le darían uso al software, lo cual se espera al aplicar la metodología ABP (Pérez, 2008), así como también determinaron como asertiva la inclusión de herramientas de software que sirviesen de apoyo para el desarrollo de los prototipos, junto con la dinámica de obtener retroalimentación por parte del usuario final.

Inclusive coincidieron en que el ambiente de trabajo promovió en mucho a aumentar su motivación y compromiso con el proyecto, así como también alimentó un entorno de sana competición entre compañeros que al final concluyó con excelentes resultados. A continuación se destacan al respecto unas breves líneas en la opinión del alumno Emmanuel Marcial Castillo de la generación 2016-2017: *“Fue muy bueno que el proyecto se basara en un caso real y que se le fuera dando seguimiento, hasta la presentación final con profesores expertos en diversas áreas (diseño, programación y HCI)”.*

Por su parte el alumno Edwin Williams Molina Rodríguez de la generación 2014-2015 menciona *“El alcance del curso fue grande, se adquieren muchos conocimientos tratando de resolver dificultades que se presentan al desarrollar el proyecto como saber el impacto que podía tener la aplicación y conocer*

personas que estuvieran interesadas”. Ambas opiniones realzan la ventaja destacada del ABP según (Coria Arreola, 2011) que se enfoca en el desarrollo de nuevas competencias y actitudes de emprendimiento.

En general, la retroalimentación constante de docentes en las áreas afines y usuarios finales representó una atmósfera motivacional que alentó al estudiante a emprender mejoras cada vez más aterrizadas en sus proyectos finales.

6.4 Sugerencias de Mejora para la Aplicación de la Estrategia en Sigüientes Generaciones

La mayoría de los estudiantes coincidieron en que mostrar proyectos afines de generaciones anteriores para ofrecer un primer alcance e impresión de lo esperado en el curso sería de gran ayuda, ya que contrarrestaría las primeras impresiones mencionadas en la sección 6.1 relacionadas a la imposibilidad de terminar el cometido, además de que mencionan les permitiría comprender el alcance del proyecto y a su vez proponer ideas innovadoras y no repetitivas a las ya realizadas por generaciones anteriores.

También indicaron que si bien el perfil del usuario ayuda a identificar la muestra poblacional a la que se dirige el proyecto solución, consideran de interés explorar la capacidad de intuitividad del software, incluyendo a sus evaluaciones a usuarios que carecieran de tener experiencias con la misma tecnología trabajada, esto para tener un refinamiento de sus prototipos aún más acertadas, no obstante, se es consciente que un curso de IHC por 6 meses es muy breve para poder adecuar todos los intereses de los estudiantes a un curso escolar, sin embargo, esta propuesta daría pie a investigaciones posteriores al curso con la intención de analizar a profundidad la calidad de su software y alentarlos a la escritura de artículos de investigación.

Además, insistieron en la necesidad de compactar el curso escolar a lapsos de teoría más breve para invertir mayor tiempo en el desarrollo de sus proyectos sin que el curso pierda la esencia de la estrategia, lo que actualmente se está intentando refinar.

6.5 Conceptos De IHC que aún Emplean en su Vida Escolar o Profesional

Una de las interrogantes más interesantes cuestionadas a este grupo de alumnos y al cual se le dio especial atención, consistió en conocer cuáles eran las nociones del curso que aún conservaban, considerando que un grupo de ellos ya son profesionistas y otros están próximamente por graduarse.

Las respuestas obtenidas fueron favorecedoras, ya que todos recordaron los conceptos esenciales y enfatizaron la importancia de aplicarlos durante la fase del desarrollo de un software en cualquier necesidad, ya sea académica o profesional, entre los conceptos más mencionados son: definición del perfil del usuario, estándares y reglas de diseño, diseño centrado en el usuario, usabilidad, el diseño iterativo, metáforas, estética (lo visual es muy importante), organización y jerarquías, la documentación del proyecto, adelantarse a posibles errores y prevenir que ocurran, principios de Gestalt.

Todos estos conceptos fueron atendidos con éxito durante las unidades plasmadas en la Tabla 4, muchos de ellos aplicadas implícita o explícitamente en el transcurso de sus proyectos, por lo que resulta satisfactorio saber de la trascendencia de estos conocimientos en estudiantes que han aprendido mediante la estrategia ABP. Además, se logró validar aquellas metas que se deseaban obtener al cierre del curso escolar, tal como se describen en la Tabla 3.

6.6 Evaluación del Estudiante Respecto a la Estrategia ABP

Por último, se solicitó a cada estudiante someter a una evaluación en escala del 1-10 su experiencia bajo la estrategia impartida en la clase (ABP) y su satisfacción al cierre de la misma respecto a los proyectos culminados, obteniéndose un promedio de 9.4 y 8.7 respectivamente, lo cual proporciona un margen aceptable para las primeras dos generaciones involucradas y motiva al docente en un proceso de mejora continua de su propuesta de clase. Se espera que en generaciones futuras y aplicadas las sugerencias de mejora proporcionadas por las anteriores generaciones, el promedio de aceptación durante la aplicación de la estrategia mejore y con ello se obtengan más y mejores proyectos innovadores.

7. Conclusiones

El presente trabajo desarrolla e implementa una metodología para el seguimiento de un curso de IHC enfocado al DCU enmarcado en una estrategia de ABP. Esta experiencia les permitió a los estudiantes identificar áreas de oportunidad en la vida real que pueden resolverse a través del desarrollo de software, logrando palpar el impacto de la tecnología en sus usuarios finales, que generalmente son familiares y amigos para quienes resuelven una necesidad de información.

La integración del ABP fue aceptado positivamente por los estudiantes quienes en todo momento mostraron una actitud participativa y comprometida con sus proyectos. Esto permitió un aprendizaje acorde a lo esperado ya que los estudiantes partícipes de la estrategia adquirieron conocimientos elementales

del enfoque centrado en el usuario para el desarrollo de software de calidad que, a decir de ellos mismos, aún recuerdan y aplican tanto en su vida académica como en su desempeño profesional. Además, un aspecto no menos relevante resultó la participación de expertos en el área de diseño brindándoles la confianza de sentirse inmersos en un grupo multidisciplinar y a su vez garantizar la obtención de un producto de calidad al finalizar las etapas de elaboración.

A su vez, como docente, se logró mapear los conceptos vistos en clase a través de una dinámica atractiva al estudiante con el cual se les consiguió promover el sentido de responsabilidad al tratar de resolver con ayuda computacional los temas escogidos, así como al trabajar y presentar sus avances en estricta formalidad a sus profesores y compañeros de clase.

Finalmente, el proceso de mejora seguido durante la evaluación de los prototipos, busca que los estudiantes puedan proponer artículos de divulgación que resuman su experiencia de aprendizaje y logren con ello obtener un producto de software de calidad para ser sometido a revistas de investigación arbitradas.

Referencias

AENOR. (1998). Requisitos ergonómicos para trabajos de oficina con pantallas de visualización de datos (PDV) basada en la norma UNE-EN ISO 9241-11.

AENOR. (2000). UNE EN ISO 13407 Procesos de diseño para sistemas interactivos centrados en el operador humano: Junio 2000 (ISO 13407:1999). España: AENOR. Retrieved from <https://books.google.com.mx/books?id=L3cjMQAACAAJ>

Aliane, N. (2006). Una Experiencia De Aprendizaje Basado En Proyecto En Una Asignatura De Robotica, 01-10.

Arellano-pimentel, J. J., Nieva-garcía, O., & Algreto-badillo, I. (2013). Aprendizaje Basado en Proyectos Utilizando L-Systems en un Curso de Compiladores. Programación Matemática y Software, 5(1), 81–96.

Astorga Vargas, A. M., Flores Rios, B. L., & Ibarra Esquer, J. E. (2015). Impacto del aprendizaje basado en proyectos implementado en una empresa escolar de Base Tecnológica dedicada al desarrollo de Software. ReCIBE, 4(4).

Coria Arreola, J. M. (2011). El aprendizaje por proyectos: una metodología diferente. E-FORMADORES, 5(2009), 1–8.

Domingo, M. G., & Pera, E. M. (2010). Diseño centrado en el usuario. Universitat Oberta de Catalunya. Retrieved from

[https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Informatica/Interaccion_persona_ordenedor/Interaccion_persona_ordenador_\(Modulo_3\).pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Informatica/Interaccion_persona_ordenedor/Interaccion_persona_ordenador_(Modulo_3).pdf)

Hernández, J. A., Heydrich, M., Rojas, M., & Hernández, A. (2010). Aprendizaje basado en proyectos: una experiencia de innovación docente. *Revista Universidad EAFIT*, 46(158), 11–21.

ITESM. (2005). *Las estrategias y técnicas didácticas en el rediseño*.

Labra Gayo, J. E., Fernández Lanvin, D., Calvo Salvador, J., & Cernuda del Río, A. (2006). Una Experiencia de aprendizaje basado en proyectos utilizando herramientas colaborativas de desarrollo de software libre. *XII Jornadas de Enseñanza Universitaria de La Informática*.

Lauesen, S. (2005). *User interface design: a software engineering perspective*. Pearson Education.

Lorés, J., Granollers, T., & Lana, S. (2002). *Introducción a la interacción persona-ordenador*. Universidad de Lleida.

Nielsen, J. (2012). *Thinking Aloud: The #1 Usability Tool*.

Pérez, M. (2008a). Aprendizaje basado en proyectos colaborativos. Una experiencia en educacion superior. *Laurus*, 14(28), 158–180. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=76111716009>

Pérez, M. (2008b). Aprendizaje basado en proyectos colaborativos. Una experiencia en educacion superior. *Laurus*, 14(28), 158–180.

S. Pressman, R. (2006). *Ingeniería del Software Un Enfoque Práctico*. Editorial Pais.

UNAM. (2016). *Computación Gráfica e Interacción Humano Computadora*. Retrieved May 9, 2018, from http://www.ingenieria.unam.mx/programas_academicos/licenciatura/Computacion/2016/asignaturas_computacion_2016.pdf

Universidad Autónoma de Barcelona. (2017). *Curso de diseño centrado en el usuario*. Retrieved January 24, 2018, from http://www.uab.cat/web/postgrado/curso-en-diseno-centrado-en-el-usuario/detalle-curso-1206597475768.html/param1-1793_es/param2-2006/

Universidad de California en San Diego. (2017). *Human-Centered Design: an Introduction*. Retrieved January 24, 2018, from <https://es.coursera.org/learn/human-computer-interaction>

Universidad de Chile. (2017). Curso diseño de experiencias de usuario en sitio web y soportes digitales. Retrieved January 1, 2018, from <http://www.uchile.cl/cursos/68077/curso-diseno-de-experiencias-de-usuario-en-sitio-web>

Universidad de Michigan. (2017). User Experience (UX) Research and Design. Retrieved May 8, 2018, from <https://www.edx.org/micromasters/michiganx-user-experience-ux-research-and-design>

Universidad de Minnesota. (2018). User Interface Design. Retrieved May 8, 2018, from <https://es.coursera.org/specializations/user-interface-design>

Universidad de Stanford. (2017). Design Thinking for User Experience Design, Prototyping & Evaluation. Retrieved May 9, 2018, from <http://hci.stanford.edu/courses/cs147/2017/au/>

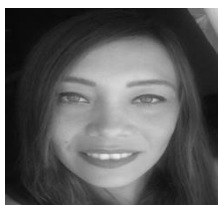
Universidad de Uppsala. (2018). Human-Computer Interaction. Retrieved May 9, 2018, from <http://www.uu.se/en/admissions/master/selma/Kurser/?kKod=1MD016&typ=1&id=>

Universidad del Istmo. (2016). Programa de Estudios Interacción Humano Computadora. Sto. Dgo. Tehuantepec, Oaxaca: Universidad del Istmo. Retrieved from [http://www.unistmo.edu.mx/~computacion/otros/temarios/2016/7_SEMESTRE/3072 Interacción Humano-Computadora.pdf](http://www.unistmo.edu.mx/~computacion/otros/temarios/2016/7_SEMESTRE/3072%20Interacci3n%20Humano-Computadora.pdf)

Usability Net. (2006). ISO 13407 Human centred design processes for interactive systems. Retrieved February 4, 2018, from <http://www.usabilitynet.org/tools/13407stds.htm>

Valero, G. (2008). Formalización del Modelo para el Diseño de la Interacción Humano-Computadora (MODIHC). Universidad de los Andes.

Notas biográficas:



Guadalupe Toledo Toledo es Ingeniera en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Tuxtepec, y Maestra en Computación Aplicada por parte del Laboratorio Nacional de Informática Avanzada. Actualmente es Profesor-Investigador de tiempo completo adscrito a la carrera de Ingeniería en Computación en la Universidad del Istmo. Sus áreas de interés se centran en el desarrollo de software y prototipos didácticos con aplicación en ingeniería y computación, aplicación de evaluaciones de

usabilidad a productos de software centrados en el usuario y la integración del cómputo aplicado en la solución de problemas multidisciplinarios.



J. Jesús Arellano Pimentel es Ingeniero en Sistemas Computacionales por el Instituto Tecnológico de Morelia en 2002 y Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica con opción en Sistemas Computacionales por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en 2005. Actualmente se desempeña como Profesor-Investigador de Tiempo Completo adscrito a la carrera de Ingeniería en Computación en la Universidad del Istmo campus Tehuantepec, Oaxaca, México. Sus áreas de interés incluyen: software educativo, realidad virtual, prototipos didácticos, compiladores, y robótica móvil.



Francisco Aguilar Acevedo es Ingeniero en Electrónica por la Universidad Tecnológica de la Mixteca y Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica por el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Actualmente es Profesor-Investigador de tiempo completo adscrito a la carrera de Ingeniería en Computación en la Universidad del Istmo, y miembro activo del cuerpo académico de Cómputo Aplicación. Sus áreas de interés incluyen: la inteligencia artificial, la robótica, los sistemas embebidos y la instrumentación electrónica.



Edwin Williams Molina Rodríguez es estudiante de la generación 2013-2018 de la carrera de Ingeniería en Computación en la Universidad del Istmo. Actualmente trabaja en un proyecto de investigación para desarrollar un prototipo capaz de generar energía a base de hidrógeno para la industria automotriz. Sus áreas de interés se encuentran orientadas hacia las tendencias tecnológicas en beneficio del planeta y el área de desarrollo humano.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.

Síntesis y Caracterización de Hidroxiapatita Sintética para la Preparación de Filmes de PLGA/HAp con Potencial Uso en Aplicaciones Biomédicas

Synthesis and Characterization of Synthetic Hydroxyapatite for the Preparation of PLGA/HAp Films with a Potential Use in Biomedical Applications

Susana Fragoso Angeles^{1,2}
susana.fragoso@uabc.edu.mx

Ricardo Vera-Graziano³
graziano@unam.mx

Graciela Lizeth Pérez González^{1,2}
perez.graciela@uabc.edu.mx

Ana Leticia Iglesias²
aiglesias@uabc.edu.mx

Luis Enrique Gómez Pineda^{1,2}
luis.gomez53@uabc.edu.mx

Luis Jesús Villarreal-Gómez^{1,2}
luis.villarreal@uabc.edu.mx

¹Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, México

²Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California, México

³Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Resumen: Los implantes de fijación de fracturas se emplean para resolver una fractura de hueso, actualmente hay una variedad de dispositivos como: agujas intramedulares, tachuelas y tornillos metálicos. Su función es estabilizar fragmentos de hueso en su sitio correcto durante su reparación ósea, para lograr una vascularización temprana. El objetivo de este estudio es sintetizar y caracterizar fisicoquímicamente hidroxapatita sintética para fabricar filmes de PLGA 50:50/HAp. Se utilizó la técnica de espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR) para buscar grupos funcionales principales. El análisis termogravimétrico (TGA) y la calorimetría diferencial de barrido (DSC) para evaluar el comportamiento de los filmes con respecto a la temperatura y caracterizar la superficie con microscopía electrónica de barrido (SEM). El espectro FTIR presenta señales de gran interés: se observa la zona aromática entre 1600 cm^{-1} -1400 cm^{-1} , señal característica de los aldehídos aromáticos ($\text{C}=\text{O}$) a los 1700 cm^{-1} , alquenos aromáticos ($\text{C}=\text{O}$) a los 1300 cm^{-1} con traslapes de señales $-\text{C}-\text{H}$, $=\text{C}-\text{H}$, adicional una cuarta señal muy ancha entre los 3400-2400 cm^{-1} asignada a $-\text{OH}$. Las micrografías de SEM, presentan homogeneidad en la superficie. El termograma TGA, se observa una pérdida de material a los 180°C del 5% aproximadamente y otro a 252°C del 10%. Finalmente, el termograma DSC, se observa alrededor de los 50 a 70°C, un ligero y amplio cambio nos permite creer que esa es la zona de transición vítrea del material, además se encontró un pico alrededor de los 52.07°C, donde se propone que ocurre la degradación de la formulación. Como trabajo futuro se realizarán pruebas de biocompatibilidad y degradación.

Palabras clave: Fracturas óseas; Filmes; PLGA/HAp; Caracterización físicoquímica.

Abstract: Fracture fixation implants are used to resolve a bone fracture, currently; there are a variety of devices such as intramedullary needles, tacks and, metal screws. Its function is to stabilize bone fragments in their correct place during their bone repair, to achieve an early vascularization. The objective of this study is to synthesize and physicochemically characterize of synthetic hydroxyapatite for the manufacturing of PLGA 50: 50 / Hap films. Through the Fourier transform infrared spectroscopy technique (FTIR) to look for main functional groups. Thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) to evaluate the behavior of films with respect to temperature and characterize the surface with scanning electron microscopy (SEM). The FTIR spectrum shows signs of great interest: the aromatic zone is observed between 1600 cm^{-1} -1400 cm^{-1} , characteristic signal of the aromatic aldehydes (C = O) at 1700 cm^{-1} , aromatic alkenes (C = O) at 1300 cm^{-1} with overlapping signals -CH, = CH, additional a fourth signal very wide between 3400-2400 cm^{-1} assigned to -OH. SEM micrographs show homogeneity on the surface. The TGA thermogram, a material loss is observed at 180 ° C of approximately 5% and another at 252 °C of 10%. Finally, the DSC thermogram is observed around 50 to 70 °C, a slight and wide change allows us to believe that this is the glass transition zone of the material, and a peak was found around 52.07 °C, where proposes that the degradation of the formulation occurs. As future work, biocompatibility and degradation tests will be carried out.

Key words: Bone fractures; Films; PLGA/HAp; Physicochemical characterization.

1. Introducción

Con el propósito de fijar una fractura de hueso para permitir su propia reparación, se han utilizado diversos dispositivos como placas, agujas intramedulares, tachuelas y tornillos metálicos. A dichos implantes se les conoce como “*sistemas de fijación de fracturas óseas*”, y sirven para estabilizar los fragmentos de hueso en su sitio correcto durante el proceso de reparación ósea, por ello la importancia de estabilizar el sitio de fractura para lograr una vascularización temprana (Carvalho et al., 2012). La búsqueda de formulaciones es de gran importancia para buscar una adecuada reabsorción y degradación en el tiempo requerido. Por lo anterior, las investigaciones en el área relacionada a la regeneración ósea han tomado interés en el uso de polímeros que pueden reabsorberse en el hueso y promover un proceso de regeneración ósea más rápida (Carvalho et al., 2012).

El poli (ácido láctico-co-glicólico) (PLGA) es un poliéster de largas cadenas poliméricas, que se compone de dos unidades monoméricas: poli (ácido láctico) (PLA) y el poli (ácido glicol) (PGA). Dependiendo de la proporción que se encuentren estos dos monómeros afecta las propiedades del polímero resultante (Danhier et al., 2012; Gasami et al., 2015; Cegnar et al., 2004; Dong & Feng, 2005; Yoo et al., 2000; Blanco et al., 2005; Rosas & Pedraz 2007; Mehrasa et al., 2015). Con respecto a los polímeros de PLGA 25:75, el material es amorfo. En la formulación PLGA 50:50, es muy hidrolítica, inestable y resistente a la degradación hidrolítica. El PLGA 50:50, se degrada alrededor de 1 o 2 meses, el 75-25 en 4 a 5 meses y el 85-15 en 5 a 6 meses (Maitz 2015). Generalmente, su estructura es amorfa, con una temperatura de transición vítrea entre 40 y 60°C. Presenta una baja solubilidad en agua, sin embargo, es posible disolverlo en solventes clorados tetrahidrofurano, acetona o acetato de etilo, aumentando considerablemente la viscosidad de este (Danhier et al., 2012, Gasami et al., 2015; Cegnar et al., 2004; Dong & Feng 2005; Yoo et al., 2000; Blanco et al., 2005; Rosas & Pedraz 2007).

La hidroxiapatita (HAp) por otro lado, es un compuesto inorgánico de fosfato de calcio, es el mayor componente inorgánico natural que se encuentra en los huesos, de amplio uso en el área biomédica como reemplazo de pequeñas porciones de hueso, relleno de cavidades en odontología, recubrimiento de superficies metálicas, refuerzo de materiales compuestos, entre otros (Swetha et al., 2010). La hidroxiapatita presenta características de biocompatibilidad, estabilidad química, osteoinducción y bioactividad (Cecen et al., 2016; Sánchez et al., 2016). Además, la HAp tiene la habilidad de formar enlaces químicos directamente con el tejido que rodea el área que la contenga (bioactiva), osteoinductiva, no tóxica, no inflamatoria, entre otros (Swetha et al., 2010). Por ello el gran interés de sintetizar matrices poliméricas porosas con relleno de hidroxiapatita no tóxicas y degradables (Durucan & Brown; 2001; Douglas et al., 2009; Higuaita et al., 2016).

Por otro lado, la formulación PLGA/HAP, se ha reportado diversos estudios, que se encuentran resumidos en la tabla 1, los cuales representan una clara tendencia de aplicación en la regeneración tisular ósea. Por otro lado, se han utilizado diferentes técnicas de síntesis y diferentes presentaciones. Se puede apreciar estrategias donde se presentan fibras, películas, comprimidos, recubrimientos, microesferas y compositos sinterizados. Todas, como factor común, su uso aplicaciones médicas. Ya que, en uno de nuestros trabajos previos se demostró, que esta formulación es biocompatible (Villarreal-Gómez, et al. 2014a; Villarreal-Gómez, et al. 2014b).

Presentación	Método de fabricación	Características	Aplicación	Referencias
Pastillas de polvos de PLGA y HAp	Mezcla de polvos en diferentes proporciones y compresión	Biodegradables, bioabsorbibles, bactericida (4 a 8 semanas)	Sistema de liberación de fármaco para gentamicina	Soriano & Evora 2000
Películas de PLGA cubierta con partículas de HAp	Película cast	Biocompatibles en condrocitos	Regeneración de cartílago	Lee et al., 2008
Nanofibras biom mineralizadas de PLGA-colágeno tipo I con n-HAp	Electrohilado y método de inmersión	mejora el comportamiento celular, la proliferación y fijación de las etapas celulares intermedias	Regeneración de hueso	Ngiam et al., 2009
Compositos biomorficos de PLGA-nHAp con estructura de microcaña		Elevada porosidad, excelente módulo de compresión, fijación, proliferación y diferenciación osteogénica de las células MC3T3-E1	Regeneración de hueso	Quian et al., 2014
Fibras de PLGA-HAp con Pluronic® F108		Alta hidrofobicidad en suero de fluidos corporales estimulados	Mejorar el comportamiento de las células mesenquimales en sueros de fluidos corporales	Thomas et al. 2014
Microesferas de HAp-PLGA	Método de evaporación emulsión-solvente	Material estable con HAp expuesto en la superficie	Regeneración de hueso	Hu et al., 2014
Nano agujas de hidroxiapatita (n-HAp) y rellenos de hidroxiapatita (w-HAp) en una matriz de PLGA		Cristalinización efectiva, además presenta un mayor efecto en el comportamiento de sus propiedades mecánicas.	Regeneración ósea	Liuyun et al., 2014
Nanofibras de PLHA-g-HAp	Electrohilado	Biocompatible en células endoteliales y cardíacas y en tejido subcutáneo en ratas Wistar	Regeneración dental y ósea	Villarreal-Gómez, et al. 2014a; Villarreal-Gómez, et al. 2014b
Compositos organosilados de PLGA-HAp	Mezcla y calcinación	Buenas propiedades mecánicas plásticas	Regeneración ósea	Naik et al., 2015
Andamios de PLGA-HAp			Regeneración ósea	Zhao et al., 2017

Tabla 1. Algunos estudios reportados de formulaciones PLGA-HAP

Con respecto a la aportación de este trabajo, el cual su enfoque este obtener una hidroxiapatita económica y de calidad para su futura aplicación en el área médica. Para la síntesis de HAp se utilizó un método económico llamado precipitación por vía húmeda, desarrollado por Xian y sus colaboradores en el 2010. Sin embargo, al final del procedimiento se agregó un último paso de sinterización a 1050 °C, que permitirá a la hidroxiapatita tener una morfología más homogénea para crear filmes más uniformes con el PLGA, además de una etapa extra de sonicación en la mezcla de los constituyentes para mejorar la distribución de los constituyentes.

2. Metodología

2.1 Síntesis de hidroxiapatita

Para la síntesis de la HAp, se utilizó un procedimiento denominado precipitación vía húmeda (Xian, 2010). Este método fue seleccionado porque la obtención de HAp presenta alto rendimiento, simplicidad y bajo costo a diferencia de otros métodos (Sequeda et al., 2012). Para la síntesis de la HAp, una reacción de 250 ml de 0.6 M de H_3PO_4 (80%, Fermont, México) con 18.56 gr de $Ca(OH)_2$ (Fermont, México) fue preparada y luego agitada a temperatura ambiente durante 7 días manteniendo el pH por encima de 11 mediante la adición de NaOH (Fermont, México).

Posterior a los 7 días, la mezcla fue centrifugada tres veces a 3000 rpm durante 5 minutos. Posteriormente, un sistema de filtración fue montado y la mezcla fue vertida en el embudo Buchner para su separación. Finalmente, el producto húmedo obtenido fue incubado en un horno seco a una temperatura de 80 °C durante 5 días. Parte de la HA obtenida durante el proceso de síntesis fue sinterizada a 1050 °C, durante dos horas con el objetivo de evaluar el efecto de la sinterización.

2.2. Elaboración de Film

En este trabajo se elaboró un film de PLGA/HAp, donde el objetivo es que los constituyentes estén distribuidos de manera homogénea. A través de un método de mezcla simple y sonicación. Primero, se disolvió el PLGA 50:50 (Sigma Aldrich) en cloroformo en agitación hasta su disolución para preparar una solución uniforme a una concentración al 65 % peso-volumen. Alternadamente, se preparó una solución de HAp en cloroformo y, posteriormente, se realizaron mezclas de soluciones PLGA/HAp con una proporción de 65 % PLGA con 35 % HAp.

La mezcla se dejó en agitación por 24 hrs a 40 °C y se expusieron a un proceso de sonicación, descrito en un reporte anterior (Alvarez-Suares, et al. 2017), donde el tiempo de sonicación fue dividido en intervalos de 10 segundos, con una amplitud de 100 utilizando el sonicador Qsonica Q700 modelo CL-334, posteriormente, la mezcla se vertió en una caja Petri con dimensiones 35 x 10 mm, después la solución vertida se encerró en una bolsa hermética dejando un espacio elevado y se dejó estáticamente hasta que el solvente se evaporará, una vez creado el filme, este se recolectó y se caracterizó.

2.3. Difracción de Rayos “X” (DRX)

El equipo empleado en este análisis fue un Bruker 8, con un método de polvo. Se utilizó un portamuestra metálico, se colocó un poco de muestra de tal manera que cubriera una superficie de 1 cm de largo por 3 mm de ancho. Posteriormente, se colocó la portamuestra dentro del equipo y se aseguró dentro de este. Después, se programó en el equipo las condiciones del análisis, se programó una velocidad entre 15 y 30 rpm, la lámpara que se utilizó fue de cobre (Cu) a 30 kV.

2.4. Infrarrojo con Transformación de Fourier (FTIR)

El espectro de absorción del infrarrojo fue colectado a 20 °C desde 4000 - 650 cm^{-1} para las muestras. Los espectros fueron grabados y almacenados en un espectrofotómetro Perkin Elmer spectrometer operating en el ATR (Attenuated Total Reflectance). Se realizaron 4 barridos a una resolución de 4 cm^{-1} (Hausberg & De Luca 1995).

2.5 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

En un portamuestras metálico, se colocó un poco de cinta adhesiva de grafito. Se recortó una pequeña porción de la muestra a analizar y se colocó sobre la cinta adhesiva. Después, estas muestras se recubrieron con una fina capa de oro por deposición asistida, a un voltaje alrededor de 1 kV por 8 minutos. Después de esto, las muestras se colocaron en una bandeja para microscopio electrónico y se capturaron imágenes en diferentes áreas a diferentes magnitudes de amplificación.

2.6 Análisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico se realizó midiendo el cambio de masa al incrementar la temperatura, la estabilidad térmica, y la temperatura máxima de degradación de todas las muestras. El ensayo se llevó a cabo utilizando un periodo de calentamiento de 10 °C/min de temperatura ambiente (± 20 °C) a 300 °C en un frasco de platino sin sellar utilizando una atmósfera de nitrógeno con un

flujo de 20 mL/min. El equipo utilizado fue un modelo Shimadzu TGA-50 (Hausberg & De Luca 1995).

2.7 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

Las muestras fueron caracterizadas utilizando el equipamiento de DSC modelo Shimadzu DSC-50 y fue programado a un calentamiento de temperatura ambiente ($\pm 20^\circ\text{C}$) hasta 150°C en un periodo $10^\circ\text{C}/\text{min}$ (primera corrida). La masa de las muestras que se analizaron varió entre los 5 a 10 mg. Al finalizar la corrida, el horno se enfrió con nitrógeno líquido hasta llegar a una temperatura de -20°C o -30°C (Hausberg & De Luca 1995).

3. Resultados y Discusiones

3.1 Difracción de Rayos “X”

La pureza y cristalinidad de la HAp sintetizada fueron evaluadas por DRX. Un diagrama de difracción fue obtenido gracias a la interacción de los rayos X con los polvos de HAp. Debido a que el diagrama de difracción generado es considerado como la huella dactilar de la fase cristalina que lo ha producido, fue posible identificar y determinar si el producto obtenido es realmente lo que esperamos. El diagrama de difracción obtenida fue graficado en función del ángulo 2θ contra intensidad. En la figura 1, se muestra el espectro de rayos X del polvo de HAp. Los cuatro primeros picos de mayor intensidad localizados entre la zona angular $20 < 2\theta < 60$ fueron asignados con un índice de Miller de 002, 211, 112, 300 respectivamente, índices que se le atribuye a la hidroxiapatita. El espectro generado fue comparado con la tarjeta JCPDS 09-432 (patrón DRX) comprobando que la muestra obtenida de HAp, por el método de precipitación vía húmeda, representan el patrón típico de dichos biocerámicos.

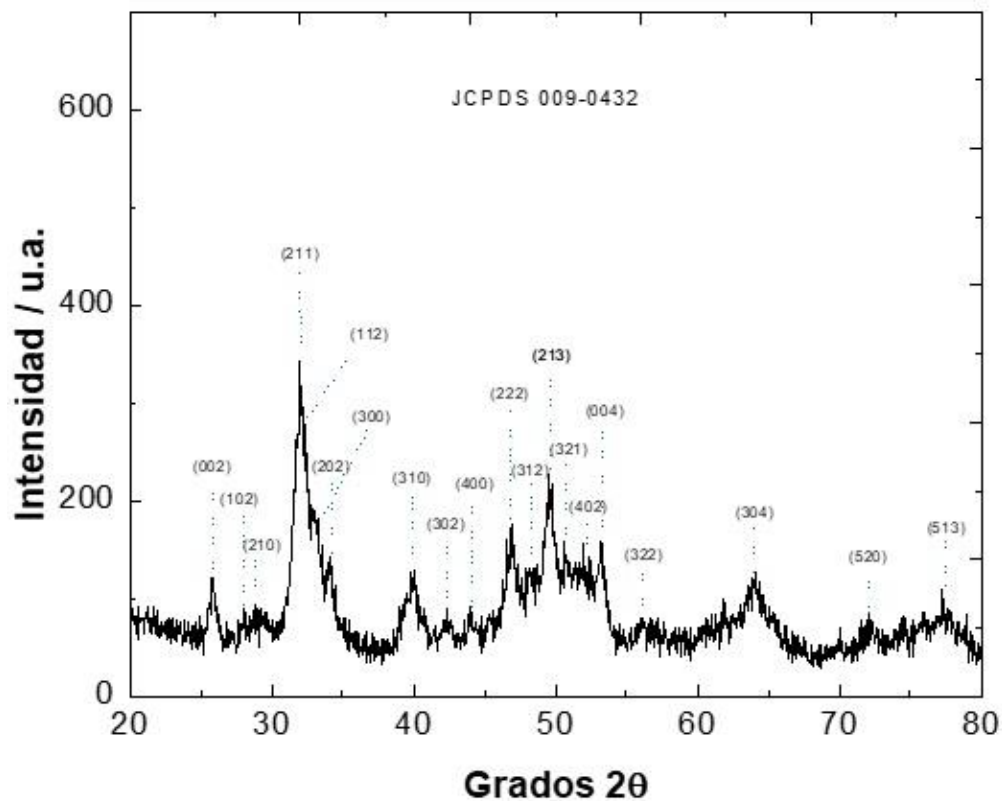


Figura 1. Espectro de Rayos X del polvo de Hidroxiapatita pura sintetizada por el método de precipitación vía húmeda

El análisis DRX de los polvos de HAp fabricados mediante precipitación vía húmeda generaron espectros como lo que se muestras en la figura 1. Al comparar estos espectros con el patrón de difracción de rayos X de la HAp calculados con los parámetros estructurales de Hughes et al. 2014, se observa un comportamiento muy similar a pesar que el patrón de Hughes presenta picos más estrechos y de mayor intensidad. El reconocimiento de las muestras en polvo de HAp fue comparado, además, con la tarjeta JCPDS 09-432 y ambos resultados comprobaron que las muestras obtenidas fueron HAp.

3.2 Espectroscopia Infrarroja de Fourier (FTIR).

El objetivo de este análisis es determinar la presencia de ambos reactivos en la muestra. Para el espectro de la figura 2, observamos 5 señales características de la estructura del PLGA. Alrededor de los $1765 - 1740 \text{ cm}^{-1}$ se asigna el pico a los enlaces $\text{C}=\text{O}$, mientras que para los enlaces $-\text{C}-\text{C}-\text{O}$ se asigna la señal

entre los 1300 - 1080 cm^{-1} . Para los enlaces del tipo éter $-\text{C}-\text{O}-\text{C}-$ aparece entre los 1085 - 1190 cm^{-1} . El grupo de estiramientos del $-\text{CH}$, $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$ del polímero se observa alrededor de los 3000 – 2900 cm^{-1} . A 1383 cm^{-1} se asigna al metilo ($-\text{CH}_3$) y a 1423.42 cm^{-1} al metileno ($-\text{CH}_2$). Finalmente, los picos que se observan alrededor de 869 cm^{-1} corresponden al enlace C-C. Entre 1500 – 1250 cm^{-1} se puede observar la deformación del enlace $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$; de 1350 - 1150 cm^{-1} se observan las vibraciones CH y CH_2 y entre 1300 – 1150 cm^{-1} el estiramiento del enlace éster $-\text{C}-\text{O}$ (Davachi et al., 2012; Alimohammadi et al., 2012; C. D'Avila et al., 2012; Upson et al., 2016).

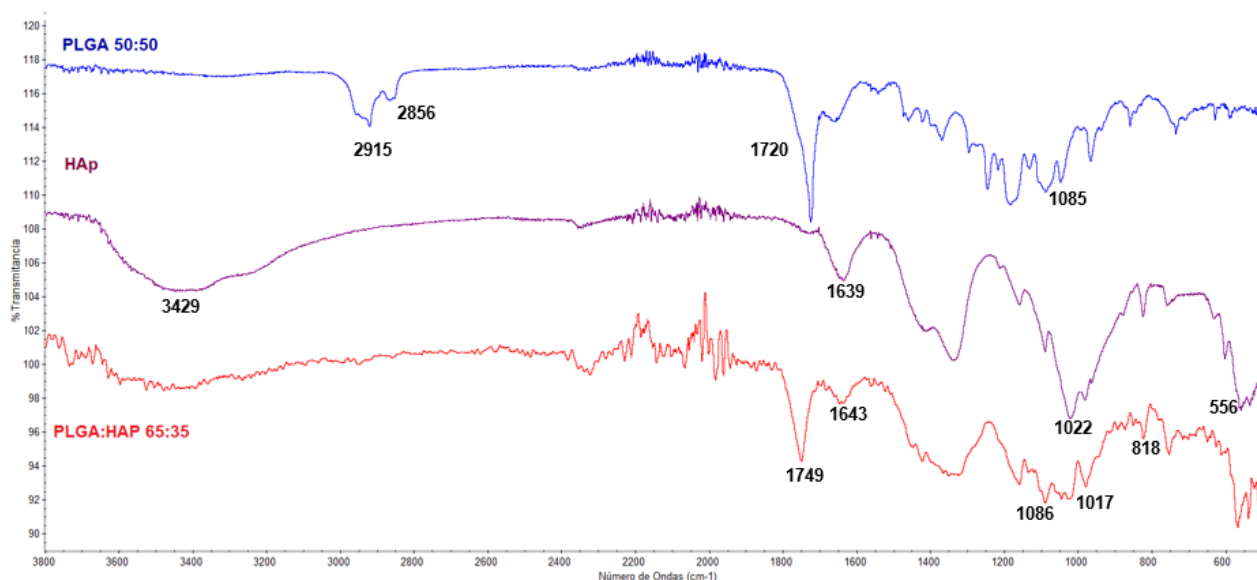


Figura 2. Espectroscopia FTIR: PLGA 50:50, Hidroxiapatita (HAp), PLGA: HAp 65:35

Referente a la hidroxiapatita (HAp), las vibraciones para el grupo PO_4^{3-} alrededor de los 1090 cm^{-1} y 1027 cm^{-1} así como también las bandas a 450 cm^{-1} , 800 cm^{-1} y 1100 cm^{-1} . Las señales que muestra el espectro a 3400 cm^{-1} corresponden a las vibraciones del grupo OH^- , sin embargo, también se puede observar en algunos espectros la presencia de una señal a 1600 cm^{-1} que corresponde a la flexión del OH^- por la rotación del agua libre (Maheshwari et al., 2014; Higuita et al., 2016). Las señales que aparecen a 550 cm^{-1} , 610 cm^{-1} y 900 cm^{-1} que son vibraciones atribuidas al grupo PO_4^{3-} y al $-\text{OH}$ de la parte cristalina de la hidroxiapatita (Higuita et al., 2016).

De las señales más representativas con cambios significativos para la muestra PLGA: HAp 65:35 se puede observar de 500 a 600 cm^{-1} para el grupo P-O, otras series de señales atribuidas a la unión entre PLGA y HAp, aparecen a 1632 cm^{-1} y 3000-3600 cm^{-1} (Ngiam et al., 2009; Zhao et al., 2017), dichas señales

son reportadas por diferentes investigadores, cabe mencionar que nuestras señales son consistentes con lo anterior, presentan señales anchas en las regiones indicadas, por lo que podemos decir que nuestro proceso fue satisfactorio.

3.3 Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

En un porta muestras metálico, se colocó un poco de cinta adhesiva de grafito. Se recortó una pequeña porción de la muestra a analizar y se colocó sobre la cinta adhesiva. Después, estas muestras se recubrieron con una fina capa de oro por deposición asistida, a un voltaje alrededor de 1 kV por 8 minutos. Después de esto, las muestras se colocaron en una bandeja para microscopio electrónico y se capturaron imágenes en diferentes áreas a diferentes magnitudes de amplificación.

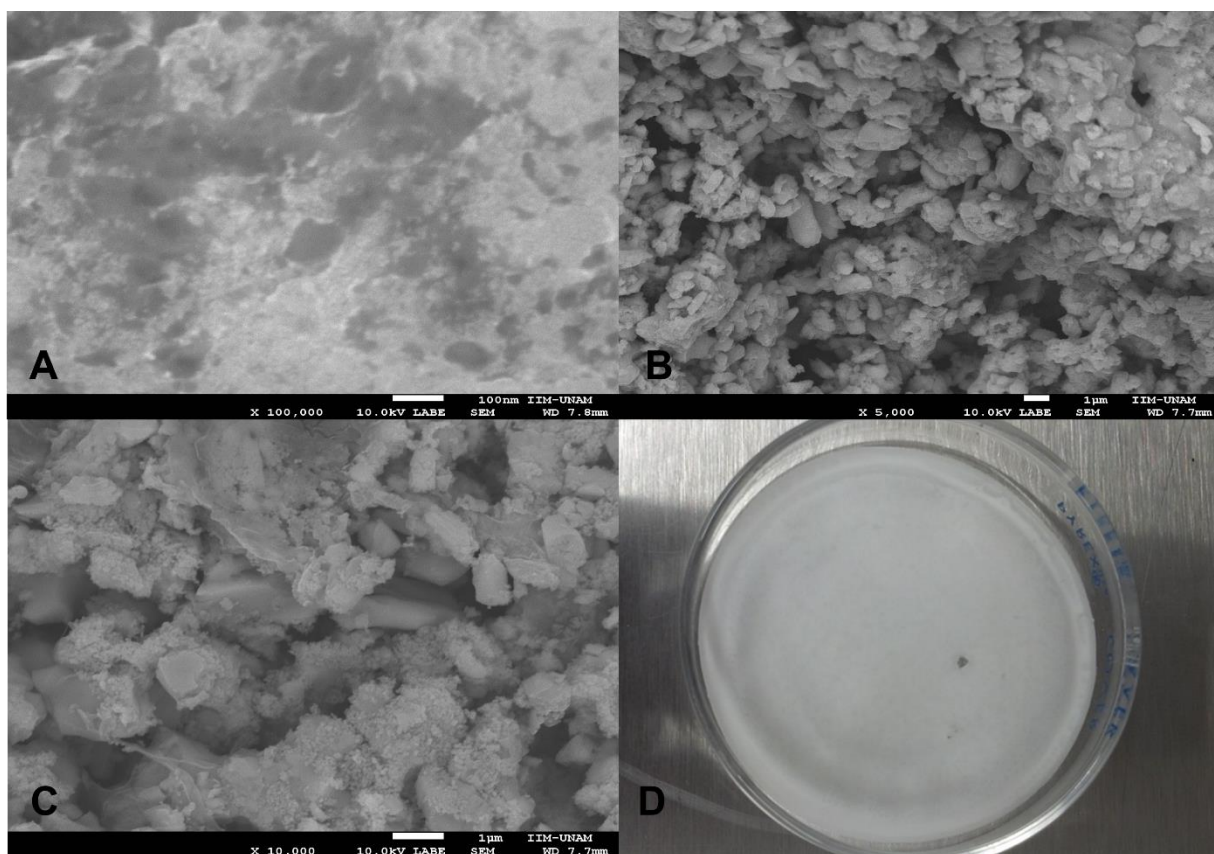


Figura 3. Microscopía electrónica de barrido: A) PLGA (100,000 x). B) Hidroxiapatita (5,000 x). C) PLGA/HAp 65:35 (10,000 x). D) Filme de PLGA/HA 65:35 (1 x).

En esta serie de micrografías, observamos el sistema PLGA, HAp, y el filme PLGA/HAp 65:35. En este sistema, se empleó un PLGA 50:50 del tipo amorfo, los films obtenidos fueron casi homogéneos en su totalidad, se observó una polimerización muy lenta, comparada con el PLGA cristalino. Esto último, afectó

a la distribución de hidroxiapatita dentro del polímero. En la micrografía SEM PLGA/HAp, observamos conglomerados de la hidroxiapatita, sin embargo, al apreciar el film a simple vista, observamos una distribución superficial con mayor homogeneidad. Igual que en las muestras anteriores, desconocemos como influye la hidroxiapatita en las propiedades mecánicas del material resultante por el momento.

El control de las propiedades de la superficie es muy importante para la buena adhesión celular. Entre los factores que impactan la efectividad de la superficie de un biomaterial es su humectabilidad y la topografía de la superficie (Biazar E et al., 2011). Se ha reportado, que la rugosidad es un factor importante en la adhesión celular, proponiendo que algunas estructuras rugosas tienen mejor comportamiento celular que los filmes convencionales (Biazar E et al., 2011; Hu X et al. 2011; Chang H-I and Wang Y. 2011).

La rugosidad entonces, junto con la humectabilidad y composición química de la superficie promueven o alteran la afinidad celular hacia esta. A pesar de que, en este trabajo, no se evaluó el grado de rugosidad en la superficie, puede apreciarse en nuestros filmes una superficie rugosa y funcionalizada con hidroxiapatita, la cual se ha reportado ampliamente con propiedades reabsorbibles, biocompatibles y osteoconductoras (Da Cunha M.R. et al. 2011; Khan W.S. et al. 2012; Xiao W. et al. 2013), por lo que nuestras muestras tienen potencial uso biomédico en hueso, el cual se evaluará en un trabajo futuro.

3.4 Análisis Termogravimétrico (ATG)

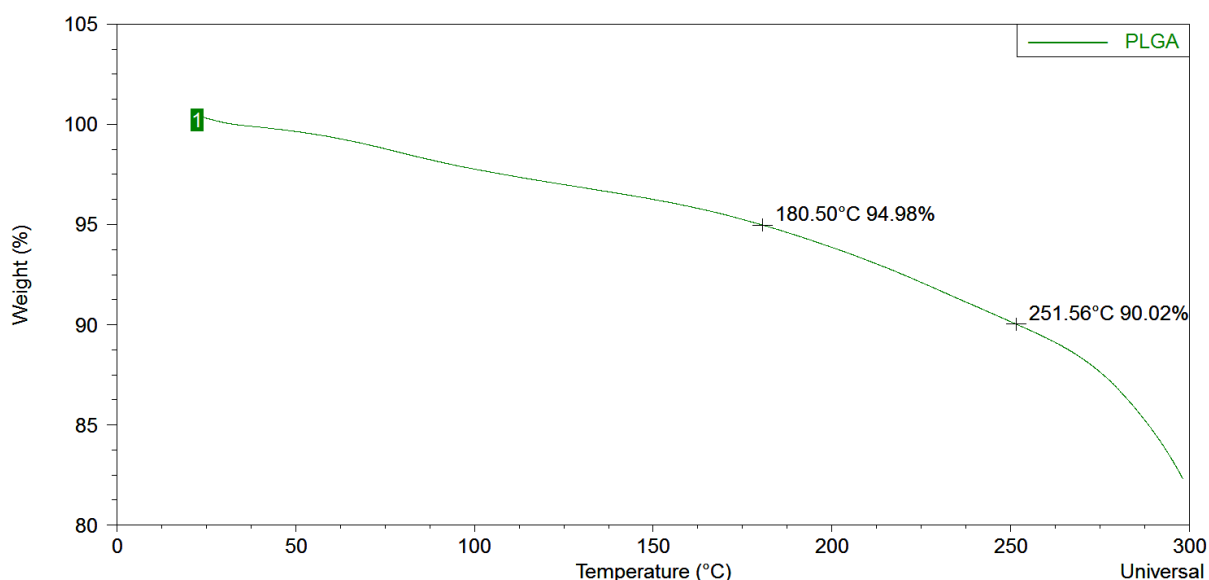


Figura 4. Termograma ATG PLGA 50:50

Como se observa en esta imagen, se muestra el comportamiento del PLGA 50:50 del tipo cristalino. esto es porque el polímero cuenta con un porcentaje

amorfo y otro cristalino, por ello observamos que presenta una pérdida de material a los 180°C del 5% aproximadamente y otra a 252°C del 10%. También se puede apreciar un decremento en la temperatura de manera constante.

Estos resultados concuerdan con lo reportado en Tukulula M. et al. 2015, donde las curvas de ATG en nanopartículas de PLGA muestran una pérdida de peso del 4.5 % entre el 25 a 250 °C, esta pérdida de masa al igual que nuestras muestras se atribuyen a la evaporación del agua absorbida en las muestras. Además, el artículo muestra una segunda caída importante de peso en el rango de 250 a 380, el cual esta pérdida es atribuida a la descomposición del azúcar curdlan presente en sus muestras (Tukulula M. et al. 2015).

3.5 Calorimetría Diferencial de Barrido (CDB) para PLGA 50:50

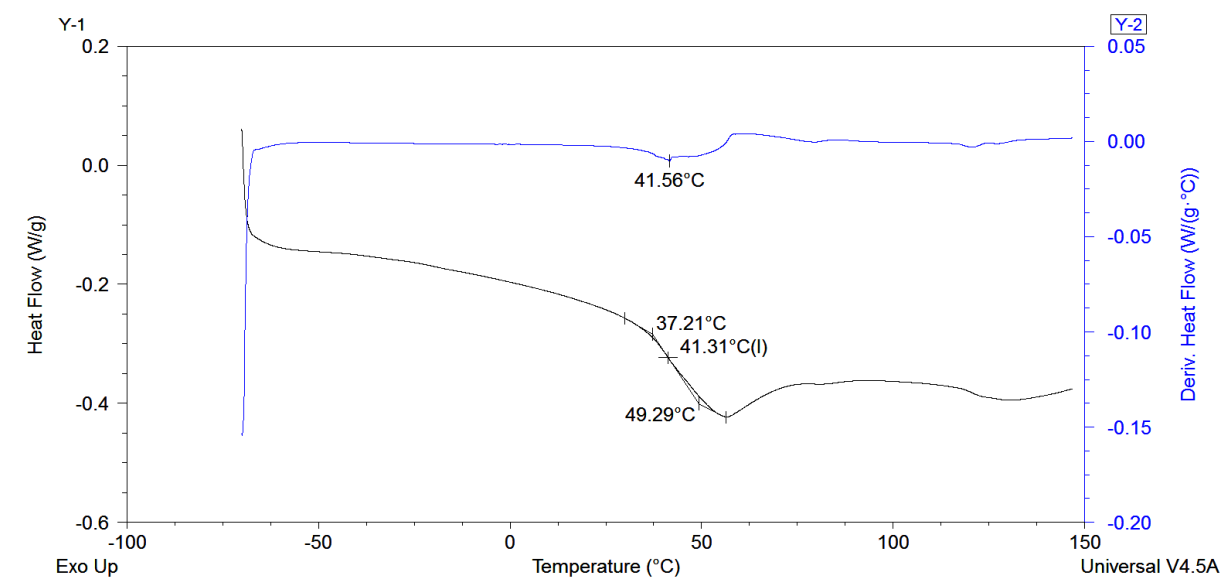


Figura 5. Termograma DSC de PLGA 50:50

El CDB, nos muestra el comportamiento del material durante un periodo de tiempo a diversas temperaturas. Igual que en ATG, los análisis no se completaron, pero se puede observar que hubo una evaporación entre los 50°C y 60°C, la forma de esta curva es característica de una evaporación de humedad o solvente. Asumimos que la transición vítrea ocurrió alrededor de los 55°C y 56°C como se tenía esperado.

Se ha reportado, que la temperatura de transición vítrea (T_g) obtenida para el PLGA 50:50 es de 35 a 40 °C y una temperatura de evaporación (T_d) entre 270 a 282 °C (D'Avila C.E. et al. 2012), resultados muy parecidos a nuestro trabajo,

donde la Tg fue ligeramente mayor posiblemente por la forma estructura y concentración de nuestros filmes.

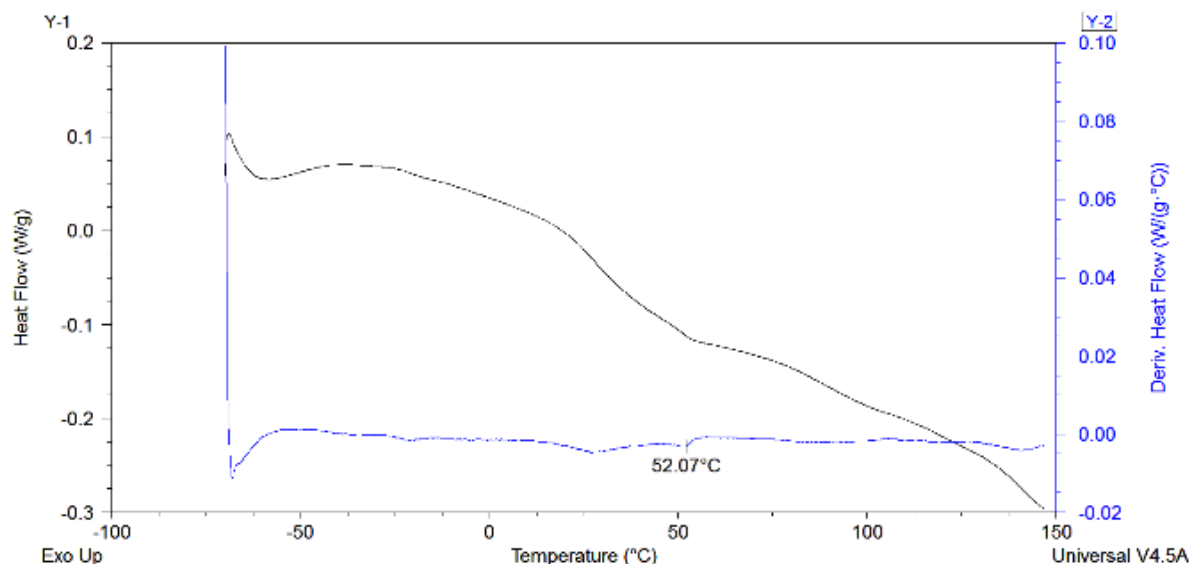


Figura 6. Termograma DSC PLGA:HAp 65:35

De acuerdo con *Cecen et al., 2016*, al utilizar, hidroxiapatita, celulosa y PLLA; en el termograma se observa la hidroxiapatita alrededor de los 64°C, y en un proceso exotérmico se puede observar otro a los 345.19°C. Para procesos con entalpías endotérmicas, la hidroxiapatita muestra un pico a los 71°C, mientras que el pico exotérmico se desplaza hasta los 71°C. En nuestro termograma, se observa alrededor de los 50 a 70 °C, un ligero y amplio cambio, nos permite creer que ahí está la zona de transición vítrea del material, por lo tanto encontramos que nuestra muestra presenta un pico alrededor de los 52.07°C, creemos que probablemente solo estemos viendo la degradación del polímero. De acuerdo a la literatura citada, se puede asumir, que además de ampliar el parámetro para análisis, de -30 hasta 500°C, ahora si se pudiera observar el segundo pico para la hidroxiapatita que nos confirme la presencia de este (*Cecen et al., 2016*).

3.6. Degradación de filmes de PLGA/HAp

En este estudio, no se realizó el ensayo de degradación. Sin embargo, a través de la literatura se puede discutir la relación de la temperatura de transición vítrea con el tiempo de degradación de los filmes. Se ha reportado, que la degradación del composito de PLGA/HAp empieza lentamente, resultando en pequeños cambios en la masa molar, afectando la disminución de la temperatura de transición vítrea (Tg). Al mismo tiempo, los cambios morfológicos son rápidos. Los productos ácidos de la degradación del PLGA, puede aumentar el pH, causando efectos indeseados en la reabsorción del hueso. Por esta razón, este

polímero no sea el ideal para aplicaciones óseas. Sin embargo, la presencia de los fosfatos de calcio de la hidroxiapatita es adecuados para estabilizar el pH, capaz de modificar el tiempo de degradación, disminuyendo la cantidad y rapidez de reacciones catalíticas que generan la degradación en el polímero. Por lo tanto, la HAp disminuye el tiempo de degradación del PLGA, por lo que se ha reportado que el sistema PLGA/HAp es lenta, prolongándola a un tiempo superior a 30 días (Vukomanović M. et al. 2011).

4. Conclusiones

El uso de la hidroxiapatita ha tomado importancia en el área ortopédica y dental. La obtención de HAp de buena calidad y por métodos económicos es indispensable. En nuestro estudio, se realizó un presupuesto del costo de la obtención de la hidroxiapatita sintética por este método y comparado con la HAp comercial, nuestro método constituye un bajo costo. Sin embargo, no se incluyeron en el trabajo costos específicos, por el precio cambiante en el mercado de los reactivos. Lo que, si debemos, destacar que este método es tardado, por el tiempo de agitación y secado, pero puede obtenerse HAp de buena calidad. Con respecto a la caracterización, en el espectro XRD se puede apreciar los patrones característicos de la HAp, reportando buena calidad en el producto obtenido. Con respecto, al espectro FTIR presentó tres zonas de gran importancia, la zona aromática entre 1600 cm^{-1} - 1400 cm^{-1} , dichas señales muy anchas representan el traslape de hidroxiapatita con el polímero. En lo que respecta a las micrografías de SEM las muestras presentan homogeneidad en la superficie, sin embargo, sabemos que la homogeneidad se debe a la naturaleza amorfa del polímero ya que retarda la polimerización de la matriz permitiendo una mejor distribución del relleno. Adicional, la sonicación mejora dicha distribución del relleno en la matriz polimérica, por ello, puede inferirse que el método de fabricación permitirá reproducibilidad en el producto, con respecto a la rugosidad obtenida y a la composición química se prevé que estos filmes tengan aplicaciones médicas. Con respecto, al análisis termogravimétrico observamos que presenta una pérdida de material a los 180°C del 5% aproximadamente y otra a 252°C del 10%, por lo que puede inferirse que este material, puede ser esterilizado en autoclave. Finalmente, en nuestro termograma DSC, se observó alrededor de los 50 a 70°C , un ligero y amplio cambio que nos permite creer que ahí está la zona de transición vítrea del material, además se encontró un pico alrededor de los 52.07°C , donde se propone que ocurre la degradación de la formulación, esto conlleva que una vez implantado el material no sufrirá pérdida de masa a causa de la temperatura corporal. Como trabajo futuro se realizarán pruebas de biocompatibilidad y degradación. Por lo anterior podemos concluir que hay una buena incorporación entre los materiales, además que son viables para la segunda etapa de la investigación, es decir, realizar pruebas de biocompatibilidad, degradación y propiedades mecánicas.

Agradecimientos:

Los autores agradecen al Fondo Sectorial de Investigación en Salud y Seguridad Social (FOSSIS) de CONACYT por el financiamiento a través del número de proyecto 272310 y el proyecto PAPIIT IN-108116, UNAM, por el apoyo en los análisis de MEB, CDB, ATG.

Referencias

Agougui H., Aissa A., Maggi S., Debbabi M., (2010). Phosponate-hydroxyapatite hybrid compounds prepared by hydrothermal method. *Applied Surface Science*, 257, 1377—1382.

Alimohammadi S., Salehi R., Amini N., Davaran S. (2012). Synthesis and physicochemical characterization of biodegradable PLGA-based Magnetic Nanoparticles Containing Amoxicillin; Biodegradable Nanoparticles containing amoxicillin. *Bulletin of the Korean Chemical Society*, 33, 3225-3232. 10.5012/bkcs.2012.33.10.3225.

Álvarez-Suarez A., López-Maldonado E., Graeve O., Martínez-Pallares F., Gómez-Pineda L.E., Oropeza-Guzmán M.E., Iglesias A.L., Ng T., Serena-Gómez E., Villarreal-Gómez L.J. (2017). Fabrication of porous polymeric structures using a simple sonication technique for tissue engineering. *Journal of Polymer Engineering*, 37(9): 943-951. doi:10.1515/polyeng-2016-0423.

Blanco M.D., Sastre R.L., Teijón C., Olmo R., Teijón J.M. (2005). 5-Fluorouracil-loaded microspheres prepared by spray-drying poly (D, L-lactide) and poly(lactide-co-glycolide) polymers: characterization and drug release. *Journal of Microencapsulation*, 22, 671-682. doi: 10.1080/02652040500161990.

Biazar E., Heidari M., Asefnezhad A., Montazeri N. (2011). The relationship between cellular adhesion and surface roughness in polystyrene modified by microwave plasma radiation. *International Journal of Nanomedicine*. 6, 631-639. doi:10.2147/IJN.S17218.

Carvalho E., Alves, C.D., Magalhães R. J., De Souza F., De Sousa F.R., Geraldo S. R. (2012). Synthesis and Characterization of Poly (D, L-Lactide-co-Glycolide) Copolymer. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 3, 208-225. doi: 10.4236/jbnnb.2012.32027.

Cecen B., Kozaki L.D., Yuksel M., Ustun O, Ergur B.U., Havitcioglu H. (2016). Biocompatibility and biomechanical characteristics of loofah based scaffolds combined with hydroxyapatite, cellulose, poly-L-lactid acid with chondrocyte-

like cells. *Materials Science and Engineering C*. 69, 437-446. doi:10.1016/j.msec.2016.07.007.

Cegnar M., Premzl A., Zavasnik B.V., Kristl J., Kos J., (2004). Poly(lactide-co-glycolide) nanoparticles as a carrier system for delivering cysteine protease inhibitor cystatin into tumor cells. *Experimental Cell Research*, 301, 223-231. Doi: 10.1016/j.yexcr.2004.07.021.

Chang H-I and Wang Y. (August 29th 2011). *Cell Responses to Surface and Architecture of Tissue Engineering Scaffolds*, Regenerative Medicine and Tissue Engineering Daniel Eberli, IntechOpen, DOI: 10.5772/21983.

D'Avila C.E., Alves, R.J., Resende, J.M., de Souza Freitas R.F., de Sousa, R.G. (2012). Synthesis and Characterization of Poly (D, L-Lactide-co-Glycolide) Copolymer. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 3, 208-225. doi: 10.4236/jbnb.2012.32027.

Da Cunha M.R., Gushiken V.O., Mardegan Issa J.P., Iatecola A., Pettian M., Santos A.R. Jr. (2011). Osteoconductive Capacity of Hydroxyapatite Implanted into the Skull of Diabetics. *Journal of Craniofacial Surgery*. 22(6): 2048-2052, DOI: 10.1097/SCS.0b013e3182319876.

Danhier, F., Ansorena, E., Silva, J.M., Coco, R., Le Breton, A., Préat, V. (2012). PLGA-based nanoparticles: An overview of biomedical applications. *Journal of Controlled Release*, 161, 505-522. doi: 10.1016/j.jconrel.2012.01.043.

Davachi S.M., Kaffasi B., Roushanded J.M., Torabinejad B. (2012). Investigating thermal degradation, crystallization and surface behavior of L-lactide, glycolide and trimethylene carbonate terpolymers used for medical applications. *Materials Science and Engineering C*, 32, 98-104. doi.org/10.1016/j.msec.2011.10.001.

Dong Y., Feng S.S., (2005). Poly (D, L-lactide-co-glycolide)/montmorillonite nanoparticles for oral delivery of anticancer drugs. *Biomaterials*, 26, 6068-6076. doi: 10.1016/j.biomaterials.2005.03.021.

Douglas T., Pamula E., Hauk D., Wilffang J., Sivananthan S., Sherry E., Warnke P.H. (2009). Porous polymer/hydroxyapatite scaffolds: characterization and biocompatibility investigations. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 20 (9), 1909-1915. doi: 10.1007/s10856-009-3756-7. Epub 2009 May 5.

Durucan C., Brown P. W. (2001). Biodegradable hydroxyapatite-polymer composites. *Advanced Engineering Materials*, 3(4), 227-231.

Gasami H., Siepmann F., Hamoudi M.C., Danede F., Verin J., Willart J.F. Siepmann J. (2016). Towards a better understanding of the different release

phases from PLGA microparticles: Dexamethasone-Loaded systems. *International Journal of Pharmaceutics*, 514, 186-199. doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.08.032.

Gasmi H., Willart J.F., Danede F., Hamoudi M.C., Siepmann J., Siepmann F. (2015). Importance of PLGA microparticle swelling for the control of prilocaine release. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 30, 123-132. doi: 10.1016/j.jddst.2015.10.009.

Hausberg A.G., De Luca P.P. (1995). Characterization of biodegradable poly (DL-lactide-co-glycolide) polymers and microspheres. *Journal of pharmaceutical & biomedical analysis*, 13 (6), 747-760. doi: doi.org/10.1016/0731-7085(95)01276-Q.

Higuera L.P., Vargas A.F., Gil M.J., Giraldo L.F. (2016). Synthesis and characterization of nanocomposite based on hydroxyapatite and monetite. *Materials Letters*, 175, 169-172. doi.org/10.1016/j.matlet.2016.04.011.

Higuera P. L., Vargas F. A., Gil J. M., Giraldo F. L. (2016). Synthesis and characterization of nanocomposite based on hydroxyapatite and monetite. *Materials Letters*, 175, 169-172. doi.org/10.1016/j.matlet.2016.04.011.

Hu X., Park S-H., Gil E.S., Xia X-X., Weiss A.S., Kaplan D.L. (2011). The Influence of Elasticity and Surface Roughness on Myogenic and Osteogenic-Differentiation of Cells on Silk-Elastin Biomaterials. *Biomaterials*, 32 (34), 8979-8989. doi:10.1016/j.biomaterials.2011.08.037.

Hu X., Shen H., Yang F., Liang X., Wang S., Wu D. (2014). Modified composite microspheres of hydroxyapatite and poly(lactide-co-glycolide) as an injectable scaffold. *Applied Surface Science*, 292, 764-772. doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.12.045.

Hughes J.M., Nekvasil H., Ustunisk G., Lindsley D.H., Coraor A.E., Vaughn J., Phillips B.L., McCubbin F.M., Woerner W.R. (2014). Solid solution in the fluorapatite-chlorapatite binary system: High-precision crystal structure refinements of synthetic F-Cl apatite, *American Mineralogist*, 99, 369-376.

Jebri S., Khattech I., Jemal M. (2017). Standard enthalpy, entropy and Gibbs free energy of formation of "A" type carbonate phosphocalcium hydroxyapatites. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 106, 84-94.

Khan W.S., Rayan F., Dhinsa B.S., Marsh D. (2012). An Osteoconductive, Osteoinductive, and Osteogenic Tissue-Engineered Product for Trauma and Orthopaedic Surgery: How Far Are We?, *Stem Cells International*, 2012, Article ID 236231, <https://doi.org/10.1155/2012/236231>.

Lee J.B., Lee S.H., Yu S.M., Park J.C., Choi J.B., Kim J.K. (2008). PLGA scaffold incorporated with hydroxyapatite for cartilage regeneration. *Surface and Coatings Technology*, 202, 5757-5761. doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.06.138.

Liuyun J. Chengdong, Lixin J., Lijuan X. (2014). Effect of hydroxyapatite with different morphology on the crystallization behavior, mechanical property and in vitro degradation of hydroxyapatite/poly(lactic-co-glycolic) composite. *Composites Science and Technology*, 93, 61-67. doi.org/10.1016/j.compscitech.2013.12.026.

Maheshwari S.U. S., Samuel VK., Nagiah N. (2014). Fabrication and evaluation of (PVA/HAp/PCL) bilayer composites as potential scaffolds for bone tissue regeneration application. *Ceramics International*, 40, 8469-8477. doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.01.058.

Maitz M.F. (2015). Applications of synthetic polymers in clinical medicine. *Journal Biosurface and Biotribology*, 1, 161-176. doi: 10.1016/j.bsbt.2015.08.002.

Mehrassa M., Asadollahi M.A., Ghaedi K., Salehi H., Arpanaei A. (2015). Electrospun aligned PLGA and PLGA/gelatin nanofibers embedded with silica nanoparticles for tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 79, 687-695. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.05.050.

Mehrassa M., Asadollahi M.A., Nasri-Nasrabadi B., Ghaedi K., Salehi H., Dolatshahi Pirouz A., Arpanaei A. (2016). Incorporation of mesoporous silica nanoparticles into random electrospun PLGA and PLGA/gelatin nanofibrous scaffolds enhances mechanical and cell proliferation properties. *Materials Science and Engineering: C*, 66, 25-32. doi.org/10.1016/j.msec.2016.04.031.

Naik A., Best S.M., Cameron R.E. (2015). The influence of silanisation on the mechanical and degradation behaviour of PLGA/HA composites. *Materials Science and Engineering: C*, 8, 642-650. doi.org/10.1016/j.msec.2014.12.056.

Ngiam M., Liao S., Patil A.J., Cheng Z., Chan K.C., Ramakrishna S. (2009). The fabrication of nano-hydroxyapatite on PLGA and PLGA/collagen nanofibrous composite scaffolds and their effects in osteoblastic behavior for bone tissue engineering. *Bone*, 45, 4-16. doi.org/10.1016/j.bone.2009.03.674.

Oh J.H., Park K.M., Lee J.S., Moon H.T., Park K.D. (2012). Electrospun microfibrous PLGA meshes coated with in situ cross-linkable gelatin hydrogels for tissue regeneration. *Current Applied Physics*, 12, S144-S149. doi.org/10.1016/j.cap.2012.02.047.

Quian J., Xu W., Yong X., Jin X., Zhang W., (2014). Fabrication and in vitro biocompatibility of biomorphic PLGA/nHA composite scaffolds for bone tissue

engineering. *Materials Science and Engineering: C*, 36, 95-101. doi.org/10.1016/j.msec.2013.11.047.

Rosas J., Pedraz J. (2007). Microesferas de PLGA: un sistema para la liberación controlada de moléculas con actividad inmunogenica. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 36 (2), 134-153. Doi: 10.15446/rcciquifa.

Sánchez A., Vera R., Muñoz E., Gomez E., Bernard M., Maciel A. (2016). Preparación y caracterización de membranas poliméricas electrohiladas de policaprolactona y quitosano para la liberación controlada de clorhidrato de tiamina. *Ciencia en Desarrollo*. 7 (2),133-151. doi.org/10.19053/01217488.v7.n2.2016.4818.

Sequeda, L., Díaz, J., Gutiérrez, S., Perdomo, S., Gómez, O. (2012). Obtención de hidroxiapatita sintética por tres métodos diferentes y su caracterización para ser utilizada como sustituto óseo. *Revista Colombiana de Ciencias Químico Farmacéuticas*, 41 (1), 50-60.

Soriano I., Évora C. (2000). Formulation of calcium phosphates /poly (d,l-lactide) blends containing gentamicin for bone implantation. *Journal of Controlled Release*, 68, 121-134. doi.org/10.1016/S0168-3659(00)00251-0.

Swetha M., Sahithi K., Moorthi A., Srinivasan N., Ramasamy K., Selvamurugan N. (2010). Biocomposites containing natural polymers and hydroxyapatite for bone tissue engineering. *International Journal of Biological Macromolecules*, 47 (1), 1-4. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2010.03.015.

Thomas M., Arora A., Katti D. (2014). Surface hydrophilicity of PLGA fibers governs in vitro mineralization and osteogenic differentiation. *Materials Science and Engineering: C*, 45, 320-332. doi.org/10.1016/j.msec.2014.08.074.

Tukulula M., Hayeshi R., Fonteh P., Meyer D., Ndamase A., Madziva M.T., Khumalo V., Labuschagne P., Naicker B., Swai H., Dube A. (2015). Curdlan-Conjugated PLGA Nanoparticles Possess Macrophage Stimulant Activity and Drug Delivery Capabilities. *Pharmaceutical Research*, 32 (8): 2713-26. doi: 10.1007/s11095-015-1655-9.

Upton S., Partridge S.W., Tcacencu I., Fulton D.A., Corbett I., German M.J., Dalgarno K.W. (2016). Development of a methacrylate-terminated PLGA copolymer for potential use in craniomaxillofacial fracture plates. *Materials Science and Engineering C*, 69, 470-477. doi.org/10.1016/j.msec.2016.06.012.

Villarreal-Gómez L.J., Vera-Graziano R., Vega-Ríos M.R., Pineda-Camacho J.L., Mier-Maldonado P.A., Almanza-Reyes H., Cornejo Bravo J.M. (2014a). In Vivo Biocompatibility of Dental Scaffolds for Tissue Regeneration. *Advanced Materials*

Research 06/2014; Chapter 3(Materials Applications). DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.976.191 4.

Villarreal-Gómez L.J., Vera-Graziano R., Vega-Ríos M.R., Pineda-Camacho J.L., Mier-Maldonado P.A., Almanza-Reyes H., Cornejo Bravo J.M. (2014b). Biocompatibility Evaluation of Electrospun Scaffolds of Poly (L-Lactide) with Pure and Grafted Hydroxyapatite. Journal of the Mexican Chemical Society 10/2014, 2014(584).

Vukomanović M., Škapin S.D., Poljanšek I., Žagar E., Kralj B., Ignjatović N., Uskoković D. Poly(D, L-lactide-co-glycolide)/hydroxyapatite core-shell nanosphere. Part 2: Simultaneous release of a drug and a prodrug (clindamycin and clindamycin phosphate). Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 82 (2), 414-421. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2010.09.012>.

Xiao W., Fu H., Rahaman M.N., Liu Y., Bal B.S. (2013). Hollow hydroxyapatite microspheres: A novel bioactive and osteoconductive carrier for controlled release of bone morphogenetic protein-2 in bone regeneration, Acta Biomaterialia, 9 (9), 8374-8383. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2013.05.029>.

Xian, W. (2010). A laboratory Course in Biomaterials. CRC Press.

Yoo H.S., Lee K.H., Oh J.E., Park T.G. (2000). In vitro and in vivo anti-tumor activities of nanoparticles based on doxorubicin-PLGA conjugates. Journal of Controlled Release: Official Journal of the Controlled Release Society, 68 (3), 419-431. doi: 10.1016/S0168-3659(00)00280-7.

Zhao X., Han Y., Li J., Cai B., Gao H., Feng W., Li S., Liu J., Li D. (2017). BMP-2 immobilized PLGA/hydroxyapatite fibrous scaffold via polydopamine stimulates osteoblast growth. Materials Science and Engineering: C, 78, 658-666. doi.org/10.1016/j.msec.2017.03.186.

Notas biográficas:



M.C. Susana Fragoso Ángeles egresada de la licenciatura de Químico Industrial de la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, de la Universidad Autónoma de Baja California (FCQI-UABC), en dicha facultad estudió la Maestría en Ciencias, en el área de química aplicada con el tema “Devulcanización catalítica de neumáticos fuera de uso”. Actualmente es estudiante de doctorado en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, dentro del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI). Es maestro de asignatura en la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y

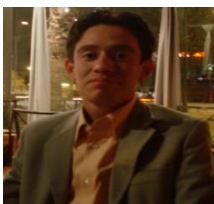
Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California (ECITEC-UABC). Durante sus estudios ha realizado estancias en la Facultad de Química, Universidad Autónoma de México (FQ-UNAM) y en el Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Autónoma de México (IIM-UNAM) en diversas ocasiones, así como también en el Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (ICMM) de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM). Ha participado como expositor en el Taller de Materiales de Uso en Dispositivos Médicos y Sistemas de Liberación de Fármacos, llevado a cabo en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California (FCQI-UABC). Recientemente ha realizado una estancia en el Institut de Chimie et des Matériaux Paris-Est (ICEMPE) para la caracterización de sus materiales de estudio.



Ricardo Vera Graziano es ingeniero químico por la Universidad de Guanajuato. Fue becado por la Universidad Case Western Reserve, EU, en donde obtuvo la maestría y el doctorado en Ciencia de Polímeros. Ingresó a este Instituto de Investigaciones en Materiales el 1ro de febrero de 1967, Actualmente se desempeña como Investigador Titular C de tiempo completo, adscrito al Departamento de Polímeros y es Investigador nacional Nivel 2. Hace 10 años orientó su investigación al desarrollo de sistemas para aplicaciones biomédicas en colaboración con académicos de la UNAM y de otras instituciones nacionales y extranjeras. Ha publicado 160 artículos sobre síntesis, caracterización y desarrollo de materiales poliméricos en revistas científicas, libros, capítulos en libros y en memorias en extenso de congresos. Cuenta con 4 desarrollos tecnológicos, dos de ellos con patentes registradas. Desarrolló una tecnología para la fabricación de prótesis anatómicas de poliuretano para mujeres sometidas a mastectomía que ha permitido beneficiar a más de 90,000 pacientes. Ha impartido clases de manera ininterrumpida por más de 49 años. Ha dirigido 56 tesis de doctorado, maestría y licenciatura. En este proceso ha contribuido a la formación de varios profesores e investigadores. A lo largo de su vida académica ha participado en diversos cuerpos colegiados, comités editoriales y en la organización de eventos científicos. Ha ocupado diversos cargos académico-administrativos. Fue Jefe del Departamento de Polímeros, Responsable del Núcleo de Innovación Tecnológica, Secretario Académico. También fue coordinador del Posgrado en Ciencia e Ingeniería de Materiales de la UNAM y Director de este Instituto de Investigaciones en Materiales.



Dra. Ana Leticia Iglesias, es profesora investigadora de ECITEC, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), e imparte las cátedras de química orgánica y química organometalica, dentro de Programa de Bioingeniería. Es graduada del Doctorado en Ciencias en Química del Centro de Graduados e Investigación en Química de ITT de Tijuana. Realizo una estancia posdoctoral de 2 años en la Facultad de Química de la UNAM. Su línea de investigación, son las aplicaciones biomédicas y catalíticas de complejos de metales de transición, en especial la evaluación de su actividad biológica.



Luis Enrique Gómez Pineda es Profesor de Tiempo Completo de la Universidad Autónoma de Baja California. Es Doctor en Ciencias en Química por parte del Instituto Tecnológico de Tijuana. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores desde el 2012. Ha realizado estancias de investigación en la Universidad de Oviedo y en el Instituto de Carboquímica. El trabajo de investigación que realiza es sobre síntesis y funcionalización de materiales de carbono para determinación electroquímica de analitos de interés medioambiental y/o clínico.



Graciela Lizeth Pérez González es egresada de la licenciatura de Químico Biólogo de la Facultad de Ciencias Químico-Biológicas, de la Universidad de Sonora (FCQB-USON), actualmente se encuentra cursando el último semestre de la Maestría en ciencias Químicas e ingeniería, impartida en la facultad de ciencias químicas e ingeniería (FCQI), dentro del programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniera (MYDCI) con el tema “Sistema Mucoadhesivo cargados con dexametasona y su aplicación en la extracción postquirúrgica del tercer molar”. Actualmente es maestro de asignatura en la Escuela de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Baja California (ECITEC-UABC) así como de la escuela de ciencias de la salud (ECISALUD-UABC) desde hace 7 años. Durante sus estudios ha realizado estancias en la Facultad de Química, Universidad Autónoma de México (FQ-UNAM) y en el Centro de nanociencias y nanotecnología (CNyN) en diversas ocasiones.



Dr. Luis Jesús Villarreal Gómez es originario de Cd. Obregón, Sonora, estudió en la Universidad de Sonora, el programa educativo de químico-biólogo, con especialidad en análisis clínicos (2004), posteriormente, realizó sus estudios de posgrado en la Universidad Autónoma de Baja California, con la Maestría en Ecología Molecular y Biotecnología (2009) y el Doctorado en Ciencias (con especialidad en Biomateriales) (2013). Actualmente, es responsable de la organización de eventos de investigación en ECITEC, siendo presidente organizador en el 1er Congreso Internacional de Ciencias de la Ingeniería y Tecnología (ECITEC2017) y es editor principal en la revista de reciente creación “Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT)”. Hasta el 2017, ha publicado 16 artículos indexados, 3 libros y 5 capítulos de libro. El Dr. Villarreal es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 1, miembro del Registro CONACYT de Evaluadores Acreditados (RCEA), con nombramiento de profesor-investigador y perfil PRODEP. Sus proyectos han sido financiados en 2 ocasiones en convocatorias de CONACYT y una en PRODEP-SEP. Cuenta a su cargo con un laboratorio de biomateriales. Ha dirigido 3 tesis de licenciatura en Bioingeniería, 2 tesinas en Biotecnología y 4 tesis de Maestría. Actualmente, se encuentra dirigiendo 3 alumnos de maestría y 4 alumnos de doctorado.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.

*Recibido 13 Sep 2018
Aceptado 27 Sep 2018*

ReCIBE, Año 7 No. 2, Noviembre 2018

Etapas de Potencia de un Estimulador Transcutáneo para Estimulación Funcional y Medular

Output Stage of a Transcutaneous Stimulator for Functional Electrical and Transcutaneous Electrical Spinal-cord Stimulation

Alejandro Emilio Leyva Gutiérrez
Facultad de Medicina, Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma del estado de México, México
aeleyvag@gmail.com

Ignacio Hernández Popo
Departamento de Desarrollo Tecnológico, Instituto
Nacional de Rehabilitación LGII, México.
ignacio.hernandezpo@gmail.com

Rigoberto Martínez-Méndez
Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del estado
de México, México
rigo@ieee.org

Pedro David Alonso Serrano
Ford Motor Company, Mexico
daavid39@hotmail.com

Resumen: La enfermedad vascular cerebral (EVC) afecta cada año a más de 15 millones de personas en el mundo, de ellos, 5 millones sufren discapacidad permanentemente y 5 millones deben pasar por un largo proceso de rehabilitación para regresar a sus vidas normales. Dentro de las técnicas de rehabilitación, la Estimulación Eléctrica Funcional (EEF) se ha utilizado durante décadas para tratar a pacientes hemipléjicos con un éxito relativo. Otra técnica que ha logrado resultados experimentales muy promisorios es la estimulación medular invasiva. Esta consiste en colocar electrodos directamente en la médula y estimular eléctricamente. Con el fin de evitar la invasividad de esta técnica, recientemente se ha propuesto la Estimulación Eléctrica Medular Transcutánea (EEMT). Esta técnica aún se encuentra en etapa de investigación, y una de las principales limitantes es la falta de estimuladores capaces de proveer la potencia y generación de pulsos adecuados para una adecuada estimulación y que permitan el desarrollo de más investigación sobre esta técnica. El prototipo aquí presentado consiste en la etapa de potencia de un estimulador capaz de generar pulsos para las técnicas de estimulación EEF y EEMT y formará parte de otros bloques (no presentados en este documento) para conformar un estimulador bimodal con fines de investigación que se utilizará en el Instituto Nacional de Rehabilitación LGII. El dispositivo presentado es capaz de proporcionar impulsos bifásicos de 50 μ s a 500 μ s, con frecuencia variable en un rango de 1 a 150 Hz con una amplitud de más de 190 mA, así como una corriente constante de hasta 10 mA. Estos parámetros son adecuados para realizar estimulación de tipo EEF y EEMT de acuerdo con el estado del arte de la técnica.

Palabras clave: Accidente Vascular Cerebral, Estimulación Eléctrica Funcional, Estimulación Eléctrica Medular, Etapa de Potencia.

Abstract: A cerebrovascular disease also known as stroke affects every year more than 15 million people in the world, from them, 5 million suffer permanent disability and 5 million must undergo a long process of rehabilitation to return to their normal lives. Within the rehabilitation techniques, Functional Electrical Stimulation (FES) has been used for decades to treat hemiplegic patients with relative success. Another technique that has achieved very promising experimental results is the invasive spinal cord stimulation. This technique consists on epidural stimulation of lumbosacral spinal cord that can elicit tonic and rhythmic motor patterns of the lower limbs. In order to avoid the invasiveness of this technique, Transcutaneous Electrical Spinal-Cord Stimulation (TSCS) has recently been proposed. This technique is still in the research stage and one of the main limitations is the lack of stimulators capable of providing the power and generation of pulses suitable for an adequate stimulation, allowing the development of more research on this technique. The prototype here presented consists on the power stage of a stimulator capable to generate pulses for FES and TSCS techniques, and together with other stages (not presented in this document) will be part of a bimodal stimulator for research purposes that will be

used at the National Institute of Rehabilitation LGII. The presented device is capable of providing biphasic pulses from 50 μ s to 500 μ s, with variable frequency in a range of 1 to 150 Hz with an amplitude of more than 190 mA, as well as a constant current of up to 10 mA. These parameters are suitable for carrying out FES and TSCS modes according to the state of the art.

Keywords: Stroke, Functional Electrical Stimulation, Transcutaneous Electrical Spinal-Cord Stimulation, power stage

1. Introducción

De acuerdo con el Informe Mundial sobre la Discapacidad de la Organización Mundial de la Salud (OMS), más de mil millones de personas, alrededor del 15% de la población mundial viven con algún tipo de discapacidad (Organización Mundial de la Salud, 2011). Se estima que, en nuestro país, aproximadamente el 4.03% de la población tiene algún tipo de discapacidad. Las formas más recurrentes de discapacidad en México son físicas, visuales, problemas de audición, de salud mental y problemas de comunicación. La discapacidad motora tiene el mayor porcentaje de ocurrencia, con un 58.3% (Geografía (INEGI), 2010).

Hoy en día, la población de pacientes con disfunción motora en las extremidades ha aumentado, causada principalmente por lesiones nerviosas asociadas con la enfermedad vascular cerebral (EVC), lesiones cerebrales traumáticas o esclerosis múltiple (Boletín UNAM-DGCS-619, 2015). Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el EVC es la segunda causa de muerte (9,7%) en el mundo, y es la cuarta causa en México (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017). Cerca del 40% de las víctimas de EVC tienen alteraciones funcionales permanentes en sus brazos, el 40% de ellas recuperan su función de forma moderada y solo el 20% recuperan la funcionalidad por completo. Además, la discapacidad motriz de los brazos generalmente causa pacientes que dependan de familiares para sus actividades diarias (Tu et al., 2017; Vafadar, Côte, & Archambault, 2015), además de soportar grandes presiones psicológicas y económicas para sus familias, así como, para los programas de salud familiar y social (Ruiz Sandoval, 2014).

Los problemas mencionados se han atacado por medio de técnicas de rehabilitación asistida con estimulaciones eléctricas. Una de ellas es la Estimulación Eléctrica Funcional (EEF), que se ha utilizado durante décadas para el tratamiento de pacientes hemipléjicos, víctimas de lesiones en la médula espinal. La EEF ha logrado resultados favorables en el mejoramiento de algunas funciones motoras del paciente (Tu et al., 2017; Wu, Young, & Kuo, 2002).

Otra técnica que ha demostrado resultados prometedores es la estimulación medular, que consiste en colocar electrodos directamente sobre la médula, buscando estimular puntos estratégicos para lograr movimiento controlado de extremidades. La gran desventaja de esta técnica es la necesidad de intervenir quirúrgicamente al paciente (Lu et al., 2016) y que, debido a esto, aún se encuentra en etapa de experimentación en animales. Buscando eliminar dicha desventaja y con el fin de probar dicha técnica en humanos ha surgido una nueva vertiente conocida como Estimulación Eléctrica Medular Transcutánea (EEMT). Sin embargo, a la fecha no hay reportes sobre el uso de esta técnica en pacientes con EVC con parálisis en miembros superiores.

Por otro lado, existe un conocimiento limitado en la literatura sobre los dispositivos electrónicos utilizados para generar la estimulación eléctrica. Aunque existen algunos trabajos que reportan los detalles del estimulador (Alonso Serrano, 2015; Montañana Grau, 2014; Veloz Centeno, 2016), la mayoría de estos son voluminosos y costosos; además, aquellos que mencionan datos sobre la etapa de potencia electrónica no brindan detalles completos para replicar sus resultados (Ambrosio et al., 2015; Derungs, Dietrich, & Hunt, 2013; Simcox, Davis, Barriskill, Middleton, & others, 2004). Es importante resaltar que la etapa de potencia es una parte muy importante de los estimuladores porque es la encargada de proporcionar una corriente suficiente y sostenida para lograr una estimulación correcta. Los parámetros de estimulación adecuados para realizar estimulación de tipo EEF y EEMT según el estado de la técnica son: EEF (amplitud: 0.1 - 190 mA, ancho de pulso: 0 - 500 μ s, y frecuencia: 0 - 150 Hz. EEMT-CD (amplitud: 0.1 - 5 mA, ancho de pulso: no aplica, y frecuencia: no aplica). En los artículos científicos encontrados en el estado del arte de la técnica, se puede observar que muchos de los sistemas electrónicos utilizan fuentes de alimentación conmutadas, con topologías que comprometen el aislamiento del paciente y, por lo tanto, su seguridad. Otros enfoques utilizan dispositivos costosos o sistemas voluminosos para proporcionar la energía necesaria para estimular. Hasta la fecha, no hay reportes en la literatura de dispositivos estimuladores capaces de proporcionar modos de estimulación EEF y EEMT en un mismo sistema y aún por separado, no cumplen con las características recomendadas para una adecuada estimulación, especialmente para EEMT.

La necesidad de contar con un estimulador bimodal EEF/EEMT surge de un proyecto de investigación que se desarrolla en el Instituto Nacional de Rehabilitación LGII (INR LGII) en México, cuyo objetivo es usar ambas técnicas (EEF y EEMT) simultáneamente o en secuencias experimentales, para mejorar la rehabilitación del miembro superior en pacientes con secuelas ocasionadas por un EVC. Es así que se realizó el presente prototipo que forma parte del estimulador necesario para el proyecto arriba mencionado. A continuación, se describe el desarrollo del sistema y los resultados preliminares alcanzados.

2. Metodología y Desarrollo

La metodología de diseño se basa en tres etapas: 1. Diseño del circuito electrónico. 2. Programación para generar los pulsos de prueba. 3. Medición en laboratorio de niveles de corriente y voltajes alcanzados con el prototipo realizado - simulación.

2.1 Diseño del circuito electrónico

La arquitectura de la etapa de potencia se basa en una configuración similar a la configuración de un puente H, con la diferencia de que se ha diseñado para modificar la dirección de la corriente y también, controlar la magnitud de ésta por medio de niveles de voltaje. El circuito diseñado se muestra en la Figura 1.

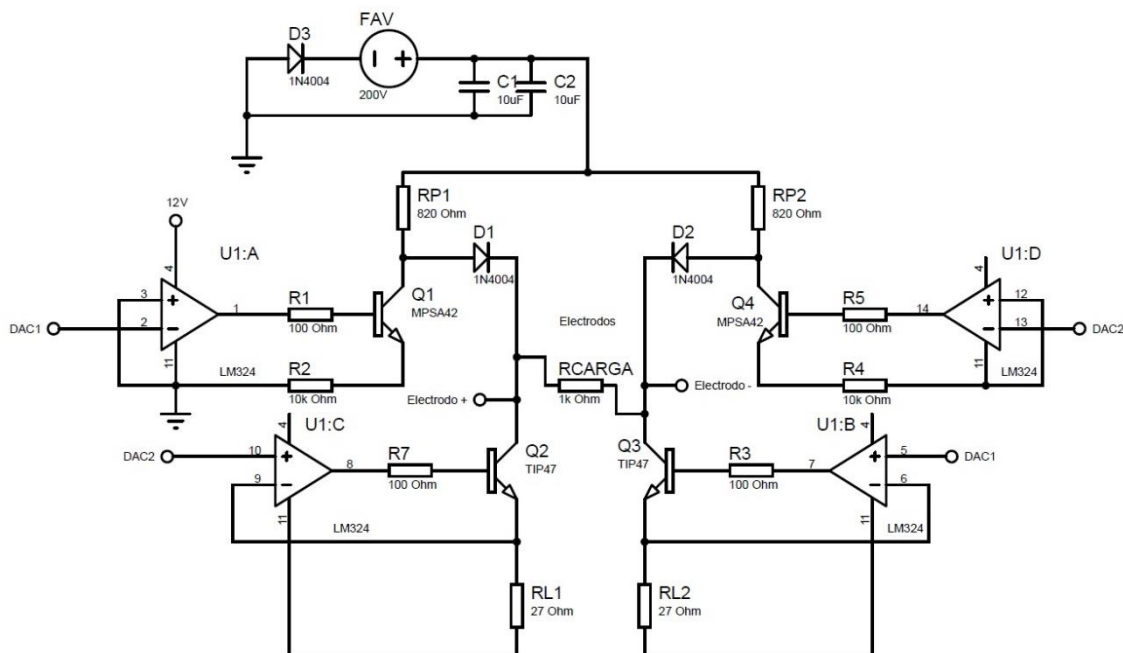


Figura 1. Circuito tipo puente para generación de pulsos de estimulación controlados en corriente, ancho de pulso y frecuencia

El puente H se compone de transistores de alto voltaje MPSA42 (Q1 y Q4) y TIP47 (Q2 y Q3). Como se observa en el diagrama de la Figura 1, las señales de control se denominan DAC2 y DAC1, ambas señales son complementarias entre sí y son generadas por otra etapa que proporciona secuencias determinadas para generar los diferentes tipos de pulsos requeridos durante la estimulación. Dicha etapa forma parte del trabajo de otro equipo de investigación que aún está trabajando en ella, Por lo tanto en este trabajo, con la finalidad de validar el circuito propuesto, se implementó un generador de pulsos utilizando una tarjeta Arduino Uno, se eligió esta tarjeta por su bajo precio y amplia flexibilidad. Además, considerando que sólo se usará para validar la etapa de potencia y en la versión final, esta generación de pulsos será proporcionada por otro dispositivo que está diseñando otro equipo de investigadores.

Los amplificadores operacionales A y D se encargan de activar Q1 y Q4 cuando sus respectivas señales de entrada (DAC1 y DAC2, respectivamente) tengan un voltaje entre 0.1 a 10 V. Los amplificadores operacionales C y B controlan la magnitud de corriente de acuerdo con la magnitud de DAC2 y DAC1 respectivamente. Esto se logra retroalimentando a la entrada inversora el voltaje presente en el borne superior de RL1 y RL2 respectivamente. El propósito de las resistencias R2 y R4 es disminuir la corriente que fluye a través de RP1 y RP2 y así reducir el consumo de potencia de la FAV. Sin estas resistencias la corriente fluiría solamente por las resistencias RP1 o RP2 con un consumo de corriente cercano a los 50 W.

Por otro lado A medida que aumenta la corriente, la caída de voltaje en la resistencia RL1 o RL2 aumentará, haciendo que la salida del amplificador operacional caiga, reduciendo así la corriente que fluye en el TIP47 y reduciendo la corriente en la carga. D1 y D2 son diodos de uso general agregados al circuito para garantizar que la corriente fluya como debe. RP1, RP2 junto con RL1 y RL2 funcionan como limitadores de corriente. La etapa de potencia se alimenta con una fuente de alimentación de alto voltaje (FAV). La se eligió una FAV (12QP200, Picoelectronics) de 200V y 50W. La elección del voltaje máximo de la FAV está relacionada con el hecho de que la impedancia de la piel se encuentra en el rango de 1 kΩ a 30kΩ, dependiendo de la frecuencia de la señal, para el caso de los estimuladores generalmente se considera una impedancia de 1kΩ como el valor general, por lo tanto con 200V se alcanzarían hasta 200 mA, un valor deseado de acuerdo al estado de la técnica para estimulación EEMT. D3 se usa para evitar daños al circuito si la FAV se conecta con la polaridad incorrecta. Despreciando la caída de voltaje del diodo, la corriente total que fluye a través de una rama del puente H y RCARGA (que representa la impedancia de la piel) se puede calcular mediante la ecuación 1. Donde $I_{out(pk-pk)}$ representa la corriente total pico a pico.

$$I_{out}(Pk - Pk) = \frac{DAC1[V] + DAC2[V]}{90\Omega} \quad (1)$$

Como se puede observar, la corriente dependerá únicamente de los voltajes aplicados a DAC1 y DAC2 y una resistencia constante, a pesar de que existan cambios en la impedancia de la piel.

2.2 Programación para generar los pulsos

Para generar los pulsos para validar el circuito propuesto, se implementó un programa usando Arduino Uno. El Arduino fue programado para generar pulsos complementarios (DAC1 y DAC2) con frecuencia y ancho de pulso variable. El diagrama de flujo en la figura 2 describe cómo funciona el programa.

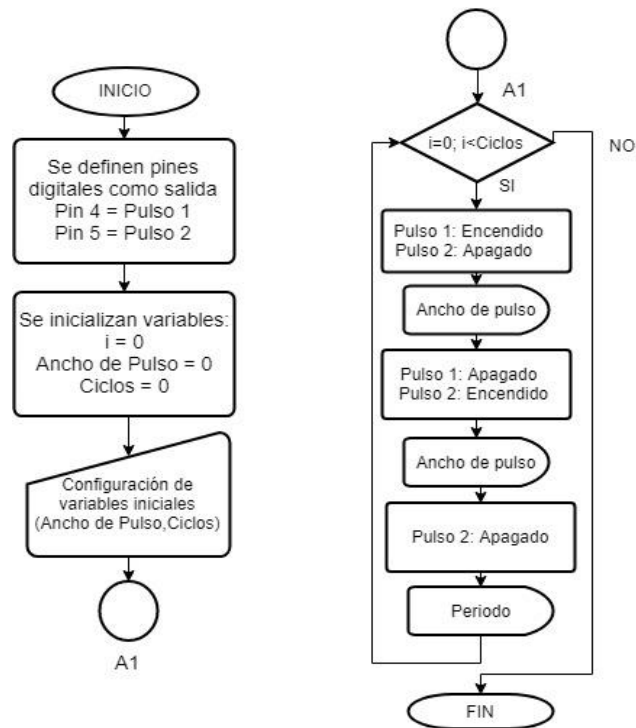


Figura 2. Diagrama de flujo de la configuración utilizada en arduino para la generación de pulsos con ancho de pulso y frecuencia variable.

Cada pulso (DAC1 y DAC2) se genera utilizando las salidas digitales del Arduino. Sin embargo, como DAC1 y DAC2 deben ser señales de voltaje de amplitud variable, para controlar la magnitud de la corriente, las salidas del Arduino se conectaron a un circuito auxiliar compuesto por un divisor de voltaje y un amplificador operacional en la configuración de seguidor de voltaje. Este circuito hizo posible controlar la magnitud del voltaje de DAC1 y DAC2 de 0 a 10 volts. La figura 3 muestra este circuito auxiliar. Además, para proteger al circuito propuesto, se realizó un circuito de aislamiento hecho por optoacopladores.

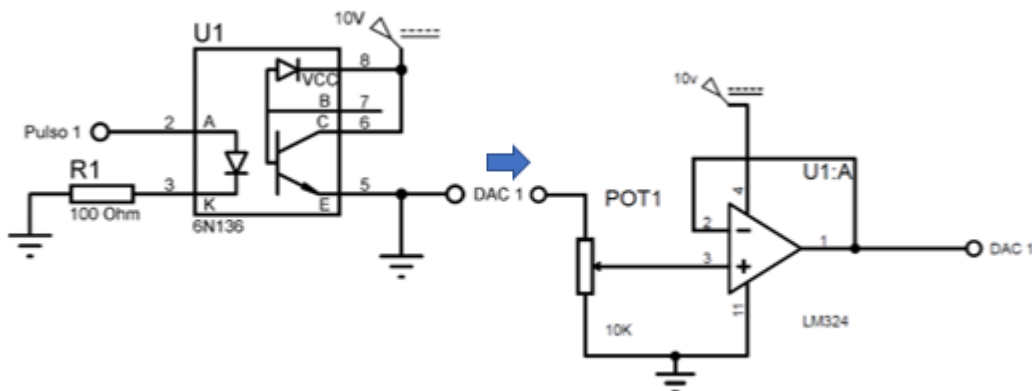


Figura 3. Etapa de aislamiento y controlador de voltaje

2.3 Medición en laboratorio de niveles de corriente y voltajes - Simulación

La simulación se llevó a cabo utilizando Proteus Design Suite® y NI Multisim® Ver 14.0. Proteus se usó para simular y mejorar el firmware en Arduino y para verificar si los pulsos se producían correctamente. La Figura 4 muestra la simulación de impulsos de 500 μ s de ancho y 50 Hz generados por el programa hecho en Arduino.

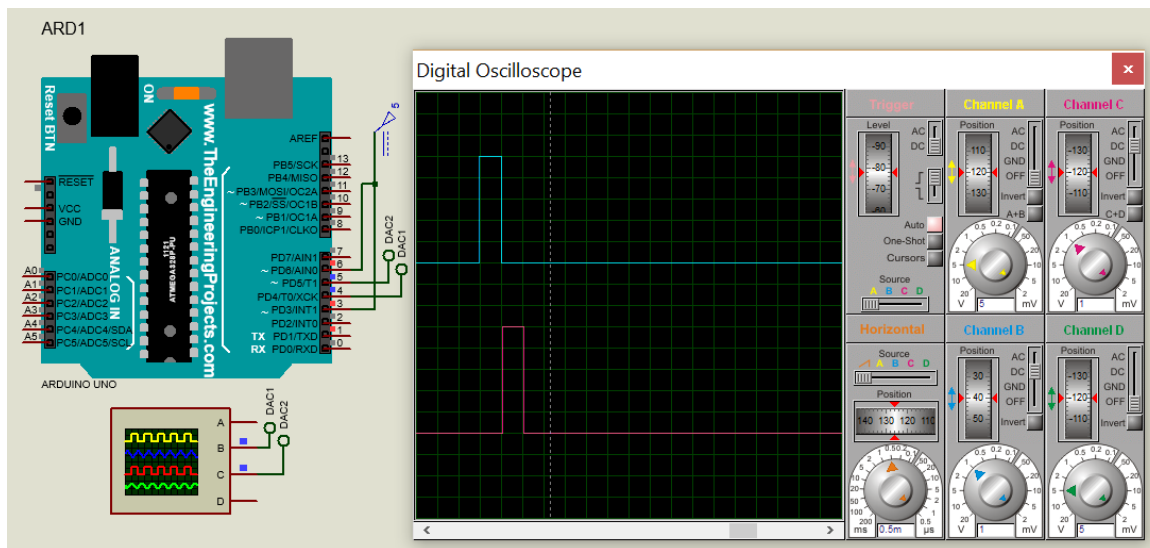


Figura 4. Generación de impulsos de control complementarios usando Arduino (DAC1 y DAC2).

Para la etapa de potencia, el circuito diseñado se simuló con Multisim V14, debido a que Proteus tiene un bajo desempeño simulando circuitos análogos. Sin embargo, Multisim no tiene la capacidad de simular microcontroladores como el integrado en la placa Arduino por lo cual se implementaron los interruptores S1 y S2 que emulan los pulsos generados por la placa Arduino. El circuito utilizado para la simulación se muestra en la Figura 5, este circuito fue diseñado en Multisim porque este programa presenta una mayor exactitud en la simulación. Se usó la FAV de 200 VCD como fuente de alimentación principal para el circuito propuesto.

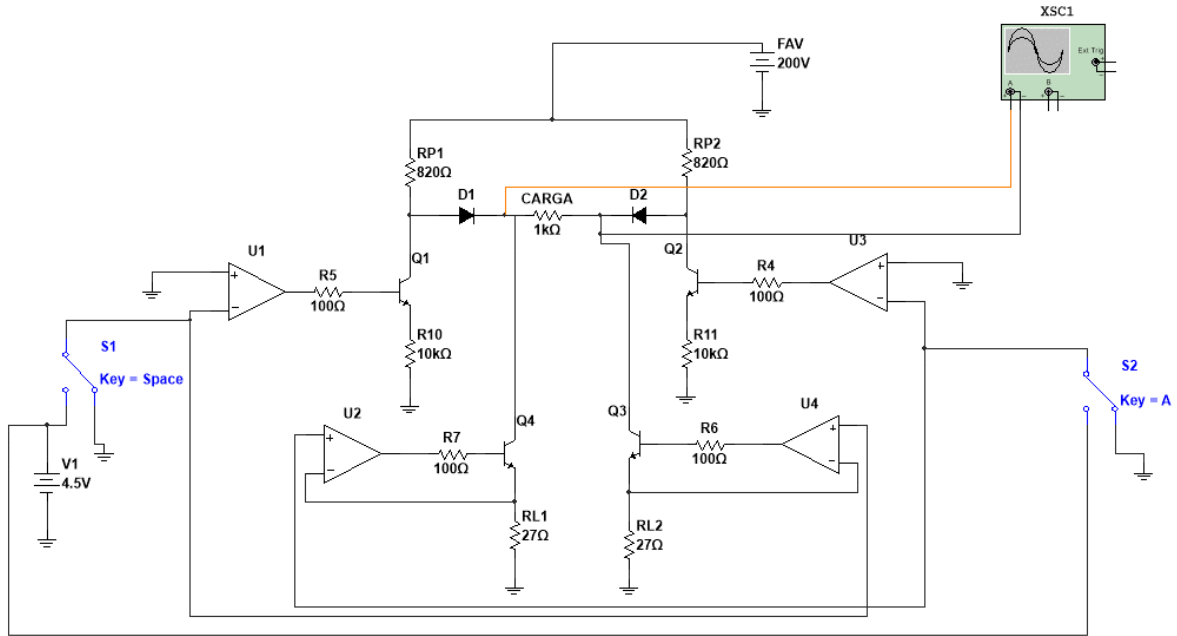


Figura 5. Circuito de simulación de la etapa de potencia.

2.4 Seguridad Eléctrica

El diseño de la etapa de potencia está basado en el estándar IEC 60601-1, el cual establece los requisitos generales para seguridad básica y rendimiento esencial de equipos médicos eléctricos. Sin embargo, como ya se mencionó antes, la etapa de potencia desarrollada en este trabajo es sólo un módulo que forma parte de un sistema de estimulación propuesto y que se desarrolla en el Instituto Nacional de Rehabilitación LGII (INR LGII), cuyo objetivo es a usar ambas técnicas (EEF y EEMT) simultáneamente o en secuencias experimentales separadas, con el objetivo de poder mejorar la rehabilitación del miembro superior en pacientes con secuelas ocasionadas por un EVC. Con la finalidad, de obtener un módulo de potencia que cumpla criterios de seguridad eléctrica, se diseñaron elementos electrónicos de protección de seguridad basados en el estándar de seguridad IEC 60601-1. Teniendo en cuenta que, estas medidas brindan seguridad al usuario de la etapa de potencia desarrollada en el presente trabajo y que más adelante, cuanto se integre todos los módulos del sistema de estimulación se requerirá medidas de seguridad eléctricas adicionales.

2.4.1 Elementos electrónicos de protección

Se definieron 4 elementos electrónicos, los cuales brindan seguridad eléctrica a la etapa de potencia, y principalmente al usuario (ver figura 6). El primero de estos elementos es un optoacoplador 6N136 de alta velocidad de respuesta con

un aislamiento de 5300 Vrms, el cual se encuentra en la etapa de aislamiento (área delimitada de color azul), esta recibe las señales de control generadas de la tarjeta de desarrollo Arduino, permitiendo la comunicación entre la etapa de control y la etapa de potencia, este elemento brinda seguridad eléctrica a ambas etapas. El segundo elemento, es una fuente de alto voltaje aislada (FAV - 12QP200), con un aislamiento de 2500 Vrms, con este elemento se brinda seguridad eléctrica al usuario y a la etapa de potencia (área delimitada de color verde). El tercero, con el fin de evitar corrientes de retorno se colocaron diodos rectificadores (1N4004) a la salida de cada rama del puente H, estos diodos brindan seguridad a la etapa de potencia (sección delimitada de color rojo). Como elemento final de protección, se colocó un diodo rectificador (1N4004) a la tierra de la FAV para evitar el acoplamiento de ruido conductivo entre las fuentes de alimentación del sistema y evitar en cierto escenario la aplicación de una corriente de estimulación desconocida (área delimitada de color naranja). Adicionalmente, a estos circuitos de seguridad, el diseño permite que todo el circuito sea alimentado por baterías (área delimitada de color café) lo que provee un aislamiento tipo F a la etapa de potencia. Teniendo esto en cuenta se consideró que, para prevenir cualquier situación de riesgo, como un corto circuito por conectar las baterías con la polaridad invertida, también se planea integrar en el prototipo físico, otro elemento de seguridad, como lo es, un circuito de protección para prevenir conexiones de baterías con polaridad invertida.

Figura 6. Elementos de seguridad de la arquitectura de la etapa de potencia

3. Resultados

En la Tabla 1 se muestran los valores de la corriente medidos en la resistencia de carga del circuito en la Figura 5. La Figura 7 representa la tendencia de la magnitud de corriente alcanzada en relación con el control de voltaje variable diseñado. Se puede observar que el circuito diseñado responde linealmente con la entrada. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de pulso bifásico generado en la resistencia de carga. Se puede observar que el circuito propuesto es capaz de controlar la magnitud del pulso, así como también, el ancho del pulso dependiendo del valor de voltaje que se encuentra en las señales de control DAC1 o DAC2. En la Figura 9, la Figura 10 y la Figura 11 se muestra el rango de trabajo del circuito propuesto en base a las características de diseño, el sistema se simuló de 1 a 150 Hz y de 50 a 500 μ s de ancho con un buen rendimiento, los pulsos en color violeta y azul representan las señales de entrada (DAC1 y DAC2) respectivamente, cada uno de ellos mostrados en un rango de voltaje de 0 a 10 V.

No. de Prueba	Amplitud del pulso (V)	Corriente obtenida (mA pico-pico)
1	0.5	11
2	1	20
3	1.5	34
4	2	46
5	2.5	57
6	3	69
7	3.5	80
8	4	88
9	4.5	100
10	5	114
11	5.5	126
12	6	138
13	6.5	150
14	7	162
15	7.5	174
16	8	186
17	8.5	198
18	9.5	210

Tabla 1. Voltaje (DAC1 y DAC2) vs Corriente

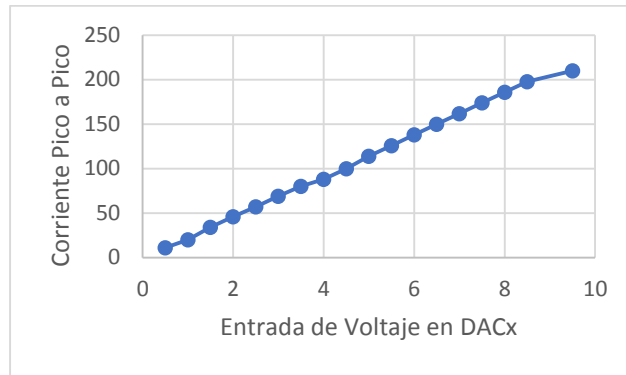


Figura 7. Tensión de entrada VS corriente en la carga, donde DACx representa a la variable DAC1 o DAC2.

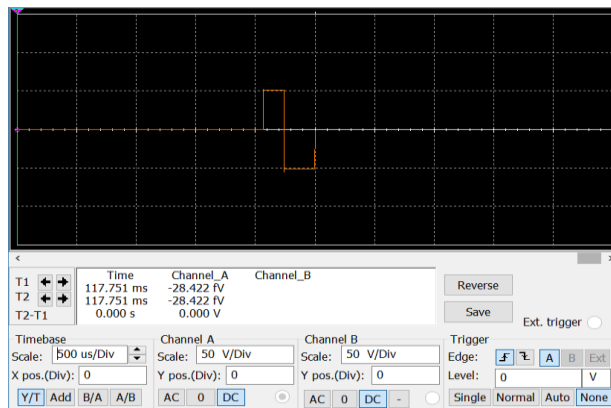


Figura 8. Pulsos bifásicos con amplitud de 100 V pico-pico generados en Multisim

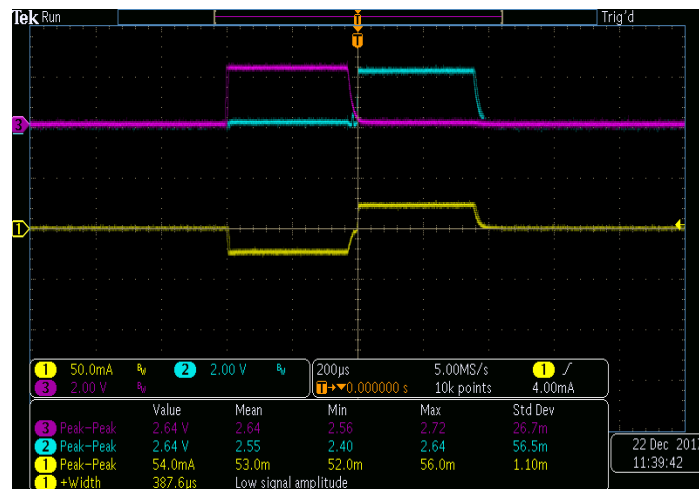


Figura 9. Pulso bifásico 350 μ s, 100 Hz, 54 mA.

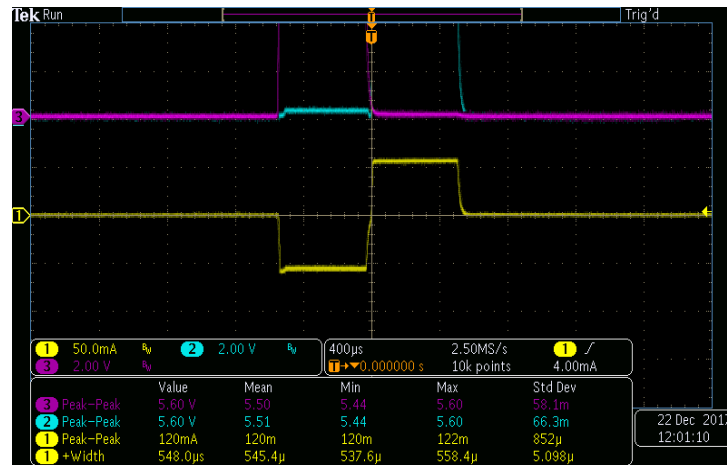


Figura 10. Pulso bifásico 500 μ s, 50 Hz, 120 mA.

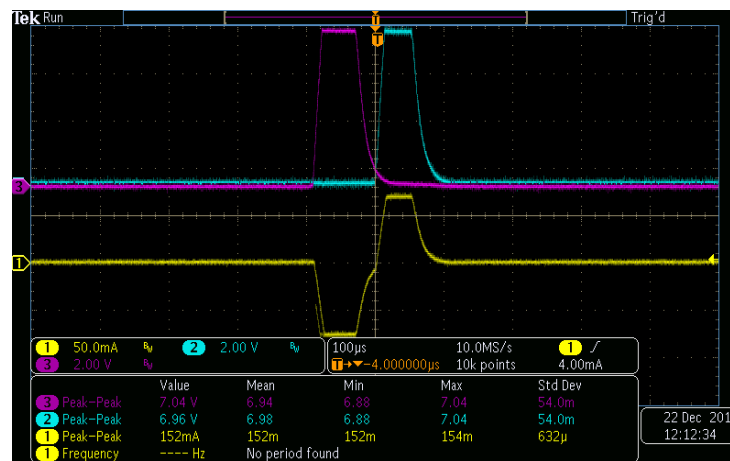


Figura 11. Pulso bifásico 50 μ s, 100 Hz, 152 mA.

4. Discusión

Estimuladores desarrollados por Simcox et al. (Simcox et al., 2004) y Ambrosio et al. (Ambrosio et al., 2015) lograron obtener 200 V y 6.25mA. Sin embargo, de acuerdo con (Cogiamanian et al., 2012; Danner et al., 2016; Hofstoetter, Freundt, Binder, & Minassian, 2018; Inanici et al., 2018; Priori, Ciocca, Parazzini, Vergari, & Ferrucci, 2014), para usar EEMT, se requiere una corriente constante de 0.1 mA a 10 mA durante aproximadamente 10 ~ 30 minutos, por lo tanto, ambos diseños son limitados y no son capaces de realizar EEF y EEMT en un solo módulo, como el trabajo desarrollado en este artículo. El presente trabajo, presenta un control de corriente de configuración simple basado en la amplitud de voltaje. Esto permite generar varias formas de onda basadas en los pulsos de control. La principal diferencia entre este diseño y otro reportado en la literatura es la simplicidad del diseño, la estabilidad de la señal y la linealidad de

la corriente de salida frente a los pulsos de voltaje que controlan la magnitud de corriente. Teniendo en cuenta que este trabajo solo presenta el diseño y la simulación, los resultados muestran la viabilidad del diseño. Actualmente, este diseño se está construyendo físicamente para realizar pruebas experimentales adicionales. El sistema presentado se simuló de 1 a 150 Hz y de 50 a 500 μ s, sin presentar problemas de inestabilidad.

Respecto a la seguridad eléctrica el trabajo aquí presentado cuenta con buenas características de seguridad como lo son la FAV aislada, los diodos rectificadores y el aislamiento tipo F, brindado por las baterías con las que se alimentan todo el circuito, que lo hacen más seguro para los usuarios. El uso de la FAV aislada, es una característica que distingue a este trabajo por su seguridad al brindar estimulación con altos niveles de corriente a los pacientes y que, en caso de una falla por parte de la FAV, el paciente estaría seguro de cualquier descarga eléctrica. Es importante también resaltar que el trabajo aquí presentado es un prototipo, el cual está sujeto a posibles modificaciones por su acoplamiento con los diversos módulos que integran el proyecto. Se debe tener en consideración que se deben realizar más pruebas de seguridad eléctrica una vez que se hayan integrado físicamente todos los módulos que propone el proyecto global. Además, se deben realizar pruebas piloto y de caracterización de todo el sistema antes de aplicar las estimulaciones en pacientes.

5. Conclusión

En este trabajo se presenta un novedoso circuito electrónico capaz de generar impulsos bifásicos que controlan la corriente en la carga de 0 a 210 mA pico a pico, el control de corriente se logra de forma sencilla variando la amplitud de los pulsos de control DAC1 y DAC2. Este diseño permitirá generar formas de onda de estimulación eléctrica de tipo EEF y EEMT simultáneamente o en secuencias experimentales separadas, que serán utilizadas en un protocolo piloto de investigación en el Instituto Nacional de Rehabilitación LGII, con el objetivo de mejorar la rehabilitación del miembro superior en pacientes con secuelas ocasionadas por un EVC.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por su apoyo al Proyecto CONACYT-SALUD-2016-1-272983.

Referencias

Alonso Serrano, P. D. (2015). Electroestimulador de seis canales para el tratamiento de la vejiga neurogénica (Maestria). Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México.

Ambrosio, R., Borunda, J., Sifuentes, E., Heredia, A., Guerrero, F., & González, V. R. (2015). Prototipo de Estimulación Funcional Eléctrica (FES) inalámbrico y de corriente constante para rehabilitación de extremidades. Recuperado de http://www-optica.inaoep.mx/~tecnologia_salud/2015/memorias/pdf/MyT2015_55_E.pdf

Boletín UNAM-DGCS-619. (2015, octubre). Hipertensos y diabéticos, más propensos a desarrollar la enfermedad vascular cerebral. Recuperado de http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2015_619.html

Cogiamanian, F., Ardolino, G., Vergari, M., Ferrucci, R., Ciocca, M., Scelzo, E., ... Priori, A. (2012). Transcutaneous Spinal Direct Current Stimulation. *Frontiers in Psychiatry*, 3. <https://doi.org/10.3389/fpsy.2012.00063>

Danner, S. M., Krenn, M., Hofstoetter, U. S., Toth, A., Mayr, W., & Minassian, K. (2016). Body Position Influences Which Neural Structures Are Recruited by Lumbar Transcutaneous Spinal Cord Stimulation. *PloS one*, 11(1), e0147479.

Derungs, A., Dietrich, C., & Hunt, K. J. (2013). A Wireless Functional Electrical Stimulation System. *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik*. <https://doi.org/10.1515/bmt-2013-4022>

Geografía (INEGI), I. N. de E. y. (2010, enero 1). Discapacidad. Recuperado de <http://www.beta.inegi.org.mx/temas/discapacidad/>

Hofstoetter, U. S., Freundi, B., Binder, H., & Minassian, K. (2018). Common neural structures activated by epidural and transcutaneous lumbar spinal cord stimulation: Elicitation of posterior root-muscle reflexes. *PLOS ONE* 13(1): e0192013. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192013>

Inanici, F., Samejima, S., Gad, P., Edgerton, V. R., Hofstoetter, C., & Moritz, C. T. (2018). Transcutaneous Electrical Spinal Stimulation Promotes Long-Term Recovery of Upper Extremity Function in Chronic Tetraplegia. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2834339>.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). "Estadísticas A Propósito Del Día De Muertos" (2 de noviembre). México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/saladeprensa/aproposito/2017/muertos2017_Nal.pdf

Lu, D. C., Edgerton, V. R., Modaber, M., AuYong, N., Morikawa, E., Zdunowski, S., ... Roy, R. R. (2016). Engaging cervical spinal cord networks to reen able volitional control of hand function in tetraplegic patients. *Neurorehabilitation and neural repair*, 30(10), 951–962.

Montañana Grau, R. (2014). Desarrollo de un estimulador eléctrico programable para el entrenamiento de corazones bioartificiales (Licenciatura). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València.

Organización Mundial de la Salud. (2011). Resumen informe mundial sobre la discapacidad. Ginebra Suiza: Organizacion Mundial de la Salud. Recuperado de http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/accessible_es.pdf

Priori, A., Ciocca, M., Parazzini, M., Vergari, M., & Ferrucci, R. (2014). Transcranial cerebellar direct current stimulation and transcutaneous spinal cord direct current stimulation as innovative tools for neuroscientists. *The Journal of Physiology.*, 592(Pt 16), 3345–3369. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2013.270280>

Ruiz Sandoval, J. L. (2014). Costos de la Enfermedad Vascular Cerebral en México – Asociación Mexicana de Enfermedad Vascular Cerebral, A.C. Recuperado el 23 de enero de 2018, de <http://amevasc.mx/costo-de-la-enfermedad-vascular-cerebral-en-mexico/>

Simcox, S., Davis, G., Barriskill, A., Middleton, J., & others. (2004). A portable, 8-channel transcutaneous stimulator for paraplegic muscle training and mobility- A technical note. *Journal of rehabilitation research and development*, 41(1), 41.

Tu, X., Han, H., Huang, J., Li, J., Su, C., Jiang, X., & He, J. (2017). Upper Limb Rehabilitation Robot Powered by PAMs Cooperates with FES Arrays to Realize Reach-to-Grasp Trainings [Research article]. <https://doi.org/10.1155/2017/1282934>

Vafadar, A. K., Côte, J. N., & Archambault, P. S. (2015). Effectiveness of Functional Electrical Stimulation in Improving Clinical Outcomes in the Upper Arm following Stroke: A Systematic Review and Meta-Analysis [Research article]. Recuperado de <https://www.hindawi.com/journals/bmri/2015/729768/>

Veloz Centeno, J. R. (2016). Diseño y construcción de un electroestimulador para generar movimientos musculares funcionales en músculo inervado y denervado (Licenciatura). Instituto Politécnico Nacional, Unidad Profesional Interdisciplinaria De Biotecnología. Recuperado de <http://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/18732/TesisElectroestimulador.pdf?sequence=1>

Wu, H.-C., Young, S.-T., & Kuo, T.-S. (2002). A versatile multichannel direct-synthesized electrical stimulator for FES applications. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 51(1), 2–9.

Notas Biográficas

Alejandro E. Leyva Gutiérrez es estudiante de la Facultad de Medicina, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del estado de México, desarrolló una estancia de investigación en el Instituto Nacional de Rehabilitación LGII, en donde desarrolló la etapa de potencia de una neuroprótesis, sus áreas de interés en investigación son control, electrónica e instrumentación. Actualmente realiza su servicio social en el Centro Oncológico Estatal ISSEMyM en el departamento de ingeniería biomédica.

Ignacio Hernández Popo Recibió el título de ingeniero en electrónica del Instituto Tecnológico de Veracruz, la maestría en bioelectrónica del CINVESTAV-IPN y el grado de Doctorado en Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Tokio, Japón en el año 2012. Actualmente es investigador de Cátedras CONACyT en la Subdirección de Investigación Tecnológica, en el departamento de Desarrollo Tecnológico en el Instituto Nacional de Rehabilitación LGII. Sus intereses de investigación se encuentran en las áreas de Rehabilitación, Estimulación Eléctrica Funcional, Electrofisiología Cardíaca y Neurorehabilitación.

Rigoberto Martínez Méndez recibió el título de ingeniero en electrónica del Instituto Tecnológico de Apizaco, la maestría en bioelectrónica del CINVESTAV-IPN y el Doctorado en Biomédica de la Universidad de Chiba en Japón. Actualmente es profesor investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México. Sus principales intereses de investigación son la estimulación eléctrica, el diseño y desarrollo de dispositivos médicos no invasivos para diagnóstico y rehabilitación.

Pedro-David Alonso Serrano Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias por el Cinvestav en 2015, especializándose en investigación Bioelectrónica. Actualmente trabaja en Ford Motor Company desde 2016 en Desarrollo de Producto, ha participado en los equipos de Program Management y Benchmarking, ha contribuido en el desarrollo de procesos y en la mejora de los existentes, así mismo ha sido coordinador de la Semana de Entrenamiento (un congreso interno) para la región Norteamérica (México, Estados Unidos y Canadá). Pedro posee experiencia en el mapeo en CAD de líneas de distribución y sistemas de almacenamiento de hidrocarburos, ha colaborado con Diavaz dibujando parte del sistema de distribución de la Terminal Marítima Dos Bocas

de PEMEX. Ha trabajado en consultoría para Veyron, enfocándose en capacitaciones en SolidWorks para la academia.



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 2.5 México.