

Vol.8 Num,1

ISSN: 2007-5448

RECIBE

Revista electrónica
DE COMPUTACIÓN, INFORMÁTICA, BIOMÉDICA Y ELECTRÓNICA



Índice

Computación e Informática

Gamificación para la mejora de procesos en ingeniería de software: Un estudio exploratorio. C1

Raúl Antonio Aguilar Vera, Erika E. Briceño Arceo, Julio C. Díaz Mendoza, Juan P. Ucán Pech

Hacia la definición de una arquitectura empresarial de referencia en el contexto municipal C2

Daniela Nicole Gallegos Baeza, María Angélica Caro Gutiérrez, Alfonso Rodríguez Ríos

Hacia una propuesta de heurísticas de usabilidad para pruebas de HCI y de UX para niños con discapacidad auditiva: Caso de estudio C3

Gerardo Cruz González, Carlos Alberto Fernández y Fernández, Felipe de Jesús Trujillo Romero

Prototipo de interfaz humano-computadora controlada a través de gestos faciales C4

Fernando Octavio Reynoso Martínez, María Antonieta Abud Figueroa, Silvestre Gustavo Peláez Camarena, Lisbeth Rodríguez Mazahua, Ulises Juárez Martínez

Análisis comparativo de la complejidad cognitiva de la gestión de proyecto en el desarrollo de software en la iso/iec 29110-5-1-2 y la guía de los fundamentos para la dirección de proyectos del pmi C5

Edinson Damian, Abraham Dávila Ramón

Hacia una metodología para el diseño de contratos inteligentes

C6

Carlos Omar Solis, Elizabeth Pérez Cortés, Humberto Cervantes Maceda

Estimación del esfuerzo de proyectos de software con algoritmos de aprendizaje de máquinas

C7

Jesús Iván Saavedra Martínez, María Guadalupe Elena Ibargüengoitia González, Gibran Fuentes Pineda

Electrónica

Análisis del desempeño de sistema de detección de señal SSVEP utilizando clasificadores árbol simple y máquina de vectores de soporte

E1

Alma Delia Corral Sáenz, Raul Rangel González, Mario Ignacio Chacón Murguía

Los hexapuertos y la reflectometría, fundamentos y aplicaciones

E2

Gerardo Hernández Veliz, Marco Antonio Gurrola Navarro, Carlos Alberto Bonilla Barragán, José Martín Villegas González, Agustín Santiago Medina Vázquez

Biomédica

Diseño de una prótesis de mano para uso en teclados con interfaz sEMG

B1

Ernesto Eduardo Lopez Lopez, Rigoberto Martínez Méndez, Adriana H. Vilchis González

Gamificación para la Mejora de Procesos en Ingeniería de Software: Un estudio exploratorio.

Gamification for Improvement of Processes in Software Engineering: An exploratory study.

Erika E. Briceño Arceo¹
a17016396@alumnos.uady.mx

Raúl A. Aguilar Vera¹
avera@correo.uady.mx

Julio C. Díaz Mendoza¹
julio.diaz@correo.uady.mx

Juan P. Ucán Pech¹
juan.ucan@correo.uady.mx

¹ Facultad de Matemáticas, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, Yucatán, México.

Resumen: En este artículo se presentan los resultados de una Revisión Sistemática de la Literatura realizada para identificar y caracterizar estudios primarios que incorporan elementos de gamificación, tanto para los procesos vinculados con el ámbito de la Educación en Ingeniería de Software, como con los relacionados con la industria del software. Los resultados obtenidos muestran que existen diversos trabajos en los que los principios de la gamificación han sido utilizados como estrategia para promover mejoras; no obstante, la mayoría se encuentran en el ámbito de la educación. En el caso de los elementos de gamificación utilizados con mayor frecuencia en los estudios analizados, los tres más citados son: puntos, niveles, e insignias. Por otro lado, pudimos también observar que muchas de las iniciativas reportadas, incorporan el uso de una aplicación software para apoyar la dinámica instruccional.

Palabras clave: Gamificación, Ingeniería de Software, Revisión Sistemática de la Literatura.

Abstract: This paper presents the results of a Systematic Literature Review carried out to identify and characterize primary studies that incorporate elements of gamification, both for processes related to the field of Software Engineering Education, and those related to the industry of the software. The results obtained show that there are several works in which the principles of gamification have been used as a strategy to promote improvements; however, most are in the field of education. In the case of the gamification elements used most frequently in the studies analyzed, the three most cited are: points, levels, and badges. On the other hand, we could also observe that many of the initiatives reported incorporate the use of a software application to support instructional dynamics.

Keywords: Gamification, Software Engineering, Systematic Literature Review.

1. INTRODUCCIÓN

Los elementos de la gamificación han sido utilizados en la última década para fomentar la motivación en diversos ámbitos de nuestra sociedad, particularmente, en los de índole educativo y laboral. El trabajo reportado en el presente artículo, forma parte de un proyecto de tesis para la Maestría en Ciencias de la Computación de la Universidad Autónoma de Yucatán; el trabajo tiene como propósito el Diseño de un Modelo Instruccional Configurable y Computable, que incorpore elementos de gamificación, el cual una vez implementado, pueda ser utilizado por profesores, como un Sistema de Gestión para configurar Entornos Virtuales de Aprendizaje, los cuales, posteriormente asistan a los estudiantes en su formación en Ingeniería de Software (IS). En el presente estudio secundario, se utiliza la Revisión Sistemática de la Literatura como metodología para identificar y caracterizar estudios primarios que incorporan elementos de gamificación, tanto para los procesos del ámbito educativo, como con los relacionados con la industria del software.

2. GAMIFICACIÓN

La gamificación es definida como el uso de elementos de diseño de juegos en contextos que no son juegos (Deterding, Dixon, Khaled, & Nacke, 2011) y puede ser concebida como una técnica de diseño que crea un juego, a través de una aplicación software, con el fin de mejorar la experiencia del usuario, lo que fomenta la aceptación del usuario (Hamari, Koivisto, & Sarsa, 2014).

En los últimos años, la gamificación ha despertado un creciente interés entre los académicos y profesionales en muchos campos, en particular, en el área de Tecnologías de la Información se ha utilizado para el desarrollo de sistemas y aplicaciones en diferentes dominios, con resultados positivos (Hamari et al., 2014; Kazhamiakin et al., 2015). De hecho, tanto las experiencias prácticas del mercado laboral, como los estudios reportados en la literatura, confirman que la gamificación puede ser útil en sectores heterogéneos, sobre todo, en actividades de colaboración, educación, movilidad urbana e Ingeniería de Software (Hamari et al., 2014).

Un aspecto de interés respecto de la gamificación radica en entender la mecánica que mantiene motivados a los usuarios para que vuelvan a la dinámica del sistema, y utilicen algunos constructos (vinculados con el dominio de aplicación) a entornos no relacionados con el juego, con el propósito de fomentar un compromiso similar (Berkling & Thomas, 2013).

Kapp, Blair, y Mesch (2014) comentan que es posible identificar dos tipos de estrategias instruccionales basadas en gamificación. El primer tipo es la gamificación estructural, la cual consiste en la aplicación de elementos del juego para impulsar a un alumno a través del contenido sin alteración ni cambios en el contenido; el segundo tipo de estrategia es denominada gamificación de contenido, consiste en aplicar los elementos del juego y el pensamiento del juego, para alterar el contenido y hacerlo más parecido a un juego (Kapp, Blair, & Mesch, 2014).

Entre los elementos que suelen incorporarse en escenarios basados en gamificación en el ámbito de la educación se encuentran: insignias, puntos, narración de historias, logros, niveles, barra de progreso y retroalimentación; también se suele usar una tabla de clasificación y métodos para seguir el proceso del aprendizaje, así como un componente social donde los alumnos o participantes pueden compartir sus logros con otros participantes (Kapp, Blair, & Mesch, 2014; Nah, Zeng, & Telaprolu, 2014).

3. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

La Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) es una metodología que permite identificar, evaluar e interpretar la investigación disponible en la literatura, que resulta relevante para una pregunta de investigación, área temática o fenómeno de interés. Los estudios individuales que contribuyen a una RSL se denominan estudios primarios, por lo que un estudio basado en una revisión sistemática es considerado un estudio secundario (Genero, Cruz-Lemus & Piattini, 2014). Para la realización de esta RSL se utilizó el protocolo de investigación formal que propone Kitchenham (2004).

A continuación, se describe brevemente cada uno de los pasos de dicha metodología:

1. Planificar la RSL.
 - 1.1. Identificar la necesidad de la revisión. Se trata de resumir cuidadosamente la información relevante que existe sobre el tema de interés, y así saber lo que han hecho sobre ese tema sobre todo las revisiones sistemáticas.
 - 1.2. Formular las preguntas de investigación. Es la parte más importante de la revisión sistemática, para saber lo que queremos buscar en los estudios primarios y responder las preguntas, por eso se deben ser bien planteadas; es decir, que sean claras y consistentes.
 - 1.3. Definir el protocolo de la revisión. Se plantean la justificación, las preguntas, las fuentes de búsquedas, estrategias de búsqueda, criterios de exclusión e inclusión y la evaluación de la calidad de los estudios.
 - 1.4. Validar el protocolo de la revisión. Debido a que el protocolo resulta el documento más crítico para la realización de la RSL, es necesaria su validación por expertos.
2. Realizar la RSL.
 - 2.1. Identificar la investigación relevante. Del conjunto de publicaciones, ver si responden las preguntas de investigación, con base en la estrategia de búsqueda que se propone en el protocolo.
 - 2.2. Seleccionar los estudios primarios. Proceso de localizar los estudios primarios que estén relacionados y den respuesta a las preguntas de investigación, con la ayuda de los criterios y procedimiento que se establece en el protocolo.
 - 2.3. Evaluar la calidad de los estudios primarios. De los estudios seleccionados, se procede a la aplicación de criterios para la corroboración de la calidad de los estudios y si es necesario excluir los que no cumplan con lo establecido.

- 2.4. Extraer los datos relevantes. Es el proceso de extraer la información de los estudios primarios.
- 2.5. Sintetizar los datos extraídos. Es el proceso de dar respuesta a las preguntas formuladas, esto puede estar acompañada de tablas y gráficos
- 3. Reportar la RSL.
 - 3.1. Redactar el informe de la revisión. El trabajo realizado mediante la RSL no tendría sentido si la información obtenida y analizada no es reportada y puesta a disposición de otros investigadores.
 - 3.2. Validar el informe de la revisión. Existen algunas amenazas a la validez del estudio que resulta necesario aplicar algún mecanismo para validar, tanto los estudios identificados, como su proceso de obtención.

4. PLANIFICACIÓN DEL ESTUDIO

Con el propósito de explorar las iniciativas en torno a procesos de IS, en los cuales se ha utilizado la gamificación como estrategia, se establecieron un conjunto de preguntas que orientan el estudio.

4.1 Preguntas de investigación

- PI1. ¿En qué áreas de la IS se han implementado estrategias de gamificación?
- PI2. ¿Cuáles de las iniciativas reportadas incluyen aplicaciones (herramientas) para asistir el proceso software?
- PI3. ¿Cuáles de las iniciativas reportadas se orientan a la mejora del proceso educativo en IS y cuales a la mejora del proceso software?
- PI4. ¿Cuáles son los elementos de la gamificación que han sido incorporados en las iniciativas reportadas?
- PI5. ¿Cuáles han sido los efectos de la gamificación en las iniciativas reportadas?

4.2 Selección de fuentes y estrategias de búsqueda

Una vez que se establecieron las preguntas, se prosiguió a identificar los estudios primarios para la revisión sistemática. Para la búsqueda de estos estudios se hizo en las siguientes bases de datos y editoriales científicas: *IEEE Xplore*, *ACM Digital Library* y *Scopus*, ya que estas bases de datos están relacionadas con el área de investigación y que podrían contener artículos relacionados con la Ingeniería de Software.

4.3 Creación de la cadena de búsqueda

La cadena de búsqueda se construyó mediante la combinación de palabras clave, las cuales se relacionan con la gamificación y con las áreas de conocimiento de la IS; se usó el operador OR para unir las palabras de un mismo bloque y el AND para separar los bloques de los temas. El resultado fue la cadena de búsqueda que se presenta a continuación.

("gamification" OR "gamified" OR "gamify" OR "gamifying") AND
("software engineering" OR "software process" OR "software

development" OR "software requirements" OR "software design" OR "programming" OR "coding" OR "software testing" OR "software implementation" OR "software verification" OR "software validation" OR "software maintenance" OR "software configuration management" OR "software engineering management" OR "software configuration" OR "software quality")

4.4 Criterios de inclusión y de exclusión

Los criterios de inclusión y exclusión nos permiten reducir el número de resultados para concentrarnos en el análisis de los estudios primarios de nuestro interés. A continuación, mencionamos los criterios que se aplicaron para la selección de los estudios primarios que pueden ser candidatos elegidos. Los criterios que se tomaron en cuenta para la selección de los estudios primarios son los siguientes:

Criterios de inclusión:

1. Que el título del estudio primario contenga al menos una palabra de cada uno de los dos conjuntos que integran la cadena de búsqueda, específicamente, los vinculados con gamificación e IS.
2. Que el resumen tenga relación con la implementación de la gamificación en el área de la disciplina de la Ingeniería de Software y que sus palabras clave coincidan con las que se utilizan en cadena de búsqueda.
3. Que los estudios primarios tengan un contexto vinculado con la IS y la gamificación.
4. Que los estudios primarios hayan sido reportados entre 2010 y 2018.

Criterios de exclusión:

1. El mismo estudio en más de una base de datos, seleccionar el que pertenece a la base de datos que ofrezca mayor información del mismo.
2. Artículos de un mismo estudio que reporten avances parciales, considerar el más reciente.
3. Que el contexto del estudio no esté relacionado con lo que se está investigando.
4. Estudios cuyo texto completo no es accesible.
5. Estudios que se encuentren en un idioma diferente al inglés o al español.

5. EJECUCIÓN DEL ESTUDIO

De acuerdo con la cadena de búsqueda y las bases de datos seleccionadas, se realizó el proceso de consulta. Cabe mencionar que, durante la consulta a las Bases de Datos, la cadena de búsqueda no se modificó para el buscador de IEEE Xplore y el de ACM Digital Library, pero para el buscador de Scopus se

tuvo que dividir la cadena en dos, debido a que el buscador de éste está limitado a un número máximo de caracteres, por lo tanto, la cadena quedo de la siguiente manera:

Cadena 1:

("gamification" OR "gamified" OR "gamify" OR "gamifying") AND ("software engineering" OR "software process" OR "software development" OR "software requirements" OR "software design" OR "programming" OR "coding" OR "software testing")

Cadena 2:

("gamification" OR "gamified" OR "gamify" OR "gamifying") AND ("software implementation" OR "software verification" OR "software validation" OR "software maintenance" OR "software configuration management" OR "software engineering management" OR "software configuration" OR "software quality").

Para la selección de los estudios primarios después de realizar la ejecución de la cadena de búsqueda en cada una de las bases de datos establecidas anteriormente en esta investigación, se establecieron dos filtros tomando en cuenta los criterios de inclusión y de exclusión; en primer lugar, se consideraron el primer y cuarto criterio de inclusión; y para un segundo filtrado, se usaron los demás criterios de inclusión y exclusión. En la Tabla 1 se lista el número de trabajos encontrados en cada una de las Bases de Datos en los tres momentos de proceso de ejecución.

Tabla 1. Resultado de la búsqueda

Base de datos	Resultados	1er Filtrado	2do Filtrado
IEEE Xplore	164	54	17
ACM	11	15	4
Scopus	601	8	3
Total			24

En las Tablas 2, 3 y 4 se citan de los trabajos analizados en el estudio, provenientes de cada una de las tres Bases de datos consultadas.

Tabla 2. Trabajos analizados de la base de datos de ACM

Cita	Título
------	--------

Fernández-Reyes, Clarke, & Hornbach (2018)	The impact of opt-in gamification on students' grades in a software design course.
Fraser, Gambi, & Rojas (2018)	A Preliminary Report on Gamifying a Software Testing Course with the Code Defenders Testing Game.
Hof, Kropp, & Landolt (2017)	Use of Gamification to Teach Agile Values and Collaboration
Snipes, Nair, & Murphy-Hill (2014)	Experiences gamifying developer adoption of practices and tools.

Tabla 3. Trabajos analizados de la base de datos de IEEE

Cita	Título
Akpolat & Slany (2014)	Enhancing software engineering student team engagement in a high-intensity extreme programming course using gamification.
Arai, Sakamoto, Washizaki, & Fukazawa (2014)	A gamified tool for motivating developers to remove warnings of bug pattern tools.
Badihi & Heydarnoori (2017)	CrowdSummarizer: Automated Generation of Code Summaries for Java Programs through Crowdsourcing.
Berkling & Thomas (2013)	Gamification of a software engineering course and a detailed analysis of the factors that lead to it's failure.
Carreno-Leon, Sandoval-Bringas, Alvarez-Rodriguez, & Camacho-Gonzalez (2018)	Gamification technique for teaching programming.
Diniz, Silva, Gerosa, & Steinmacher (2017)	Using gamification to orient and motivate students to contribute to oss projects.
Fuchs & Wolff (2016)	Improving programming education through gameful, formative feedback.
Kemell et al. (2018)	Gamifying the Escape from the Engineering Method Prison.
Laskowski (2015)	Implementing gamification techniques into university study path - A case study.

Marques, Costa, Mira Da Silva, & Gonçalves (2017)	Gamifying software development scrum projects.
Matsubara & Silva (2017)	Game Elements in a Software Engineering Study Group: A Case Study.
Maxim, Brunvand, & Decker (2017)	Use of role-play and gamification in a software project course
Mi, Keung, Mei, Xiao, & Chan (2018)	A Gamification Technique for Motivating Students to Learn Code Readability in Software Engineering.
Parizi (2016)	On the gamification of human-centric traceability tasks in software testing and coding.
Regalado, Aranha, & Da Silva (2016)	Gamifying an online approach for promoting game development Learning and contest: An experience report.
Rojas, White, Clegg, & Fraser (2017)	Code Defenders: Crowdsourcing Effective Tests and Subtle Mutants with a Mutation Testing Game.
Souza, Constantino, Veador, & Figueiredo (2017)	Gamification in Software Engineering Education: An Empirical Study.

Tabla 4. Trabajos analizados de la base de datos de Scopus

Cita	Título
Guarino, Guarino, Oliveira, Guimarães, & Ayres (2018)	Gamification Applied in the Teaching of Agile Scrum Methodology.
Santos & Oliveira (2018)	Gamification and Evaluation the Use of the Function Points Analysis Technique in Software Quality Subjects
Unkelos-Shpigel (2016)	Peel the Onion: Use of Collaborative and Gamified Tools to Enhance Software Engineering Education.

RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos del estudio, los cuales nos permiten conocer el panorama del uso de la gamificación en iniciativas vinculadas con procesos de Ingeniería de Software, las áreas de la disciplina en la que han implementado, lo anterior, tanto en el ámbito educativo, como en el de la práctica profesional. A continuación, se proseguirá a responder las respuestas a las preguntas investigación que fueron planteadas en la presente revisión sistemática de la literatura.

PI1. ¿En qué áreas de la Ingeniería de Software se han implementado estrategias de gamificación?

De los estudios primarios elegidos se identificaron las áreas de Ingeniería de Software en las que se implementaron estrategias de gamificación. En la figura 1 se puede observar que en el área citada como “desarrollo de software” es donde más iniciativas con estrategias de gamificación se han implementado; por otro lado, también notamos que varios estudios involucran diversas áreas, por lo que no es posible ubicarlos en una sola, éstos se contabilizaron en una genérica denominada “Ingeniería de Software”.

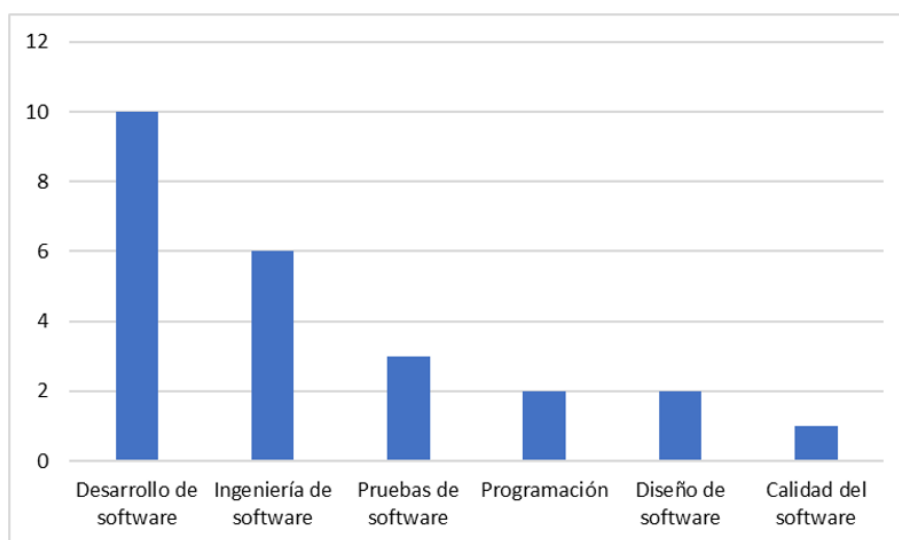


Figura 1. Áreas de la IS en la que se encontraron iniciativas

PI2. ¿Cuáles de las iniciativas reportadas incluyen aplicaciones (herramientas) para asistir el proceso software?

Dentro de los resultados de los estudios primarios elegidos se hizo una clasificación, la cual consistía en dividir en dos grupos los estudios, en el primero usaron alguna herramienta tecnológica (aplicación) que podría existir o que hayan elaborado para su estudio, y en el segundo grupo están los que usaron estrategias de la gamificación, sin el uso de alguna herramienta tecnológica de apoyo. Se observó que los estudios de que están en el segundo grupo usaron dinámicas dentro del salón de clases sin uso de herramientas tecnológicas. En el caso del primer grupo la mayoría realizó su propia herramienta, la cual eran aplicaciones web o página web. En cambio, otros usaron aplicaciones existentes como el Moodle que modificaron y agregaron los componentes que iban a usar. Observamos que el 70% de estos estudios sí usaron una aplicación para implementar la gamificación y realizar sus pruebas a sus individuos.

PI3. ¿Cuáles de las iniciativas reportadas se orientan a la mejora del proceso educativo IS y cuales a la mejora del proceso software?

De los estudios primarios obtenidos se clasificaron de acuerdo con el ámbito de la iniciativa; por un lado, se analizaron las iniciativas del ámbito educativo, es decir, la que son para cuestiones de enseñanza y/o aprendizaje de temas sobre la Ingeniería de Software, y por otro lado fueron analizadas las iniciativas vinculadas con la práctica profesional (ámbito laboral). También se tuvo un estudio que reporta aspectos tanto para el ámbito educativo como para el laboral. En la figura 2 se ilustra una comparativa del número de estudios primarios de acuerdo con su ámbito.

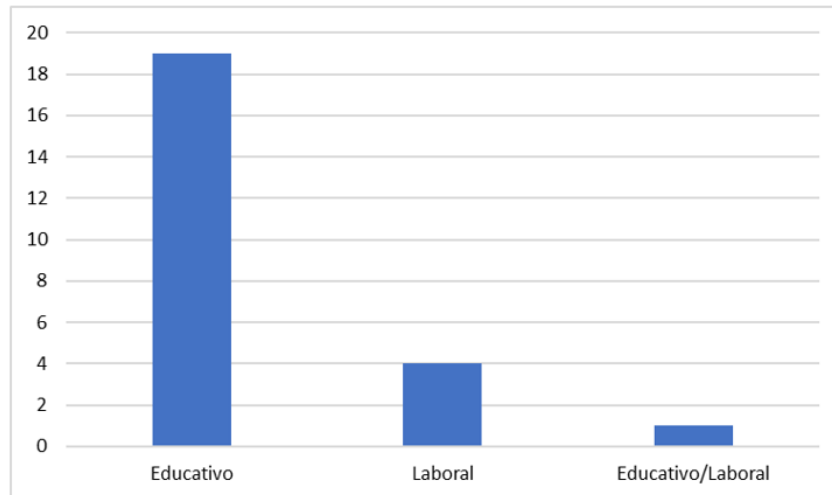


Figura 2. Ámbito de la iniciativa

PI4. ¿Cuáles son los elementos de la gamificación que han sido incorporados en las iniciativas reportadas?

En la figura 3 se puede identificar que los elementos de gamificación más utilizados en las iniciativas reportadas, es el uso de puntos, seguido por el uso de niveles y en tercer lugar el uso de una tabla de posiciones.

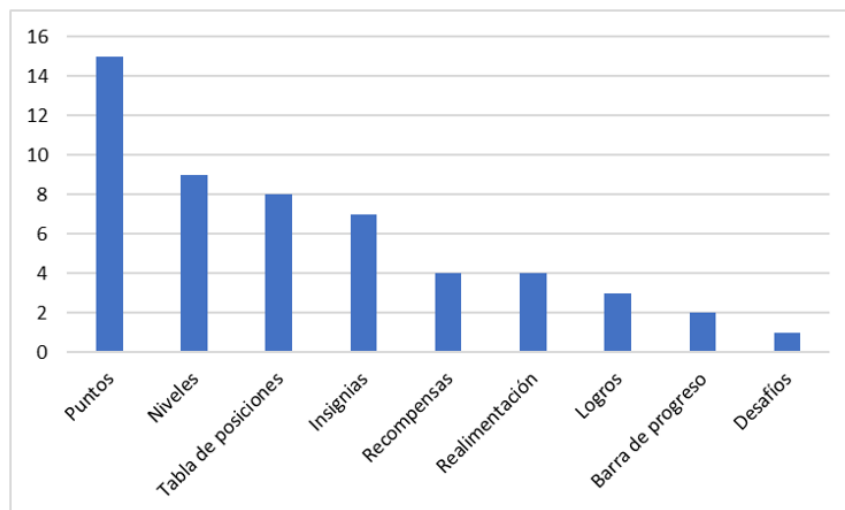


Figura 3. Elementos de Gamificación utilizados

Del análisis de los estudios primarios seleccionados, se pudo identificar que aquellos en los que se usaron estos tres elementos, se notó un resultado positivo en su implementación.

PI5. ¿Cuáles han sido los efectos de la gamificación en las iniciativas reportadas?

En cuanto a los efectos reportados en las iniciativas que implementaron los elementos de la gamificación, no se especifica el detalle del tipo de efecto, sin embargo, es posible identificar que resultaron positivos para la mejora del proceso en la mayoría de los estudios. Los estudios reportan encuestas administradas luego de haber implementado las iniciativas, como mecanismo de validación, y en la mayoría los participantes reportan que les había gustado y motivado participar en dichas iniciativas.

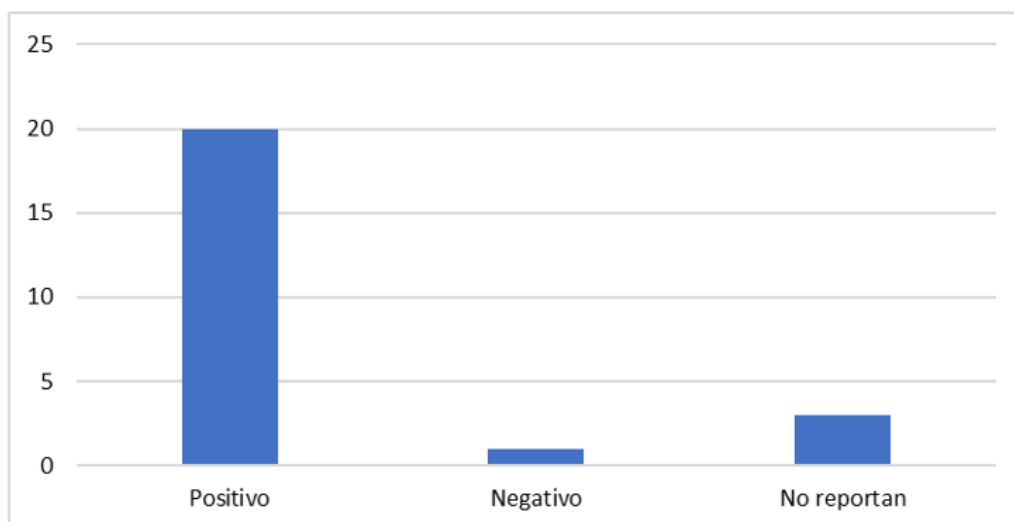


Figura 4. Efectos de la Gamificación

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó una revisión sistemática de la literatura sobre la aplicación de estrategias de gamificación en los ámbitos educativo y laboral; es decir, en los procesos de enseñanza y de aprendizaje de la Ingeniería de Software, así como en los procesos vinculados con la práctica profesional de la Ingeniería de Software; como se pudo observar, se tuvo un número considerable de estudios primarios donde se han implementado los principios de la gamificación.

En cuanto al ámbito, se pudo observar que en la mayoría de éstos —79%— son para apoyar procesos educativos, así mismo, en relación con el uso de alguna herramienta software, en la mayoría —70%— se utilizó alguna herramienta tecnológica propia, es decir, una aplicación de apoyo para su implementación; en otros estudios, se utilizaron aplicaciones ya existentes las cuales se adecuaron al objetivo del estudio. Por otro lado, se observó que en la mayoría de los estudios primarios se reporta que en la implementación de la gamificación se obtuvieron resultados positivos y satisfactorios.

Algunos otros aspectos que se pudieron observar cuando se realizaba esta investigación, es que hay varios artículos en los que se menciona que se ha implementado la gamificación para el aprendizaje en otras disciplinas. También, en varios artículos se proponen modelos pedagógicos para la implementación de la gamificación para el fomento de la enseñanza y aprendizaje de la Ingeniería de Software.

Finalmente, se observó el uso de más elementos de gamificación que los que se había identificado antes de haber realizado el estudio, no obstante, también se pudo comprobar que los primeros elementos citados, resultan los más usados en las iniciativas que involucran estrategias de gamificación para la mejora de los procesos vinculados, tanto para la educación, como para la práctica de la Ingeniería de Software.

Como parte de los trabajos futuros, los autores tienen como objetivo, el Diseño de un Modelo Instruccional Configurable que incorpore elementos de gamificación, el cual pueda ser implementado mediante en un Sistema de Gestión de Entornos Virtuales de Aprendizaje, para asistir a estudiantes en su proceso de formación como Ingenieros de Software.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo brindado por la Secretaría de Educación Pública (México) a través del proyecto P/PFC-2019-31MSU0098J-12, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por la beca CONACYT CVU-814668.

REFERENCIAS

Akpolat, B. S., & Slany, W. (2014). Enhancing software engineering student team engagement in a high-intensity extreme programming course using gamification. In 2014 IEEE 27th Conference on Software Engineering Education and Training (CSEET) (pp. 149–153). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSEET.2014.6816792>

Arai, S., Sakamoto, K., Washizaki, H., & Fukazawa, Y. (2014). A gamified tool for motivating developers to remove warnings of bug pattern tools. In Proceedings - 2014 6th International Workshop on Empirical Software Engineering in Practice, IWESep (pp. 37–42). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IWESep.2014.17>

Badihi, S., & Heydarnoori, A. (2017). CrowdSummarizer: Automated Generation of Code Summaries for Java Programs through Crowdsourcing. IEEE Software, 34(2), 71–80. <https://doi.org/10.1109/MS.2017.45>

Berkling, K., & Thomas, C. (2013). Gamification of a software engineering course and a detailed analysis of the factors that lead to it's failure. 2013 International Conference on Interactive Collaborative Learning, ICL, (September), 525–530. <https://doi.org/10.1109/ICL.2013.6644642>

Carreno-Leon, M., Sandoval-Bringas, A., Alvarez-Rodriguez, F., & Camacho-Gonzalez, Y. (2018). Gamification technique for teaching programming. In IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON (Vol. 2018-April, pp. 2009–2014). <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2018.8363482>

Deterding, S., Dixon, D., Khaled, R., & Nacke, L. (2011). From Game Design Elements to Gamefulness Defining “Gamification.” In Proceedings of the 15th international academic MindTrek conference: Envisioning future media environments (Vol. 20363, pp. 9–15). ACM. <https://doi.org/10.1145/2181037.2181040>

Diniz, G. C., Silva, M. A. G., Gerosa, M. A., & Steinmacher, I. (2017). Using gamification to orient and motivate students to contribute to oss projects. In Proceedings - 2017 IEEE/ACM 10th International Workshop on Cooperative and Human Aspects of Software Engineering, CHASE (pp. 36–42). Buenos Aires. <https://doi.org/10.1109/CHASE.2017.7>

Fernandez-Reyes, K., Clarke, D., & Hornbach, J. (2018). The impact of opt-in gamification on students ' grades in a software design course. In Proceedings of the 21st ACM/IEEE International Conference on Model Driven Engineering Languages and Systems: Companion Proceedings (pp. 90–97). Copenhagen, Denmark: ACM. <https://doi.org/10.1145/3270112.3270118>

Fraser, G., Gambi, A., & Rojas, J. M. (2018). A Preliminary Report on Gamifying a Software Testing Course with the Code Defenders Testing Game. In Proceedings of the 3rd European Conference of Software Engineering Education (pp. 50–54). ACM. <https://doi.org/10.1145/3209087.3209103>

Fuchs, M., & Wolff, C. (2016). Improving programming education through gameful, formative feedback. In IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON (Vol. 10-13-April, pp. 860–867). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2016.7474653>

Genero, M., Cruz-Lemus, J. A., & Piattini, M. G. (2014). Métodos de investigación en ingeniería del software. Ra-Ma.

Guarino, L. E., Guarino, L., Oliveira, L. B., Guimarães, G., & Ayres, F. (2018). Gamification Applied in the Teaching of Agile Scrum Methodology. In Information Technology-New Generations (pp. 207–212). Springer International Publishing.

Hamari, J., Koivisto, J., & Sarsa, H. (2014). Does gamification work? - A literature review of empirical studies on gamification. In Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences (pp. 3025–3034). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2014.377>

Hof, S., Kropp, M., & Landolt, M. (2017). Use of Gamification to Teach Agile Values and Collaboration. In Proceedings of the 2017 ACM Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education - ITiCSE (pp. 323–328). <https://doi.org/10.1145/3059009.3059043>

Kapp, L. M., Blair, L., & Mesch, R. (2014). The Gamification of Learning and Instruction. San Francisco, CA: Wiley.

Kazhamiakin, R., Marconi, A., Perillo, M., Pistore, M., Valetto, G., Piras, L., ... Perri, N. (2015). Using gamification to incentivize sustainable urban mobility. 2015 IEEE 1st International Smart Cities Conference, ISC2, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ISC2.2015.7366196>

Kemell, K. K., Risku, J., Evensen, A., Abrahamsson, P., Dahl, A. M., Grytten, L. H., ... Nguyen-Duc, A. (2018). Gamifying the Escape from the Engineering Method Prison. In 2018 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation, ICE/ITMC (pp. 1–9). <https://doi.org/10.1109/ICE.2018.8436340>

Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. Keele, UK, Keele University, 33(TR/SE-0401), 28.

Laskowski, M. (2015). Implementing gamification techniques into university study path - A case study. In IEEE Global Engineering Education Conference, EDUCON (Vol. 2015-April, pp. 582–586). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2015.7096028>

Marques, R., Costa, G., Mira Da Silva, M., & Gonçalves, P. (2017). Gamifying software development scrum projects. In 2017 9th International Conference on Virtual Worlds and Games for Serious Applications, VS-Games 2017 - Proceedings (pp. 141–144). <https://doi.org/10.1109/VS-GAMES.2017.8056584>

Matsubara, P. G. F., & Silva, C. L. C. Da. (2017). Game Elements in a Software Engineering Study Group: A Case Study. In 2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering: Software Engineering Education and Training Track (ICSE-SEET) (pp. 160–169). <https://doi.org/10.1109/ICSE-SEET.2017.8>

Maxim, B. R., Brunvand, S., & Decker, A. (2017). Use of role-play and gamification in a software project course. In Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE (Vol. 2017-Octob, pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/FIE.2017.8190501>

Mi, Q., Keung, J., Mei, X., Xiao, Y., & Chan, W. K. (2018). A Gamification Technique for Motivating Students to Learn Code Readability in Software Engineering. In Proceedings - 2018 International Symposium on Educational Technology, ISET (pp. 250–254). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISET.2018.00062>

Nah, F. F., Zeng, Q., & Telaprolu, V. R. (2014). Gamification of Education : A Review of Literature. In International conference on hci in business (pp. 401–409). Springer.

Parizi, R. M. (2016). On the gamification of human-centric traceability tasks in software testing and coding. In 2016 IEEE/ACIS 14th International Conference on Software Engineering Research, Management and Applications, SERA (pp. 193–200). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SERA.2016.7516146>

Regalado, M. R., Aranha, E., & Da Silva, T. R. (2016). Gamifying an online approach for promoting game development Learning and contest: An experience report. In Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE (Vol. 2016-Novem, pp. 1–8). <https://doi.org/10.1109/FIE.2016.7757441>

Rojas, J. M., White, T. D., Clegg, B. S., & Fraser, G. (2017). Code Defenders: Crowdsourcing Effective Tests and Subtle Mutants with a Mutation Testing Game. In 2017 IEEE/ACM 39th International Conference on Software Engineering (ICSE) (pp. 677–688). <https://doi.org/10.1109/ICSE.2017.68>

Santos, E. D., & Oliveira, S. R. B. (2018). Gamification and Evaluation the Use of the Function Points Analysis Technique in Software Quality Subjects. In Proceedings of the 17th Brazilian Symposium on Software Quality - SBQS (pp. 354–362). <https://doi.org/10.1145/3275245.3275290>

Snipes, W., Nair, A. R., & Murphy-Hill, E. (2014). Experiences gamifying developer adoption of practices and tools. In Companion Proceedings of the 36th International Conference on Software Engineering - ICSE Companion 2014 (pp. 105–114). <https://doi.org/10.1145/2591062.2591171>

Souza, M. R. D. A., Constantino, K. F., Veadó, L. F., & Figueiredo, E. M. L. (2017). Gamification in Software Engineering Education: An Empirical Study. In Proceedings - 30th IEEE Conference on Software Engineering Education and

Training, CSEE and T 2017 (pp. 276–284).
<https://doi.org/10.1109/CSEET.2017.51>

Unkelos-Shpigel, N. (2016). Peel the Onion: Use of Collaborative and Gamified Tools to Enhance Software Engineering Education. In Advanced Information Systems Engineering Workshops (pp. 122–128). Springer International Publishing.

NOTAS BIOGRÁFICAS



Erika Eunice Briceño Arceo es Ingeniero en Redes por la Universidad de Quintana Roo y actualmente, estudiante de Maestría en Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma de Yucatán. Su área de investigación es la Informática Educativa.



Raúl Antonio Aguilar Vera obtuvo el grado de Doctor por la Universidad Politécnica de Madrid, España (Mención de Doctor Europeo) y el de Master en Ingeniería de Software por la misma Institución, posee también el grado de Maestro en Educación Superior por la Universidad Autónoma de Yucatán. Actualmente es profesor en la Facultad de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Yucatán. Es coordinador de la Sección Académica de Ingeniería de Software de la Academia Mexicana de Computación (AMEXCOMP). Su trabajo de investigación incluye las áreas de Ingeniería de Software e Informática Educativa.



Julio Cesar Díaz Mendoza es Ingeniero Industrial en Producción por el Instituto Tecnológico de Mérida (ITM). Maestro en Tecnologías de Información, por la Universidad Interamericana para el Desarrollo (UNID). Especialista en Docencia de la Universidad Autónoma de Yucatán. Actualmente es profesor en la Facultad de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Yucatán, e imparte asignaturas en las carreras de Ingeniería de Software y Ciencias de la Computación. Su interés se enfoca al área de Ingeniería de Software Educativo.



Juan Pablo Ucán Pech es Doctor en Sistemas Computacionales por la Universidad del Sur, campus Mérida, México. Maestro en Sistemas Computacionales con especialidad en Ingeniería de Software por el Instituto Tecnológico de Mérida, México. Actualmente es profesor en la Facultad de Matemáticas de la Universidad Autónoma de Yucatán. Es miembro de la Academia Mexicana de Computación (AMEXCOMP). Su trabajo de investigación se centra en temas relacionados con la Ingeniería de Software, Ingeniería Web e Informática Educativa.



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

Hacia la Definición de una Arquitectura Empresarial Municipal de Referencia: Una experiencia en Chile.

Towards the Definition of a Reference Enterprise Architecture in the Municipal Context.

Daniela Gallegos-Baeza¹
dagalleg@egresados.ubiobio.cl

Angélica Caro Gutiérrez²
mcaro@ubiobio.cl

Alfonso Rodríguez Ríos²
alfonso@cubiobio.cl

¹ Magister en Ciencias de la Computación, Universidad del Bío-Bío, Chillán, Chile.

² Depto. Ciencias de la Computación y Tecnologías de Información, , Universidad del Bío-Bío, Chillán, Chile.

Resumen: Un municipio es una organización fundamental para el desarrollo de la comunidad. Su finalidad es brindar servicios que aseguren la participación en el progreso económico, social y cultural de los ciudadanos. Para favorecer estas tareas y apoyar su gestión, en los últimos años, los municipios han incorporado tecnologías de la información y comunicación como una estrategia eficaz. Sin embargo, el nivel de adopción de estas herramientas no es homogéneo entre municipios, lo que puede implicar grandes diferencias en la forma en que éstos entregan sus servicios a la ciudadanía. Por otro lado, las Arquitecturas Empresariales son instrumentos de dirección e integración de las tecnologías de la información y comunicación para toda la empresa y favorecen la estandarización, convergencia e interoperabilidad en los gobiernos locales, puesto que es posible lograr una visión holística del gobierno local que incluye información, personas y tecnología. En consecuencia con lo anterior, en este documento se propone la creación de una arquitectura empresarial de referencia para municipios que soporte un conjunto de servicios mínimos que permitan lograr un nivel de equidad básico en cuanto a la atención de la ciudadanía.

Palabras clave: Arquitectura Empresarial, TOGAF, ArchiMate, Municipios.

Abstract: A municipality is a fundamental organization for the development of the community. Its purpose is to provide services that ensure participation in the economic, social and cultural progress of citizens. To favor these tasks and support their management, in recent years, municipalities have incorporated information and communication technologies as an effective strategy. However, the level of adoption of these tools is not homogeneous among municipalities, which can imply large differences in the way they deliver their services to citizens. On the other hand, Enterprise Architectures are instruments of management and integration of information and communication technologies for the entire company and favor standardization, convergence and interoperability in local governments, since it is possible to achieve a holistic vision of local government that it includes information, people and technology. Consequently, this document proposes the creation of a reference enterprise architecture for municipalities that support a set of minimum services that allow achieving a level of basic equity in terms of citizen care.

Keywords: Enterprise Architecture, TOGAF, ArchiMate, Municipality.

1. Introducción

El uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación (TICs) se ha vuelto una estrategia común para el desarrollo y soporte de la relación entre los ciudadanos y el gobierno. Particularmente, los gobiernos locales, referidos a comunidades más acotadas, las que normalmente corresponden a municipios (Sá, Rocha, & Pérez Cota, 2016). Éstos, se han convertido durante los últimos años en proveedores de servicios muy variados, en los que el uso de sistemas online posibilita, a diferencia de los mecanismos tradicionales, un servicio continuo a lo largo de todo el día y de amplio alcance (Chaín Navarro, Muñoz Cañavate, & Más Bleda, 2008).

Es así que en el ámbito local, el gobierno electrónico (e-government) adquiere su máxima dimensión y relevancia, dado que los municipios son las organizaciones públicas más cercanas a los ciudadanos y les proporcionan directamente más servicios que ninguna otra administración (Sandoval-Almazan & Mendoza Colin 2011). Así mismo, el uso de las TICs en e-government debe ser permanentemente medido y evaluado, para determinar los beneficios reales que se prestan a la ciudadanía (Batlle-Montserrat, Abadal, & Blat, 2011). En este sentido resulta fundamental tener una visión global, evidenciada explícitamente, de cómo se vinculan los aspectos motivacionales de un municipio, con sus procesos, servicios y tecnología que los soporta.

Por su parte, las Arquitecturas Empresariales (AEs), definidas como un instrumento de dirección e integración de las TICs para toda la empresa (Lankhorst, Proper, & Jonkers, 2010), han sido sugeridas como un marco de trabajo para las iniciativas de administración electrónica (Ask & Hedstrm, 2011; Hornnes, Jansen, & Langeland, 2010; Janssen & Wagenaar, 2003). También han sido destacadas como una estrategia a seguir para lograr estandarización, convergencia e interoperabilidad en los gobiernos locales, puesto que mediante ellas es posible lograr una visión holística, que incluye información, personas y tecnología.

En este trabajo se tiene como objetivo el desarrollo de una AE de referencia para municipios de Chile, considerando un conjunto de servicios mínimos que debería proveer cada municipio según la legislación chilena vigente. Con esto se pretende que cualquier municipio del país cuente con una AE básica que le permita conocer las TICs, aplicaciones, procesos y roles necesarios para ofrecer un conjunto de servicios mínimos a sus ciudadanos. Logrando con ello mayor equidad, de modo que independientemente del tamaño, ubicación y tipo de municipio los ciudadanos tengan acceso a los mismos servicios elementales establecidos por ley. Para la definición y especificación de la AE de referencia

se usa el framework TOGAF y la notación de modelado ArchiMate. En este artículo se presentan los avances y versión preliminar de la AE de referencia. Pensamos que este trabajo contribuye, en general, al área a través de la experiencia y proceso desarrollado para la definición de la AE de referencia y, en particular, a quienes deseen desarrollar una tarea similar.

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente forma. En la Sección II se presentan los trabajos relacionados. La metodología de trabajo y la definición de la AE de referencia preliminar son presentadas en la Sección III y la Sección IV respectivamente. Finalmente, en la Sección V se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

2. Trabajos Relacionados

El avance en las TICs, así como las necesidades de los ciudadanos para acceder fácilmente a los servicios ofrecidos por los organismos públicos, hace posible la implementación y ampliación de los servicios ofrecidos a los ciudadanos a través de e-government. Por medio de estas plataformas tecnológicas los municipios pueden estrechar aún más su relación con los ciudadanos, generándoles mayor bienestar (Sandoval-Almazan & Mendoza Colin 2011) (Osio & Pineda, 2015).

El desarrollo de arquitecturas empresariales en municipios es un tema poco abordado. Algunos estudios (Ask & Hedstrm, 2011; Baez Medina, 2017; Janssen & Cresswell, 2005; Valtonen, Mntynen, Leppnen, & Pulkkinen, 2011) han desarrollado AEs municipales como medio para aumentar la comprensión del uso de estas herramientas, lograr la estandarización, convergencia e interoperabilidad en los gobiernos locales (Aliee, Bagheriasl, Mahjoorian, & Mobasheri, 2017; Ayyad, 2007; Widodo, Eko, Retantyo, & Purwo, 2013). Por otro lado, en relación a los framework que son utilizados para el desarrollo de arquitecturas empresariales, se destaca que el Marco de Arquitectura Empresarial de Gobierno (GEA) y TOGAF (Baez Medina, 2017; Valtonen, Ismo, Riku, & Mauri, 2010; Valtonen et al., 2011) son los frameworks más utilizados. Mientras que otros son el Marco de Referencia para el Estado Colombiano (Jiménez Álvarez, 2016), Zachman (Ayyad, 2007; Rodríguez Ortiz, 2012), FEAF (Aliee et al., 2017), entre otros.

En un trabajo previo (Gallegos-Baeza, Velásquez, Rodríguez, & Caro, 2019), se desarrolló una Revisión Sistemática de Literatura (RSL) con el objetivo de identificar el uso de AEs asociado al desarrollo de servicios municipales en el contexto de e-government local. Como resultado, se destaca la escasez de trabajos (sólo 15) sobre esta temática. Los artículos obtenidos apuntan esencialmente al desarrollo de AEs para algún municipio en particular, como

medio para aumentar la comprensión del uso de AEs y para la alineación de la información y los procesos de negocio del municipio (Ask & Hedström, 2011; Ayyad, 2007; Baez Medina, 2017; Janssen & Cresswell, 2005; Jiménez Álvarez, 2016; Lankhorst & Derks, 2007; Rodríguez Ortiz, 2012; Valtonen et al., 2011; Zuiderhoek, Otter, Bos, & Brinkkemper, 2006). En estos estudios, se evidencia la falta de uso de notaciones para el modelado de AEs, donde sólo 3 de diez estudios que especifican el uso de alguna notación usan una dedicada a representar arquitecturas empresariales.

3. Metodología de Trabajo

Para el desarrollo de la AE de referencia para municipios, se estableció una metodología con 7 etapas, ver Figura 1. Las etapas 1, 2 y 3 consisten en estudiar la evidencia sobre servicios municipales brindados mediante e-government (a nivel global), identificar los servicios que por ley deben brindar los municipios chilenos y que pueden ser implementados mediante e-government y experiencias de AEs desarrolladas para el contexto municipal, respectivamente. La etapa 4 consiste en establecer los servicios mínimos de e-government para municipios chilenos. En la etapa 5 se desarrolla la construcción de una AE de referencia que soporte los servicios mínimos utilizando TOGAF, la notación ArchiMate y la herramienta de modelado Archi. En la etapa 6 se establece un caso de estudio en municipios de Chile, en particular de la región de Ñuble. Finalmente, la etapa 7 consiste en la publicación de los resultados de la investigación.

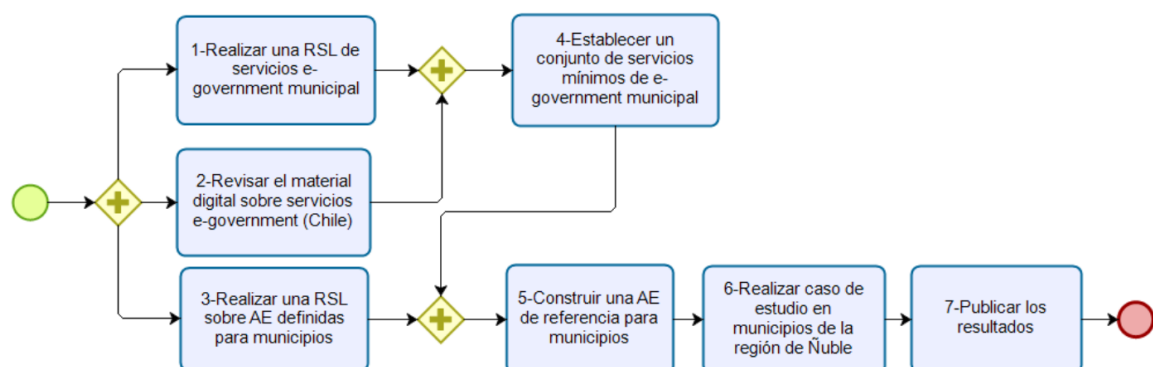


Figura 1. Metodología de trabajo.

4. Definición de la Arquitectura Empresarial de Referencia para Municipios

A continuación se describirán los resultados preliminares de nuestro trabajo que establecen las bases para el desarrollo de la AE de referencia.

4.1 Servicios Mínimos de e-government Municipal

Con base a la literatura, se identificaron categorías genéricas de servicios municipales, y dentro de ellos servicios que se pueden implementar mediante e-government. Además, se estudiaron cuatro documentos publicados por la Subsecretaría de Desarrollo Regional (SUBDERE) (<http://www.subdere.gov.cl/>) de Chile, que identifican los servicios que las municipalidades deberían o se encuentran facultadas a realizar (Ministerio de Interior y Seguridad Pública & SUBDERE, 2018; OCM, 2006; SUBDERE, 2007).

A partir de estos documentos, se identificaron 22 servicios municipales candidatos a ser mínimos categorizados en servicios de información, interacción, transacción y participación. Para establecer los servicios mínimos se fijaron tres criterios de selección: (i) demanda ciudadana e impacto en el presupuesto municipal, (ii) apoyo de TICs y (iii) orientación al ciudadano. Con base a estos criterios los servicios considerados mínimos para el desarrollo de la AE de referencia son: Desarrollo comunitario, educación (gestión de becas), licencia de conducir, permiso de circulación, intermediación laboral, patentes comerciales y registro social de hogares.

4.2 Definición de la Arquitectura Empresarial de Referencia

La AE de referencia para municipios se desarrolla utilizando TOGAF y se representará mediante la notación ArchiMate. TOGAF considera la definición de una AE modelada en 4 dimensiones o niveles (The Open Group, 2018):

- Arquitectura de Negocio: la estrategia de negocio, gobernanza y procesos clave de la organización.
- Arquitectura de Datos: la estructura de datos lógicos y físicos que posee una organización.
- Arquitectura de Aplicación: aplicaciones individuales a implementar, sus interacciones y relaciones con los procesos de negocio de la organización.
- Arquitectura Tecnológica: las capacidades de software y hardware que se requieren para apoyar la implementación de servicios de negocio, datos y aplicación.

Las arquitecturas mencionadas pueden ser desarrolladas mediante el método ADM (Architecture Development Method) provisto por TOGAF. En la Figura 2 se muestran las fases de ADM usadas: Preliminar, Visión de arquitectura (A), Arquitectura de Negocio (B), Arquitectura de Sistemas de Información (C) y la Arquitectura Tecnológica (D).

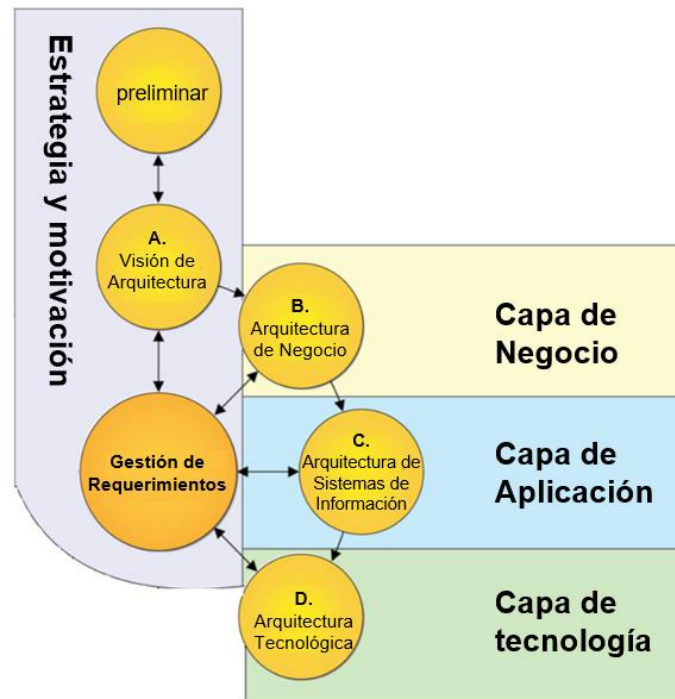


Figura 2. TOGAF-ADM de las fases implementadas y correspondencia con lenguaje ArchiMate.

Por otro lado, el marco principal de ArchiMate provee tres capas para el modelado de las dimensiones de una AE (The Open Group 2017): (i) Capa de negocio, la cual se ocupa de los productos y servicios que se ofrecen por parte de la organización mediante procesos de negocio, realizados por los actores y roles del negocio; (ii) Capa de aplicación, soporta la capa de negocio con servicios de aplicaciones que se realizan mediante componentes de aplicación; (iii) Capa de tecnología, que ofrece servicios de infraestructura (por e.g. el procesamiento, almacenamiento, hardware, software y servicios de comunicación) necesarios para ejecutar la capa de aplicación.

El lenguaje ArchiMate complementa el framework TOGAF (Figura 2) en el sentido de que proporciona una representación gráfica, que ayuda a crear un modelo coherente e integrado que puede representarse en forma de las vistas de TOGAF.

A continuación las siguientes secciones presentan las vistas que servirán de base para el desarrollo de la AE de referencia, por cada una de las capas principales de ArchiMate y las fases correspondientes de TOGAF.

4.3 Estrategia y Motivación

La motivación de una organización para lograr ciertos resultados está representada por objetivos, principios, requisitos y limitaciones. Para realizar el modelado de la estrategia y motivación se desarrollaron la Fase Preliminar y la Fase A de TOGAF-ADM.

La Fase Preliminar prepara a la organización para emprender proyectos de AE. En esta fase se define al municipio, el alcance de las unidades afectadas dentro del municipio en relación a los servicios mínimos, la gobernanza y los principios de arquitectura.

Esta investigación está centrada en la construcción de una AE de referencia para municipios. El Artículo 1 de la Ley 18.695 (Chile), define a los municipios como: “Corporación autónoma de derecho público, con personalidad jurídica y patrimonio propio, cuya finalidad es satisfacer las necesidades de la comunidad local y asegurar su participación en el progreso económico, social y cultural de las respectivas comunas” (OCM, 2006).

Por otro lado, en la Fase de A se identifican las partes interesadas, los objetivos de negocio, la evaluación de las capacidades de la organización, el alcance, la visión y los riesgos asociados al proyecto.

El objetivo de negocio que se busca establecer en los municipios es satisfacer las necesidades de la comunidad local mediante la entrega de un conjunto de servicios. Los objetivos específicos que apoyan este objetivo son:

- Contar con una gestión moderna, aplicando la mejora continua en los servicios mediante tecnología en beneficio de la comunidad.
- Identificar, estandarizar y automatizar sus procesos en relación al conjunto de servicios mínimos.
- Fomentar la interacción de la ciudadanía.
- Vincular los servicios electrónicos existentes a sus respectivas unidades.
- Definir una estructura organizacional municipal y establecer roles para los agentes que componen la organización.

En la Figura 3 se presenta el diagrama de concepto de solución donde se proporciona un resumen de alto nivel de la solución prevista de la AE con el fin de cumplir con los objetivos de la arquitectura. Esta solución se fundamenta en los recursos municipales (económicos, tecnológicos y humanos) restringidos a un conjunto de servicios mínimos y que cumplan con los objetivos de negocio mencionados.

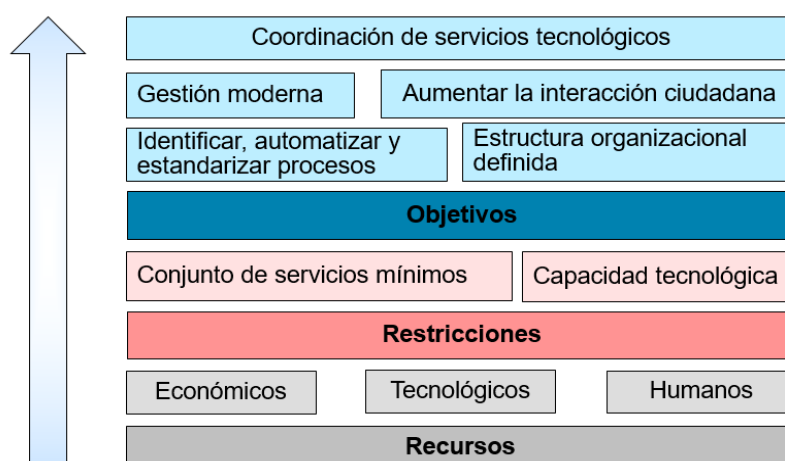


Figura 3. Diagrama de concepto de solución.

4.4 Capa de Negocio

La capa de negocio describe los servicios ofrecidos a los ciudadanos, que se realizan en la organización mediante procesos de negocio.

Para la implementación de la capa de negocio se desarrolló la Fase B de TOGAF-ADM. Esta fase aborda el desarrollo de una arquitectura de negocio que apoye la Visión de la Arquitectura (The Open Group, 2013). Para el desarrollo de la arquitectura de negocio se realizaron los pasos de selección de vistas relevantes de la arquitectura empresarial y el desarrollo de la arquitectura de negocio de destino. Solo fueron desarrollados estos dos pasos de TOGAF aplicables para la AE de referencia esencialmente debido a que no se está trabajando con una organización en concreto de la cual dispongamos de su AE.

En el primer paso se seleccionan las vistas relevantes de la arquitectura empresarial en el dominio de negocio y se identifican las herramientas y técnicas que son utilizadas para la captura, el modelado y el análisis, en asociación con los puntos de vista seleccionados.

La vista desarrollada para la arquitectura de negocio es el contexto organizacional municipal (Figura 4) elaborada con base a lo propuesto por (EIRA, 2018) y representada mediante la notación ArchiMate.

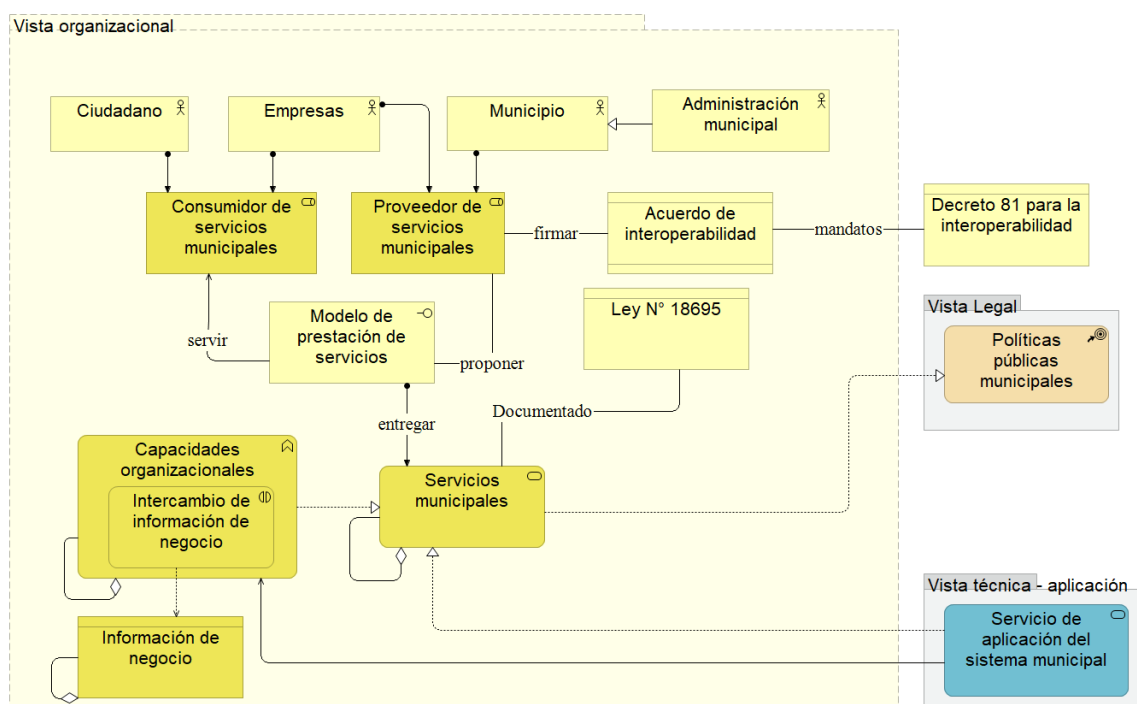


Figura 4. Vista Organizacional de la AE de referencia.

El segundo paso desarrollado consiste en la descripción de alto nivel de la arquitectura de negocio de destino en relación a los servicios mínimos establecidos. La arquitectura propuesta está desarrollada en tres niveles:

i) Roles y actores: los actores son las unidades organizacionales de un municipio relacionadas a la entrega de los servicios mínimos establecidos. Así, las unidades municipales son la alcaldía, administración y finanzas, desarrollo comunitario, tránsito y transporte y asesoría de servicios tecnológicos. Todas estas unidades cumplen el rol de ser prestadoras de servicios y la unidad de asesoría de servicios tecnológicos cumple con el rol de intermediario entre los servicios y las unidades municipales. Este intermediario será el encargado de vincular los servicios municipales mínimos existentes con las distintas unidades del municipio evitando que cada unidad se haga cargo de su desarrollo.

ii) Servicios: los servicios mínimos considerados en esta investigación son desarrollo comunitario, educación, licencia de conducir, permiso de circulación, intermediación laboral, patentes comerciales y el registro social de hogares.

iii) Proceso de negocio: los procesos de negocio correspondientes a cada servicio

4.5 Capa de Aplicación

La capa de aplicación describe los servicios de aplicación que soportan el negocio y las aplicaciones que los realizan.

Para la implementación de la capa de aplicación se desarrolló la Fase C de TOGAF-ADM. Esta fase se enfoca en identificar y definir una arquitectura de aplicación y una arquitectura de datos que soporten la arquitectura de negocio de los municipios. Para el desarrollo de la arquitectura de datos y aplicación se realizaron los pasos de selección de vistas relevantes de la arquitectura empresarial y el desarrollo de la arquitectura de destino. Solo fueron desarrollados estos dos pasos de TOGAF-ADM aplicables para la AE de referencia esencialmente debido a que no se está trabajando con una organización en concreto de la cual dispongamos de su AE.

En el primer paso desarrollado para la arquitectura de datos se crea la vista en el contexto de datos (Figura 5) elaborada con base a lo propuesto por (EIRA, 2018) y representada mediante la notación ArchiMate.

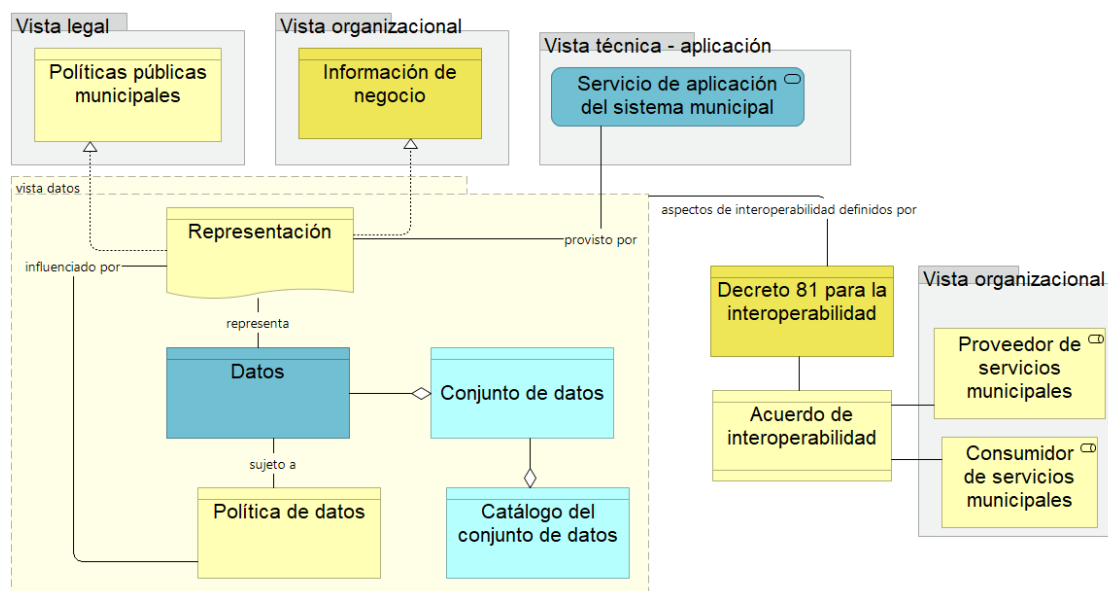


Figura 5. Vista en el contexto de datos de la AE de referencia.

El segundo paso desarrollado para la arquitectura de datos consiste en la descripción de alto nivel del desarrollo de la arquitectura de datos de destino. El objetivo de la creación de la arquitectura de datos de los municipios es mantener una infraestructura adaptable diseñada para facilitar el acceso, el intercambio, la gestión y la seguridad de los datos a nivel organizacional (Zuiderhoek et al., 2006).

En esta fase se identificaron los componentes de datos lógicos que representan los servicios municipales mínimos (Figura 6) y las entidades de datos del servicio en alto nivel (Figura 7). El diagrama de la Figura 7 proporciona las entidades de datos de alto nivel correspondientes a los componentes lógicos de la Figura 6 en relación a la entrega de servicios mínimos. Adicionalmente, se incorpora la entidad de información del proceso la cual especifica los datos del proceso mismo, por e.g.: en la patente municipal, también estarán los datos de la patente misma y del proceso mismo (fecha de solicitud, quien participó, etc.).

En el primer paso desarrollado para la arquitectura de aplicación es la vista en el contexto de aplicación (Figura 8) representada mediante la notación ArchiMate.

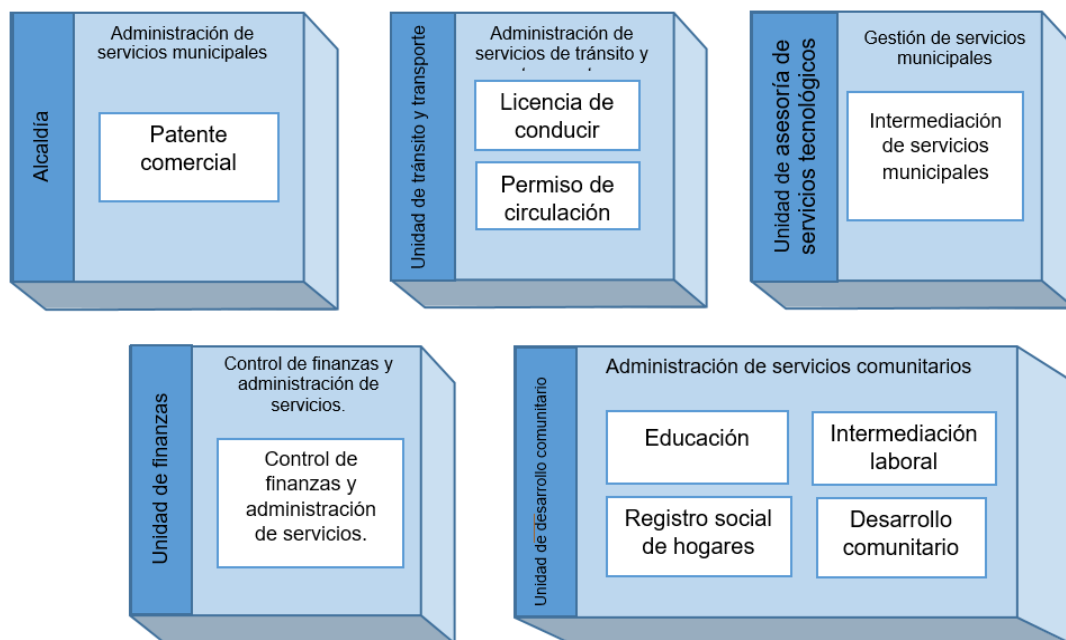


Figura 6. Componentes de datos lógicos municipales.

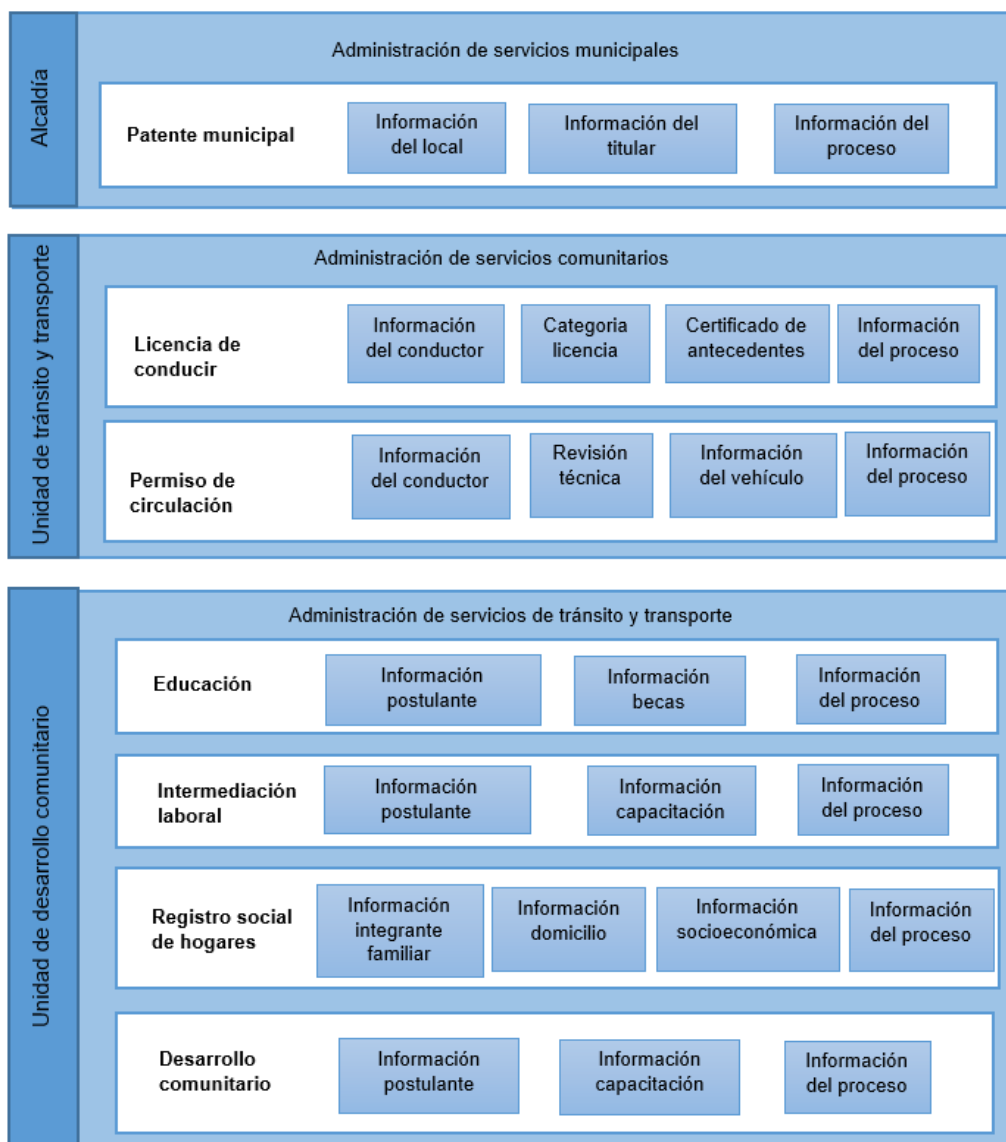


Figura 7. Entidades de datos municipales.

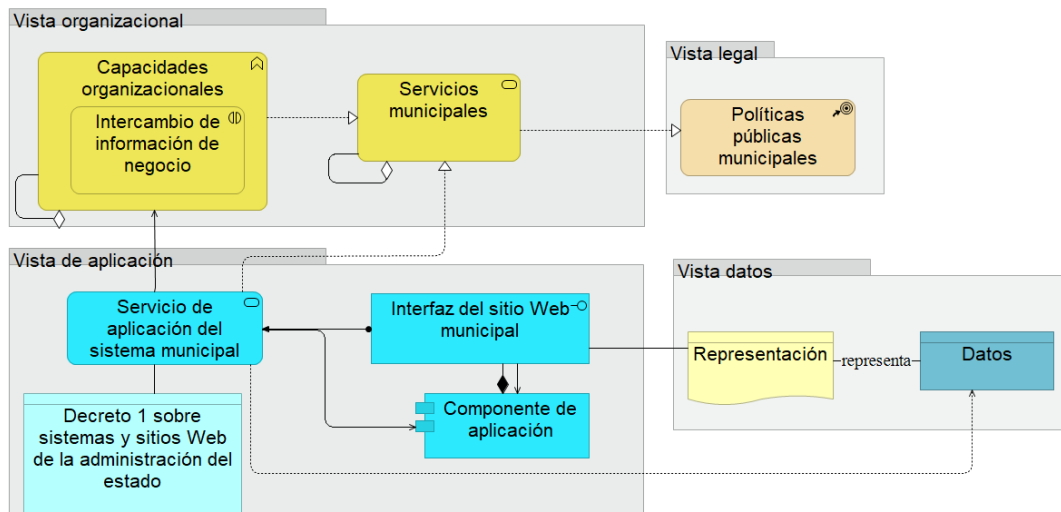


Figura 8. Vista en el contexto de aplicación de la AE de referencia.

El segundo paso desarrollado para la arquitectura de aplicación consiste en la descripción de alto nivel del desarrollo de la arquitectura de aplicación de destino. En la Figura 9 se presenta un diagrama de aplicación municipal de alto nivel que incorpora los sistemas correspondientes por cada una de las áreas temáticas en el contexto de servicios mínimos.

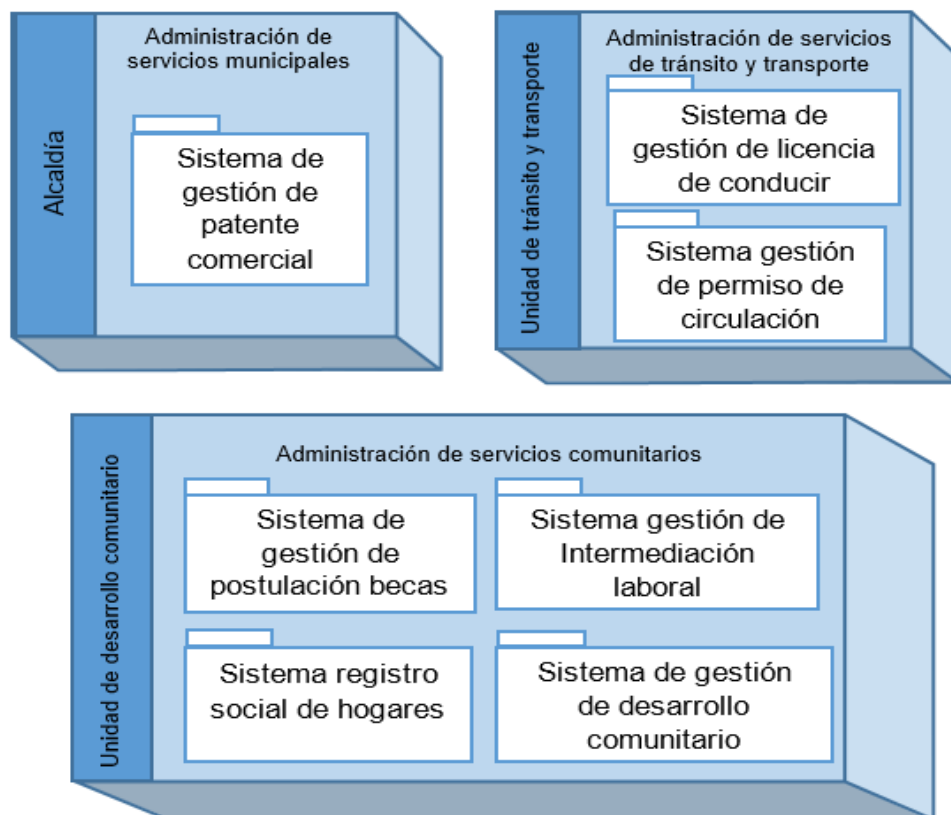


Figura 9. Diagrama de aplicación municipal en el contexto de servicios mínimos.

4.6 Capa de Tecnología

La capa de tecnología describe los servicios de tecnología, como los servicios de procesamiento, almacenamiento y comunicación necesarios para ejecutar las aplicaciones.

Para la implementación de la capa de tecnología se desarrolló la Fase D de TOGAF-ADM. Esta fase aborda el desarrollo de una Arquitectura de Tecnología que permita que las arquitecturas de negocio, datos y aplicaciones se entreguen a través de componentes y servicios de tecnología (The Open Group, 2018).

Para el desarrollo de la arquitectura de tecnología se realizaron los pasos de selección de vistas relevantes de la arquitectura empresarial y el desarrollo de la arquitectura de negocio de destino. Solo fueron desarrollados estos dos pasos de TOGAF-ADM aplicables para la AE de referencia, esencialmente debido a que no se está trabajando con una organización en concreto de la cual dispongamos de su AE.

En el primer paso se seleccionan las vistas relevantes de la arquitectura empresarial en el dominio de tecnología (Figura 10) y se identifican las herramientas y técnicas que son utilizadas para la captura, el modelado y el análisis, en asociación con los puntos de vista seleccionados.

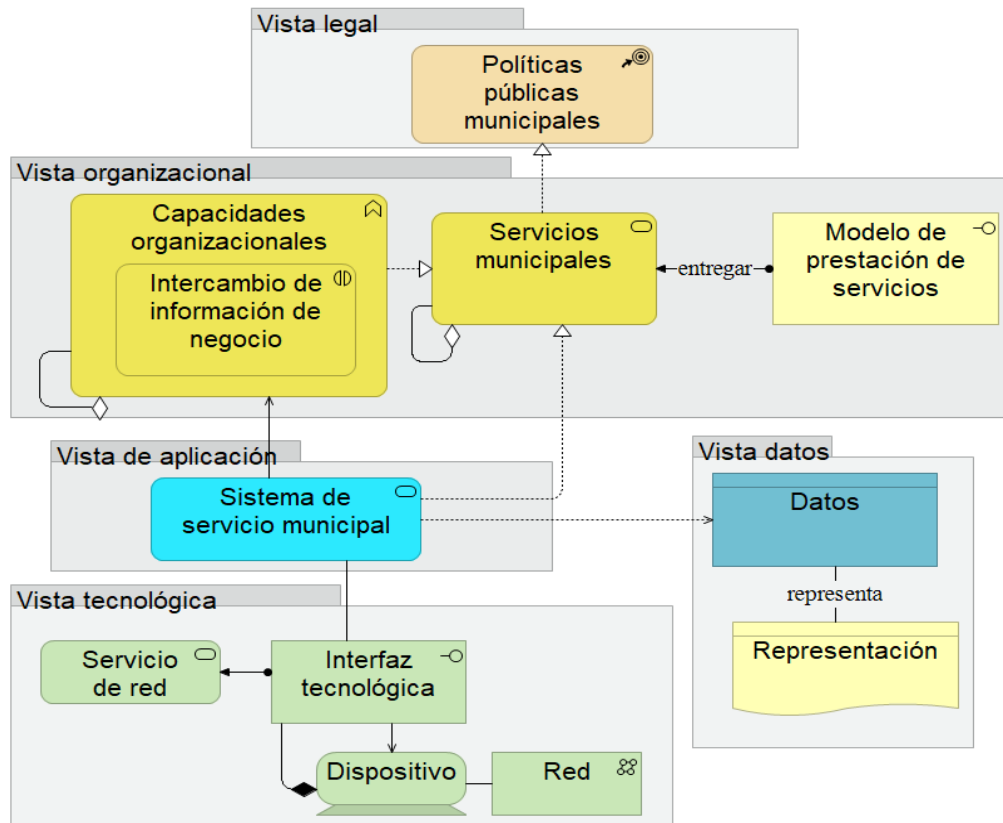


Figura 10. Vista en el contexto de tecnología de la AE de referencia.

A esta arquitectura se añaden elementos físicos para modelar equipos físicos, materiales y redes de distribución a esta capa. Se considera que un sistema de servicios municipales es apoyado por servicios de red. Se puede acceder a un servicio de red a través de la interfaz tecnológica. El dispositivo tecnológico (enrutador, computador, entre otros.) está compuesto por una interfaz tecnológica y a su vez está asociado a una red.

5. Conclusiones

En este artículo se aborda la construcción de una arquitectura empresarial de referencia para municipios que soporte un conjunto de servicios mínimos mediante el uso de TOGAF-ADM y la notación ArchiMate. Como resultado se presentan los avances y versión preliminar de la AE de referencia desarrollada por cada una de las dimensiones de TOGAF.

El trabajo futuro consiste en terminar la AE de referencia propuesta basada en los resultados preliminares descritos en este artículo. Adicionalmente, la AE de referencia debe ser validada y para esto se espera realizar casos de estudio en los municipios pertenecientes a la región de Ñuble, Chile.

Con la AE de referencia propuesta se pretende que cualquier municipio de Chile cuente con una AE básica que le permita conocer las TICs, aplicaciones, procesos y roles necesarios para ofrecer un conjunto de servicios mínimos a sus ciudadanos. Logrando con ello mayor equidad, de modo que independientemente del tamaño, ubicación y tipo de municipio los ciudadanos tengan acceso a los mismos servicios.

REFERENCIAS

Aliee, F. S., Bagheriasl, R., Mahjoorian, A., & Mobasheri, M. (2017). Towards a National Enterprise Architecture Framework in Iran. In *Iceis* (3), pp. 448-453.

Ask, A., & Hedstrm, K. (2011). Taking initial steps towards enterprise architecture in local government. *International Conference on Electronic Government and the Information Systems Perspective*, pp. 26-40.

Ayyad, M. (2007). Cascaded e-Government – Toward Building a Multi-purpose and Multi-layer Data Model for Local e-Government in Palestine. *Proceedings of the 1st international conference on Theory and practice of electronic governance*, pp 427-430.

Baez Medina, E. R. (2017). Diseño de arquitectura empresarial en la Municipalidad Distrital de la Victoria–Chiclayo.

Batlle-Montserrat, J., Abadal, E., & Blat, J. (2011). Benchmarking Del e-Gobierno Local: Limitaciones de Los Métodos de Evaluación Comparativa. *El Profesional de la Informacion*, 20(3), pp. 251-259.

Chaín Navarro, C., Muñoz Cañavate, A., & Más Bleda, A. (2008). La gestión de información en las sedes web de los ayuntamientos españoles. *Revista española de documentación científica*, 31, 612-638.

EIRA. (2018). European Interoperability Reference Architecture. (3).

Gallegos-Baeza, D., Velásquez, I., Rodríguez, A., & Caro, A. (2019). Uso de Arquitecturas Empresariales en e-Government Municipal: Un Mapeo Sistemático de la Literatura. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*(E17), pp. 816-829.

Hornnes, E., Jansen, A., & Langeland, Ø. (2010). How to Develop an Open and Flexible Information Infrastructure for the Public Sector?. International Conference on Electronic Government, pp. 301-314.

Janssen, M., & Cresswell, A. (2005). The Development of a Reference Architecture for Local Government. Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), pp. 1-10.

Janssen, M., & Wagenaar, R. (2003). Towards a Flexible ICT-Architecture for Multi-Channel E-Government Service Provisioning. 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1-10.

Jiménez Álvarez, J. J. (2016). Diseño de un Modelo para la Creación de Secretaría TIC en Entes Territoriales Colombianos de Categoría 1 y 2, Basado en Arquitectura Empresarial. P. 134.

Lankhorst, M. M., & Derks, W. L. A. (2007). Towards a Service-Oriented Architecture for Demand-Driven e-Government. 11th IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Conference, pp. 214-225.

Lankhorst, M. M., Proper, H. A., & Jonkers, H. (2010). The anatomy of the archimate language. International Journal of Information System Modeling and Design (IJISMD), 1, pp. 1-32.

Ministerio de Interior y Seguridad Pública, & SUBDERE. (2018). Guía metodológica para la prestación de servicios municipales con niveles de calidad. pp. 162.

OCM. (2006). Fija El Texto Refundido, Coordinado Y Sistematizado De La Ley N° 18.695, Orgánica Constitucional De Municipalidades.

Osio, L., & Pineda, P. L. (2015). Evolucion del e-gobierno en la Alcaldia del Municipio Naguanagua, estado Carabobo: periodo 2004-2014. Enl@ce: Revista Venezolana de Informacion, Tecnologia y Conocimiento, 12(2), pp. 96-114.

Rodríguez Ortiz, I. (2012). Infraestructura Tecnológica y Sistemas de Información para la Oferta de Servicios de Gobierno Electrónico a Nivel Municipal, p. 65.

Sandoval-Almazan, R., & Mendoza Colin, J. (2011). Gobierno electrónico en México : una exploración Municipal 2010. In AMCIS

SUBDERE. Portal de Servicios Municipales. Retrieved from <https://www.sem.gob.cl/servicios.php>

SUBDERE. (2007). Sistema de Acreditación de los Servicios Municipales.

Sá, F., Rocha, Á., & Pérez Cota, M. (2016). Potential dimensions for a local e-Government services quality model. *Telematics and Informatics*, 33(2), pp. 270-276.

The Open Group. (2013). TOGAF® Versión 9.1–Guía de Bolsillo. ed: Van Haren Publishing, Zaltbommel, www.vanharen.net, pp. 1-81.

The Open Group (2017). ArchiMate 3.0.1 Specification.

The Open Group. (2018). El estándar TOGAF versión 9.2.

Valtonen, K., Ismo, K., Riku, R., & Mauri, L. (2010). EA as a Tool in Change and Coherency Management-a Case of a Local Government. *Proceedings of the 43rd Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1-10.

Valtonen, K., Mntynen, S., Leppnen, M., & Pulkkinen, M. (2011). Enterprise architecture descriptions for enhancing local government transformation and coherency management case study. *Proceedings - IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Workshop*, pp. 360-369.

Widodo, A. P., Eko, I. J., Retantyo, W., & Purwo, S. (2013). E - Government Interoperability Framework based on a Real Time Architecture. *IJCSI International Journal of Computer Science*, 10(1), pp. 469-477.

Zuiderhoek, B., Otter, A., Bos, R., & Brinkkemper, S. (2006). Framework for dutch municipalities to ensure business it alignment using enterprise architecture. *Proceedings of the European Conference on e-Government, ECEG*. pp. 457-466.

Notas Biográficas



Daniela Gallegos Baeza es Ingeniera Civil en Informática por la Universidad del Bío-Bío y actualmente, estudiante de Maestría en Ciencias de la Computación en la misma universidad. Se ha desempeñado como profesor part time principalmente en áreas de ingeniería de software.



Angélica Caro es profesora jornada completa en el depto. de Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información de la Universidad del Bío-Bío, Chile. Recibió su PhD en Informática en la Universidad de Castilla-La Mancha, España. Sus intereses de investigación son ingeniería de software, arquitecturas empresariales y calidad de datos.



Alfonso Rodríguez es profesor jornada completa en el depto. de Cs. de la Computación y Tecnologías de la Información de la Universidad del Bío-Bío. Recibió su PhD en Ciencias de la Computación de la Universidad de Castilla-La Mancha, España. Sus áreas de investigación son ingeniería de software, arquitecturas empresariales y procesos de negocio.



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

Hacia una propuesta de heurísticas de usabilidad para pruebas de HCI y de UX para niños con discapacidad auditiva: Caso de estudio

Towards a proposal of usability heuristics for HCI and UX tests for children with hearing impairment: Case study

Gerardo Cruz González¹

gercruz@mixteco.utm.mx

Carlos Alberto Fernández y Fernández¹

caff@mixteco.utm.mx

Felipe de Jesús Trujillo Romero²

fdj.trujillo@ugto.mx

*¹Instituto de Computación, Universidad Tecnológica de la Mixteca
Huajuapán de León, Oax., México*

*²Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Guanajuato
Salamanca, Gto., México*

RESUMEN

La mayoría de las aplicaciones relacionadas con la tecnología de la información (TI), así como las heurísticas de diseño, están focalizadas en usuarios sin discapacidades físicas o intelectuales, lo que ha causado que las personas con algún tipo de discapacidad, como las que padecen discapacidad auditiva, queden al margen de los beneficios que ofrecen estas tecnologías. Ante esta problemática, se llevó a cabo un proyecto de investigación, en el cual se diseñó y se desarrolló una interfaz para que los niños con discapacidad auditiva (NCDA), practicara la Lengua de Señas Mexicana (LSM). Al momento de diseñar las pruebas de usabilidad y dado que no se encontraron heurísticas de diseño para NCDA, fue necesario proponer y utilizar heurísticas de diseño alternas, así como adaptar la realización de las pruebas de usabilidad de acuerdo con las características físicas e intelectuales de los NCDA. Además, se generó un protocolo de comunicación que permitió el entendimiento con los niños que participaron en el proyecto. La propuesta que se presenta retoma los resultados que se obtuvieron en el desarrollo mencionado para analizarlos, probarlos y realizar los ajustes necesarios, a fin de colaborar en la definición de heurísticas de diseño que guíen el desarrollo de interfaces para NCDA.

PALABRAS CLAVE

IHC, UX, LSM, sordos, discapacidad auditiva.

ABSTRACT

Most applications related to information technology (IT), as well as design heuristics, are focused on users without physical or intellectual disabilities, which has caused people with some kind of disability, such as hearing-impaired, be left out of the benefits of these technologies. Faced with this problem, a research project was carried out, in which an interface was designed and developed for children with hearing impairment (NCDA), to practice the Mexican Sign Language (LSM). At the time of designing the usability tests and since no design heuristics were found for NCDA, it was necessary to propose and use alternating design heuristics, as well as adapt the conduct of usability tests according to the characteristics intellectual of the NCDAs. In addition, a communication protocol was generated that allowed for understanding with the children involved in the project. The proposal presented takes up the results that were obtained in the development to analyze, test and make the necessary adjustments, in order to collaborate in the definition of design heuristics that guide the development of interfaces for NCDA.

KEYWORDS

HCI, UX, LSM, deaf, hearing impairment

1. INTRODUCCIÓN

Cuando se desarrollaba una interfaz para niños con discapacidad auditiva (NCDA) (Cruz, Fernández Trujillo, 2019), que tuvo como objetivo ayudar a los niños a practicar los movimientos de la Lengua de Señas Mexicana (LSM), se observó la ausencia de guías y de heurísticas de diseño que guiaran el desarrollo de interfaces para este tipo de usuarios. Esa interfaz debía tener estas cualidades: ser fácil de aprender y de utilizar, además de ser lúdica y absorbente. Esto último, con el propósito de que el niño se divierta mientras aprende la LSM.

Para conseguir la facilidad de uso de la interfaz, se recurrió a las guías de diseño de *Material Design* (Google Inc, 2019) y a las heurísticas de diseño de Nielsen (Nielsen, 2012). Para captar la atención del usuario, se diseñaron y se implementaron avatares humanoides de apariencia tanto infantil como adulta, que muestran a los niños cómo realizar los movimientos necesarios para ejecutar las señas de la Lengua de Señas Mexicana. Sin embargo, al momento en que los NCDA efectuaron las pruebas de usabilidad y de experiencia de usuario (UX) correspondientes, se detectó que algunas tareas no pudieron ser completadas exitosamente, porque para los niños, los íconos que observaban en la pantalla de la computadora carecían de significado o transmitían una idea confusa. Esta deficiencia en la interfaz evaluada motivó la ampliación del estudio acerca de las características físicas e intelectuales propias de los NCDA. Con los resultados de ese análisis, fue posible generar heurísticas de diseño acordes al tipo de usuarios con el cual se trabajaba en ese momento.

Por lo anterior, este documento explica la razón por la cual las guías y las heurísticas generales de diseño no pudieron aplicarse, y en base a esa argumentación, se plantean cinco heurísticas que solamente se aplican a niños en edad escolar que tienen discapacidad auditiva. Estas reglas resultantes son el punto de partida de un nuevo proyecto, el cual tiene como objetivo principal, definir un conjunto de reglas que guíen el diseño y el desarrollo de interfaces para NCDA.

La estructura de este documento es la siguiente: En la subsección 1.1, se da un panorama general del estado del arte acerca de las pruebas de usabilidad y de UX, enfocándose principalmente en personas con discapacidad auditiva. En la sección 2, se presenta el desarrollo de una aplicación para NCDA (Cruz et al., 2019), se define el perfil de usuario (subsección 2.1) de la aplicación, se dan a conocer los resultados de las pruebas de usabilidad que se obtuvieron al probar la interfaz, y se argumenta el porqué es necesario establecer heurísticas de diseño (subsección 2.2) para este tipo de usuarios.

En la sección 3, se presentan y se justifican cinco heurísticas de diseño para desarrollar interfaces para usuarios con el perfil previamente establecido. En la sección 4 se argumentan ideas útiles para definir estrategias de comunicación (subsección 4.1) con NCDA, y también para llevar a cabo pruebas de usabilidad y de UX (subsección 4.2) con esta clase de usuarios. Finalmente, en la sección 5, se dan a conocer las conclusiones a las que se ha llegado en esta etapa del proyecto.

1.1 Trabajos relacionados

Realizando una investigación documental, se han encontrado diversas obras que tratan el tema de la usabilidad y de UX tanto de personas discapacitadas como no discapacitadas, entre las que se encuentran las siguientes: en (Cruz, Fernández Trujillo, 2018) y en (Cruz et al., 2019), se presenta un estudio contextual de un grupo de niños sordos que están aprendiendo la Lengua de Señas Mexicana (LSM) y en (Cruz et al., 2019), se presentan pruebas de usabilidad y de experiencia de usuario de una aplicación que ayuda a los niños, con algún nivel de sordera, a practicar la LSM. En (Marcus, 2016), se pone de manifiesto la importancia que tiene considerar la capacidad de percepción del cuerpo humano y de la interpretación que el cerebro hace de ella, considerando la experiencia de vida de cada ser humano. En (Yeratziotis Zaphiris, 2017) se aborda la marginación que enfrentan las personas con discapacidad auditiva o visual al no poder utilizar la información disponible en Internet ya que las páginas web, en su mayoría, están diseñadas para usuarios sin discapacidades. En (Michelle, 2015), se afirma que las personas con algún grado de sordera tienen menor capacidad de regular sus emociones y su grado de conciencia es menor en relación a una persona sin tal capacidad, y considera que un buen diseño de la UX ayudará a la persona a mejorar sus habilidades emocionales y sociales proporcionándole mayor bienestar a la persona. En (Mich, 2009) se proponen guías de diseño para interfaces de usuarios con sordera, las cuales surgieron de la experiencia al realizar pruebas de usabilidad a niños con esta problemática y aplicando encuestas a las personas que los rodean. El trabajo presentado en (Hutter Lawrence, 2018) también propone guías de diseño, las cuales surgieron durante el desarrollo de una interfaz para usuarios sordos, que entre ellos se comunicaban por medio de la Lengua de Señas Americana (ASL). Algunas de estas recomendaciones son realizar un estudio contextual extenso, comprender el ámbito cultural y social de los usuarios e incluir a un experto de UX para la evaluación de la experiencia de usuario. En (Wong, Khong Thwaites, 2012), se analiza el diseño mixto entre el diseño centrado en el usuario (UCD) y de UX utilizados por diseñadores de interfaces gráficas de usuario (GUI) en el contexto de lo que demanda el mercado, haciendo énfasis en la importancia de los estudios contextuales, la usabilidad y la experiencia de usuario.

En (Cano, Collazos, Fardoun, Alghazzawi Albarakati, 2016) se presenta un modelo de desarrollo basado en las necesidades de los niños con una discapacidad auditiva, en el que se conjuntan la interacción humano computadora (HCI) y la Inteligencia Artificial para diseñar sistemas interactivos inteligentes capaces de adaptarse a las características y necesidades de los niños sordos. En (Cano, Muñoz-Arteaga, Collazos Bustos Amador, 2015) se plantea la necesidad de alfabetizar al niño con deficiencia auditiva utilizando juegos serios basados en la UX como foco de atracción. Este tipo de juegos inciden en la parte emocional y motivacional del usuario haciendo que su proceso de aprendizaje sea lúdico y sirven para que el niño aprenda reglas y conozca sus capacidades y limitaciones con el propósito de que ese conocimiento le sea útil en situaciones reales. En (Cano, Collazos, Aristizábal, González Moreira, 2017) se discute cómo evaluar la UX de juegos serios para niños sordos que tienen un implante coclear.

En dicho artículo se define la UX como “un conjunto de sentimientos y emociones que se producen en un usuario al interactuar con un producto interactivo”. En (Othman, Sulaiman Aman, 2018) comparan las heurísticas genéricas de Nielsen vs. las heurísticas específicas SMART para detectar problemas de usabilidad en aplicaciones que se ejecutan en dispositivos inteligentes, llegando a la conclusión de que es mejor utilizar heurísticas diseñadas para cada tipo de dispositivo y de sistema en lugar de heurísticas generales de diseño. Con base en esta investigación documental, se observa que existen diversos proyectos avocados al desarrollo de interfaces destinadas a ayudar a las personas con discapacidad auditiva, a comunicarse con los individuos y con el entorno que las rodea. También es notorio que algunas de ellas, se enfocan específicamente en encontrar heurísticas de diseño exclusivas para este tipo de usuarios ya que no es posible utilizar las heurísticas generales de diseño. Por esta razón y por la experiencia que se obtuvo en el caso de estudio (Cruz et al., 2019), es que en esta propuesta se plantea realizar una investigación más amplia que permita corroborar las heurísticas propuestas y colaborar en la definición de heurísticas de diseño aplicables a NCDA.

2. CASO DE ESTUDIO: DESARROLLO DE UNA INTERFAZ PARA LA PRÁCTICA DE LA LSM

En la ciudad de Huajuapán de León, Oaxaca, se tiene una población significativa de personas con discapacidad auditiva que requiere educación especial, las cuales pueden asistir al Centro de Atención Múltiple (CAM) para ser atendidas por especialistas en problemas de lenguaje. Los especialistas del CAM enseñan a los niños sordos la LSM e imparten asesoría a los padres de familia y a los profesores de educación regular que atienden a niños que padecen deficiencia auditiva.

Por el número de niños que requieren aprender LSM, ha sido necesario incorporar maestros de LSM a escuelas primarias de educación regular para ayudar en la identificación, educación y canalización de los NCDA a las dependencias de gobierno responsables de atender este tipo de problemática.

Por otro lado, estudios y estadísticas oficiales (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2013) afirman que las personas con esta discapacidad, en promedio, alcanzan el cuarto grado de primaria, no escriben ni hablan español, pocas de ellas conocen y dominan la LSM, y al llegar a la vida adulta, les es difícil incorporarse a actividades económicas que les permita ser autosuficientes. También se observó que, en muchos casos, el aspecto económico influye negativamente en la educación de los niños, ya que aun viviendo en la misma ciudad donde están las escuelas de educación especial, el costo del transporte urbano es una carga económica muy fuerte para las familias, por lo cual los niños pierden su derecho a la educación.

Ante esta problemática, se diseñó y se implementó la interfaz de computadora (Cruz et al., 2019), cuyas pantallas principales se presentan en las Figuras 1, 2 y 3.



Figura 1: Elección de personajes



Figura 2: Elección de campos semánticos

El propósito principal del proyecto fue poner a disposición de los niños y de sus familias, un medio alternativo que le permitiera practicar la LSM sin necesidad de salir de sus casas. Para garantizar la satisfacción de los usuarios, se utilizó la metodología de desarrollo UCD (*User Centered Design*), la cual impone realizar estudios contextuales para obtener el perfil de usuario y también, la aplicación de pruebas de usabilidad y de UX para asegurar la satisfacción del usuario.

Las características más importantes de la interfaz son: el usuario puede elegir un avatar de ocho disponibles para que le ayude a practicar la LSM, cuenta con cuatro grupos de palabras (comida, familia, hogar y transporte), y dispone de un módulo de conversaciones que le enseña al niño a entablar una conversación por medio de la LSM.



Figura 3: Avatar mostrando cómo ejecutar la LSM

2.1 Perfil de usuario

En el diseño centrado en el usuario, un estudio contextual permite obtener un conocimiento amplio y profundo acerca de los usuarios que utilizarán una interfaz, así que mediante el apoyo de especialistas en problemas de lenguaje y maestros de LSM, se diseñó y se aplicó un estudio contextual a los NCDA que aprenden LSM en el CAM de la ciudad (Cruz et al., 2018), lo que permitió definir el perfil de usuario de estos niños:

1. Niño(a) de seis a catorce años.
2. Padece deficiencia auditiva (anacusia o hipoacusia).
3. Su capacidad cognitiva es similar a la de cualquier otro niño de su edad.
4. Solamente se comunica por medio de señas (formales o informales), o por sonidos difíciles de entender.
5. No puede hablar, leer o escribir en español.
6. Su mundo es un espacio sin sonidos.
7. Está aislado porque pocas personas lo entienden.
8. Los recursos económicos de su familia son muy limitados. Están en el nivel socioeconómico D+ ó D, que corresponden a los dos grupos de menor ingreso económico en México.
9. No posee dispositivos electrónicos propios.
10. Sus padres poseen teléfono celular capaces de ejecutar juegos.
11. La escuela a la que asiste tiene una sala de computadoras.

12. Se siente atraído por la tecnología y la utiliza con entusiasmo cuando dispone de ella.

2.2 Falta de estándares para el diseño de pruebas de HCI y de UX para usuarios con deficiencia auditiva

A partir del perfil de usuario, se realizaron los prototipos de baja y de alta fidelidad tanto de HCI como de UX, lo que permitió obtener la interfaz mostrada en las Figuras 1, 2 y 3. Para la validación de la usabilidad y la UX de la aplicación, se tomaron como referencia las heurísticas de Nielsen (Nielsen, 2012) y las guías de diseño *Material Design* de Google (Google Inc, 2019), pero al momento en que los usuarios probaron la interfaz (Figura 4), fue claro que los botones que aparecen en la barra de navegación de la aplicación, no fueron



Figura 4: Evaluación de HCI y de UX

entendibles por los niños que participaron en la evaluación, como lo muestran los resultados presentados en las Tablas 1 y 2.

Tabla 1: Cambiar grupo de palabras.

	¿es fácil cambiar el grupo de palabras?		
usuario	obs. 1	obs. 2	obs. 3
1	no	x	no
2	no	si	x
3	no	no	no
4	no	no	no
5	no	no	no
6	no	no	no
7	no	no	no
resumen	no		

La razón de esta falta de entendimiento se debió a que los niños no reconocieron el significado estándar que se le da al ícono de la flecha apuntando hacia la izquierda (“regresar”), al de casa o *home* (“ir a la pantalla principal”) y al ícono con la flecha apuntando hacia la derecha en medio de un rectángulo (“salir”). Por lo tanto, fue necesario diseñar otros íconos que tuvieran un significado para los niños, aunque ello implicó apartarse de las heurísticas y guías de diseño convencionales. Visto en retrospectiva, esto es entendible si se considera que los estándares están hechos para usuarios regulares y no para usuarios con algún tipo de discapacidad. Otro aspecto que no está documentado en las heurísticas o en las guías de diseño, es cómo establecer la comunicación entre los observadores y los NCDA, ya que en principio, cada uno tiene su propia lengua, es decir, los observadores utilizan el español y los NCDA utilizan la LSM, pero además, se debe estar consciente de que la percepción del entorno de los NCDA es diferente al del resto de las personas y que por lo tanto, sus juicios, sus valores, sus respuestas y sus reacciones pueden sorprender o desconcertar a un observador que no esté capacitado para trabajar con ellos. Concretamente, los NCDA son individuos que compensan su discapacidad por medio del sentido de la vista, por ejemplo, cuando están enojados y quieren ignorar a su interlocutor, simplemente cierran los ojos o voltean la mirada hacia otro lado, con lo que rompen toda posibilidad de establecer comunicación con ellos.

Tabla 2: Cambiar personaje.

	¿es fácil cambiar de personaje?		
usuario	obs. 1	obs. 2	obs. 3
1	no	x	no
2	no	no	x
3	no	no	no
4	no	no	no
5	no	no	no
6	no	no	no
7	no	no	no
resumen	no		

3. PROPUESTA DE HEURÍSTICAS DE DISEÑO PARA NCDA

Las reglas heurísticas que se presentan en esta sección surgieron de la experiencia que se obtuvo al diseñar y desarrollar una interfaz para NCDA (Cruz et al., 2019). Estas reglas tienen el propósito de indicar las características gráficas que debe tener la GUI de una aplicación para NCDA, y también, señalar lo importante que es utilizar palabras o frases simples, ya que como se ha mencionado, estos usuarios tienen una comprensión limitada del español, y por estar en fase de aprendizaje de la LSM, aun no la dominan en su totalidad.

1. Los íconos deben ser grandes y tener un significado claro y directo. En lo posible se deben evitar aquellos íconos que utilicen símbolos abstractos. Esto se debe a que los NCDA utilizan el sentido de la vista como principal medio para obtener información del entorno que los rodea.
2. Se debe tener cuidado al utilizar metáforas en el diseño de las GUI. Las personas con discapacidad auditiva perciben y conceptualizan su entorno de manera diferente al resto de las personas y hacen una interpretación directa de lo que ven, lo que implica que manejar el significado figurado de las palabras o de las cosas es complicado para ellos.
3. Utilizar con cuidado la dimensionalidad (significado contextual) de la palabra, ya que su comprensión resulta compleja para los NCDA. Por ejemplo, la seña en LSM para “ratón” puede crear confusión ya que se puede aplicar a un ratón de verdad o a un *mouse* de computadora.
4. Los términos para utilizar en una conversación con NCDA, deben ser muy sencillos. Por ejemplo, en lugar de decir “¿qué tan atractivo te parece el rostro del personaje?” se debe preguntar “¿la cara del personaje es fea o bonita?”, o “su cara, ¿te gusta o no te gusta?”. Esto se justifica si se considera que los NCDA no dominan el español y, por lo tanto, pedirles que entiendan y contesten un cuestionario, en muchos casos, va más allá de sus posibilidades.
5. En interacciones de preguntas y respuestas, se recomiendan este tipo de respuestas:
 - (a) Respuestas cerradas de “sí” o “no”.
 - (b) Respuestas mediante caras sonrientes o emoticones (técnica de Likert).
 - (c) Observar atentamente los cambios faciales del usuario para determinar qué emociones experimenta durante la sesión.

Esta heurística se justifica por la misma razón que la anterior: los NCDA no tienen un dominio pleno del español, al grado que muchos de ellos no están oralizados.

Estas heurísticas son las que se proponen como punto de partida, para llevar a cabo una investigación completa acerca de ellas, con el propósito de colaborar en la definición de guías de diseño de interfaces, de pruebas de usabilidad y de UX para NCDA que cumplan con el perfil de usuario descrito anteriormente.

4. REFERENTES DE COMUNICACIÓN Y DE APLICACIÓN DE PRUEBAS DE HCI Y DE UX A NCDA

Además de las heurísticas que se proponen en la sección 3, también se presenta un protocolo de comunicación, y una serie de lineamientos que se deben cumplir al momento de aplicar pruebas de usabilidad con NCDA. Se aclara que tanto el protocolo como los lineamientos son recomendaciones y no reglas a seguir durante el diseño y el desarrollo de interfaces para NCDA.

4.1 Protocolos de comunicación con NCDA

Se considera importante definir un protocolo de comunicación que garantice el respeto hacia la cultura de los discapacitados auditivos. Este protocolo es relevante, si se considera que las personas que diseñan y aplican los estudios contextuales y las pruebas de usabilidad, son en su mayoría, personas oyentes que no tienen experiencia tratando a NCDA. Este hecho hace necesario que los investigadores que interactúen con este tipo de usuario conozcan las reglas de cortesía apreciadas en las comunidades de sordos. El protocolo que se utilizó durante el caso de estudio (Cruz et al., 2019), se muestra a continuación:

1. Comprender la comunicación por medio de la vista y del lenguaje corporal es fundamental para el investigador, ya que este es el medio principal de comunicación del que disponen los NCDA.
2. Cuando se habla con un NCDA se le debe mirar a la cara y estar frente a él. Mirar hacia otro lado equivale a ignorarlo y el niño puede sentirse ofendido o lastimado. Como cualquier otro niño, si se siente ignorado, muy probablemente, se sentirá enojado o triste.
3. Los NCDA perciben y entienden el mundo de manera diferente a como lo hace una persona oyente, lo que obliga al investigador a ser muy cuidadoso en lo que dice y cómo lo expresa al momento de comunicarse con los niños. Para los NCDA, el sentido figurado, el doble sentido o el múltiple significado de una palabra es difícil de entender. Por lo cual una charla con ellos debe ser sencilla, clara y directa.

4. Con el propósito de que el material presentado a los niños sea adecuado y no les cause rechazo o molestia, este debe ser avalado por los maestros y padres de familia responsables de los niños participantes en el proyecto. De no hacerlo, surge el riesgo de provocar reacciones adversas por parte de los niños, de sus padres o de sus maestros, lo que pondría en riesgo la realización del proyecto de investigación o de desarrollo.

4.2 Lineamientos a observar durante las pruebas de usabilidad con NCDA

Las siguientes consideraciones o lineamientos están orientadas hacia los observadores y hacia los facilitadores que aplican las pruebas de usabilidad y de UX en las que participan NCDA:

1. La comunicación oral y directa entre el facilitador y el usuario no es posible. Para comunicarse se debe recurrir a un intérprete de LSM que permita comunicarse entre ellos.
2. Se requiere de un intérprete de LSM a español oralizado porque los niños que participaron en el proyecto eran alumnos del curso de LSM que se impartía en su escuela.
3. En la interpretación de la LSM, la comunicación pierde fidelidad: Cuando se traduce de una lengua a otra, siempre se tiene la probabilidad que los mensajes pierdan fidelidad, sobre todo, cuando la interpretación o traducción se lleva a cabo junto con la conversación.
4. El facilitador le explica al intérprete la tarea que el usuario debe llevar a cabo. Después, el intérprete se lo traduce al usuario y el usuario realiza la tarea solicitada.
5. Las preguntas al usuario deben expresarse en forma breve, sencilla y clara. Esto en razón de las deficiencias de lenguaje propias de las personas con discapacidad auditiva.
6. Los observadores no deben esperar respuestas fonéticas por parte del usuario: Un problema que se tuvo durante las pruebas de alta fidelidad del caso de estudio, fue que los observadores, al no tener conocimiento previo de cómo se comunican los NCDA, se quedaban esperando una respuesta fonética por parte de los usuarios, en lugar de esperar esa respuesta de los intérpretes de LSM que acompañaban a los niños durante la prueba.

7. El intérprete debe reproducir fonéticamente las respuestas o comentarios emitidas por el usuario. De ese modo, tanto el facilitador como los observadores podrán realizar las anotaciones correspondientes.
8. Los observadores deben poner atención en la expresión corporal y facial del usuario y en la interpretación que el intérprete haga de las señas realizadas por el usuario. Si bien es cierto que los niños tienen dificultades para expresarse fonéticamente, no ocurre lo mismo con su lenguaje corporal y facial. Ellos, al igual que una persona sin discapacidades, expresan enojo, alegría y cualquier otro estado de ánimo por medio de sus expresiones faciales y corporales.
9. Los niños tienen periodos de atención cortos y se aburren o se distraen con facilidad, por lo tanto, el tiempo para que evalúen una interfaz debe ser tan breve como sea posible. Al igual que un niño sin discapacidad, los NCDA solamente manejan el tiempo presente. Si deben esperar por largo rato, o hacer algo que les resulte tedioso, se corre el riesgo de que las pruebas fallen. Por ello se recomienda que las tareas sean breves y en lo posible, divertidas o absorbentes.

Estas observaciones surgieron durante las pruebas de usabilidad que se aplicaron mientras se desarrollaba el caso de estudio (Cruz et al., 2019), en donde se notó que los observadores tuvieron dificultades para interpretar las respuestas de los niños que participaron en las pruebas.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

Se deben diseñar y desarrollar aplicaciones para personas con discapacidades físicas o intelectuales, que les permita utilizar y obtener los beneficios que ofrecen las tecnologías de la información. Para que estas interfaces sean útiles, deben desarrollarse de acuerdo a las limitantes de cada tipo de usuario, aún si eso implica desarrollar una aplicación para un único usuario. Para el caso de los NCDA, debe quedar claro que ellos viven en un mundo sin sonidos, lo que cambia su manera de percibir y de interpretar el entorno que los rodea. Cuando se trabaja con este grupo de usuarios, es necesario definir heurísticas de diseño que se ajusten a su perfil, ya que, como quedó de manifiesto en el caso de estudio expuesto en la sección 2, los estándares de facto no son adecuados para este tipo de usuarios. Esta falta de consideración fue la causa que motivó plantear las heurísticas de la sección 3, las cuales ya han probado su eficacia en la conclusión del caso de estudio que les dio origen. Sin embargo, para definir su ámbito de aplicación, estas deben probarse en otros desarrollos e investigaciones centradas en este tipo de usuarios. Para ello se plantea llevar a cabo el proyecto *Oraciones en LSM*, que consiste en desarrollar una base de palabras o corpus en LSM, que contenga los elementos lingüísticos necesarios, para que el avatar pueda expresar oraciones imperativas, exclamativas,

interrogativas, negativas, dubitativas y desiderativas, de tal manera que el usuario, al interactuar con el sistema, muestre qué tanto entiende las oraciones que el avatar ejecuta. Este proyecto utilizará como eje de desarrollo la metodología UCD y pondrá a prueba las guías de diseño que se han propuesto en este documento.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce y se agradece la colaboración de la maestra Dorisel Aguirre Ramírez en este trabajo. La maestra Dorisel Aguirre Ramírez es Lic. en educación especial, tiene una especialidad en audición y lenguaje y una maestría en sicopedagogía clínica. Ella también trabaja como maestra de LSM en diferentes instituciones educativas.

REFERENCIAS

- Cano, S., Collazos, C., Fardoun, H., Alghazzawi, D., y Albarakati, A. (2016, 07). Model based on learning needs of children with auditory impairment. , 9742, 324-334.
- Cano, S., Collazos, C. A., Aristizábal, L. F., González, C. S., y Moreira, F. (2017). Assessing user experience for serious games in auditory-verbal therapy for children with cochlear implant. In Á. Rocha, A. M. Correia, H. Adeli, L. P. Reis, y S. Costanzo (Eds.), *Recent advances in information systems and technologies* (pp. 861–871). Cham: Springer International Publishing.
- Cano, S., Muñoz-Arteaga, J., Collazos, C., y Bustos Amador, V. (2015, 09). Model for analysis of serious games for literacy in deaf children from a user experience approach. doi: 10.1145/2829875.2829885
- Cruz, G., Fernández, C., y Trujillo, F. (2018, 10). Estudio contextual y propuesta de interfaz para la práctica de la lengua de señas mexicana en la mixteca oaxaqueña. In U. A. de Yucatán (Ed.), *Recent advances in information systems and technologies* (pp. 12–23).
- Cruz, G., Fernández, C., y Trujillo, F. (2019). Desarrollo de una interfaz basada en la metodología de diseño centrada en el usuario para la práctica de la lengua de señas mexicana [Tesis de maestría]. Huajuapán de León, Oaxaca, México.

- Google Inc. (2019). *Material design*. <https://material.io/design/>. UEA. ([Online; accedido 2019-05-27])
- Hutter, L., y Lawrence, H. M. (2018, October). Promoting inclusive and accessible design in usability testing: A teaching case with users who are deaf. *Commun. Des. Q. Rev*, 6(2), 21–30. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/3282665.3282668> doi: 10.1145/3282665.3282668
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Las personas con discapacidad en México: Una visión al 2010*. México.
- Marcus, A. (2016, 01). Design, user experience, and usability: Design thinking and methods: 5th international conference, held as part of hci international 2016, Toronto, Canada, July 17–22, 2016, proceedings, part i. doi: 10.1007/978-3-319-40409-7
- Mich, O. (2009). Evaluation of software tools with deaf children. In *Proceedings of the 11 th international acm sigaccess conference on computers and accessibility* (pp. 235–236). New York, NY, USA: ACM. doi: 10.1145/1639642.1639692
- Michelle, T. C. Y. (2015). Developing deaf or hard of hearing children's social and emotional skills through interactive experiences. In *Proceedings of the international hci and ux conference in Indonesia* (pp. 61–64). New York, NY, USA: ACM. Retrieved from <http://doi.acm.org/10.1145/2742032.2742041> doi: 10.1145/2742032.2742041
- Nielsen, J. (2012). *Usability 101: Introduction to usability*. <https://www.nngroup.com/articles/usability-101-introduction-to-usability/>. UEA. ([Online; accedido 2017-05-18])
- Othman, M. K., Sulaiman, M. N. S., y Aman, S. (2018). Heuristic evaluation: Comparing generic and specific usability heuristics for identification of usability problems in a living museum mobile guide app. *Advances in HumanComputer Interaction, Volume 2018, Article ID 1518682, 13 pages*. Retrieved from <https://doi.org/10.1155/2018/1518682> doi: 10.1155/2018/1518682
- Wong, M., Khong, C., y Thwaites, H. (2012). Applied ux and ucd design process in interface design. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 51, 703 - 708. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877042812033666> (The World Conference on Design, Arts and Education (DAE-2012), May 1-3 2012, Antalya, Turkey) doi: <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.08.228>
- Yeratziotis, A., y Zaphiris, P. (2017, 06). A heuristic evaluation for deaf web user experience (he4dwux). *International Journal of Human-Computer Interaction*, 34. doi:10.1080/10447318.2017.1339940

NOTAS BIOGRÁFICAS

Gerardo Cruz González. Es egresado de la escuela de Físico - Matemáticas de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP) y tiene el grado de maestría en ciencias con especialidad en Ingeniería en Sistemas Computacionales otorgado por la Universidad de las Américas-Puebla. Ha laborado como profesor en la Facultad de Computación de la BUAP y en la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM), en donde actualmente tiene el nombramiento de Profesor-Investigador de tiempo completo. En la UTM también ha sido jefe de la carrera de Ingeniería en computación y secretario de la División de Estudios de Posgrado. Su línea de investigación es la Interacción Humano-Computadora en el área de discapacidad auditiva.

Carlos Alberto Fernández y Fernández. Egresado de la Facultad de Informática de la Universidad Veracruzana, con una Maestría en Ciencias de la Computación en la Fundación Arturo Rosenblueth. Recibió el grado de Doctor en Ciencias de la Computación en la Universidad de Sheffield. Se encuentra adscrito al Instituto de Computación de la Universidad Tecnológica de la Mixteca, del cual es director desde el año 2017. Ha sido coordinador de la Universidad Virtual y de la Maestría en en Sistemas Distribuidos. Trabaja dentro del área de Ingeniería de Software, particularmente en las líneas de modelado visual, métodos de desarrollo y especificación formal de software. Ha sido responsable del Cuerpo Académico de Ingeniería de Software en la UTM y miembro del Verification and Testing Research Group en la Universidad de Sheffield.

Felipe de Jesús Trujillo Romero. Es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica (FIMEE) de la Universidad de Guanajuato, es Maestro en Ingeniería Eléctrica Opción: Instrumentación y Sistemas Digitales por la Facultad de Ingeniería Mecánica, Eléctrica y Electrónica (FIMEE) de la Universidad de Guanajuato y es Doctor en Sistemas Informáticos por el Institut National Polytechnique de Touloluse. Actualmente labora en el Departamento de Ingeniería Electrónica de la Universidad de Guanajuato en Salamanca, Gto., México. Sus líneas de investigación son: Robótica Inteligente, Visión por computadora, Computación evolutiva, Graficas por computadora y Sistemas reconfigurables.



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

PROTOTIPO DE INTERFAZ HUMANO- COMPUTADORA CONTROLADA A TRAVÉS DE GESTOS FACIALES

HUMAN-COMPUTER INTERFACE PROTOTYPE CONTROLLED THROUGH FACIAL GESTURES.

Fernando Octavio Reynoso Martínez¹
iscferhogan@gmail.com

María Antonieta Abud Figueroa¹
mabud@itodepi.edu.mx

Silvestre Gustavo Peláez Camarena¹
sgpelaez@itodepi.edu.mx

Lisbeth Rodríguez Mazahua¹
lrodriguez@itodepi.edu.mx

Ulises Juárez Martínez¹
ujuarez@itodepi.edu.mx

¹*División de Estudios de Posgrado e Investigación
Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Orizaba
Orizaba, Ver., México*

RESUMEN

Las interfaces humano-computadora se basan principalmente en el modelo de ventanas, punteros y ratones como paradigma dominante para la interacción con las aplicaciones. El uso de gestos es una adición valiosa al repertorio de técnicas de interacción humano-computadora, sin embargo, requieren tiempo para desarrollarse mejor. Como toda nueva tecnología presenta nuevos desafíos, entre los cuales se encuentra el contar con herramientas que soporten el desarrollo de aplicaciones que incluyan este tipo de interacción. Esto conlleva a la necesidad de desarrollar la infraestructura de soporte para el manejo de interfaces a través de gestos. Por lo que se propone un prototipo para el manejo de interfaces humano-computadora a través de gestos faciales, con la finalidad de establecer una base que permita desarrollar a futuro una biblioteca que permita a los desarrolladores desarrollar interfaces gestuales de manera fácil.

PALABRAS CLAVE

Interfaces-Humano-Computadora, Gestos faciales, Arquitectura.

ABSTRACT

Human-computer interfaces are mainly based in the window, pointer, mouse model as a dominant paradigm for the interaction with applications. The use of gestures is a valuable addition to the repertoire of human-computer interaction techniques, however, they require time to develop better. Like every new technology it presents new challenges, among the which it is to have tools that support the development of applications that include this type of interaction. This leads to the need of developing the support infrastructure for the managing of interfaces through gestures. So it is proposed a prototype for the managing of human-computer interfaces through facial gestures, with the purpose of establishing a base that will allow in the future the creation of a library that allows developers to develop gestural interfaces in an easy way.

KEYWORDS

Human-Computer-Interface, Facial Gestures, Architecture.

INTRODUCCIÓN

Las interfaces humano-computadora tiene gran repertorio de técnicas para la interacción, una de ellas es el uso de gestos faciales, esta técnica presenta un crecimiento lento, ya que su implementación depende de diversos factores y aún no se tienen estándares que regulen su significado de modo que los mismos gestos signifiquen lo mismo en diferentes sistemas. Esto conlleva a la necesidad de desarrollar la infraestructura de soporte para el manejo de interfaces a través de gestos. Los sistemas gestuales son uno de los caminos futuros importantes para una interacción más holística y humana de las personas con la tecnología, representando un gran potencial para mejorar la interacción. Sin embargo, como toda nueva tecnología presenta nuevos desafíos, entre los cuales se encuentra la necesidad de herramientas que soporten el desarrollo de aplicaciones que incluyan este tipo de interacción. Por esta razón, en este trabajo se presenta el desarrollo de un prototipo de una interfaz humano-computadora controlada a través de gestos faciales utilizando la diadema Emotiv Epoc+. El artículo se organiza de la siguiente forma: en la sección II se presentan los trabajos relacionados con la interacción humano-computadora; en la sección III se describe la parte metodológica, la cual contiene la descripción de la arquitectura y de los módulos que conforman el prototipo; por último, en la sección IV se mencionan las conclusiones generadas con base en los resultados obtenidos y el trabajo a futuro.

1.1 TRABAJOS RELACIONADOS

Varios autores han realizado trabajos en el área de las interfaces controladas por gestos. Los principales trabajos se mencionan a continuación:

Hawkes et, al. [1] establecieron como propósito probar la confiabilidad y utilidad de la diadema Emotiv EPOC para determinar si se debe utilizar en el campo médico ya que se piensa que una Tecnología como ésta ayudará a aquellos que sufren de parálisis debidas a enfermedades tales como la ALS (Esclerosis lateral amiotrofia), ya que la enfermedad no tiene cura es importante una solución que ayude a mejorar las necesidades médicas. Para la solución se propuso contemplar el uso de la diadema Emotiv EPOC, para el control de robot Finch mediante expresiones faciales, se concluyó que la diadema Emotiv Epoc tuvo éxito al ser conectada y controlar al robot Finch, pero con algunas fallas el dispositivo reconoció los movimientos de las personas, así como también que la diadema no es médicamente funcional o confiable.

Hornero et, al. [2] mencionaron la existencia de soluciones previas para ayuda de la discapacidad utilizando TIC'S, a pesar de contar con soluciones existentes sus costos son elevados, requieren de procesos de calibración por cada usuario, lo que limita su usabilidad, por lo que su propuesta usa un acelerómetro ADXL345, el microcontrolador ATmega328A, el driver FTDI232RL, una placa de circuito impreso, cinta elástica, Bluetooth (módulo RN41-XV), Labview para desarrollar un módulo de modo Ratón y modo Teclado. El modo Ratón asocia cada movimiento del usuario a las direcciones del ratón. El modo Teclado se presenta en dos opciones de funcionamiento.

En la primera se asocian cuatro movimientos escogidos con anterioridad por el usuario y en la segunda opción, si el usuario presenta una mayor habilidad motora, se asocian los diferentes movimientos que el usuario haya escogido.

Melodie Vidal et, al. [3] resaltaron la importancia de tomar en cuenta las características de los ojos cuando se busca detectar si se sigue un objeto en movimiento, sobre todo el hecho de que esta característica de la orientación de objetos en movimiento es más difícil explotar que la orientación de objetos estáticos, por lo que se necesita un método diferente a los anteriores. Su propuesta usó una pantalla grande (89x50 cm, 1920x1080px) y un seguidor ocular remoto Tobii X300. Se obtuvo como resultado final el método Pursuits y tres aplicaciones interactivas.

Liang et, al. [4] resaltaron que es importante contar con una solución de tecnologías de seguimiento de manos y reconocimiento de gestos para simplificar las operaciones y proporcionar una interfaz intuitiva, en la que los niños utilicen gestos con la mano para manipular marionetas virtuales para realizar historias. Propusieron usar el controlador Leap Motion, el Leap Motion SDK proporcionado por Leap Motion como dispositivo sensor *HCI (Human-Computer Interaction, Interacción Humano-Computadora)* para rastrear gestos con las manos, Leap Motion SDK como *API (Application Programming Interface, Interfaz de Programación de Aplicaciones)* para acceder a los datos de movimiento de las manos y los dedos del dispositivo, Maya 2014 para crear todos los modelos y animaciones 3D y Unity3D Pro V4.2 para integrar y desarrollar todo el sistema. La arquitectura del sistema se compone principalmente de tres partes: entrada, control de movimiento y salida.

McAdam et, al. [5] discutieron la importancia que tiene el movimiento humano de forma natural para resolver problemas complejos en la dinámica del movimiento; por lo cual se indicó la importancia de representar un entorno virtual multisensorial donde el espacio de fase 3D del problema sea asignado a un sistema de coordenadas visuales en 3D, propusieron usar una computadora Dell T3400 de doble núcleo a 3.00 GHz, un monitor de 120Hz de 22 pulgadas y una pluma háptica Phantom Omni 6 grados de libertad para la entrada. La visualización 3D se implementó utilizando Microsoft DirectX en Windows 7 con renderización estereoscópica y efectos de sonido 3D para reforzar la posición y el movimiento de la bola en el espacio, la bola en el espacio 3D representa el estado actual del sistema. Como resultado final se obtiene la simulación de un sistema de bastón de carga.

Hayashi et, al. [6] resaltaron las características de las interfaces naturales de usuario resaltando la modalidad de gestos físicos. Los autores indicaron la importancia de contar con un sistema que no requiera ninguna memorización, ya que a pesar de existir trabajos anteriores la capacidad de recordar estos gestos no está clara, por lo que su propuesta usa "Microsoft Kinect SDK 1.5", Kinect, Matlab, Weka. Macbook Pro con Intel Core i7 a 2,6 GHz. Se obtiene como resultado final la identificación del usuario basada en el cuerpo: una nueva forma de identificación del usuario basada en las longitudes del segmento del cuerpo y un gesto de agitar la mano.

Heijboer et al. [7] resaltaron que el puntero de luz es un dispositivo adecuado para estudiar la viabilidad de las interacciones periféricas con una interfaz gestual. El objetivo de este experimento exploratorio fue rediseñar los estilos de interacción del puntero de luz de tal manera que potencialmente podría interactuar con la periferia de la atención. Por lo tanto, se exploró qué gestos y qué tipo de comentarios serían los más adecuados para la interacción periférica. El puntero de luz y una lámpara estuvieron controlados por un Phidget Interfacekit1 que está conectado a un Apple iMac ejecutando el software Max / MSP / Jitter.

De Carolis et al. [8] resaltaron la importancia de las características *NUI (Natural User Interface, Interfaz Natural de Usuario)*, por lo tanto, el objetivo fue proporcionar a los usuarios una interfaz natural para acceder a información adicional sobre las prendas que se muestran en los maniquíes desde el exterior, incluso cuando la tienda está cerrada. El prototipo se desarrolló utilizando un dispositivo comercial popular que permite la interacción sin contacto: Microsoft Kinect 21.

Mehler et al. [9] resaltaron que cada vez más interfaces humano-computadora (HCI) son diseñadas para incorporar medios de comunicación no verbal. La escritura gestual se centra principalmente en el nivel perceptual de las descripciones de las imágenes. WikiNect se propuso como un sistema que permite autoría de hipertextos mediante escritura gestual. Para la propuesta se usó la tecnología Kinect y como es un prototipo no se mencionó algún lenguaje de programación, dividiendo su arquitectura en segmentación, vinculación, descripción y calificación de imágenes. El resultado final fue el módulo de gestión de sesión.

Barrón et al. [10] discutieron la importancia de los entornos de aprendizaje tradicionales, los cuales no proporcionan un modelo de aprendizaje individual. Para superar este problema se propuso un sistema que utilice expresiones faciales y señales de EEG (*Electroencephalography Signals, Señales Electroencefálicas*) para el reconocimiento de la emoción. El sistema utilizó la diadema Emotiv Epoc para registrar las señales de EEG del estudiante y Motor de Lógica Difusa, el cual es el responsable de evaluar emociones cognitivas y afectivas.

Las propuestas revisadas aunque utilizan interfaces naturales, la minoría incluyen gestos faciales para la interacción, por lo que en la presente propuesta se busca cubrir este punto.

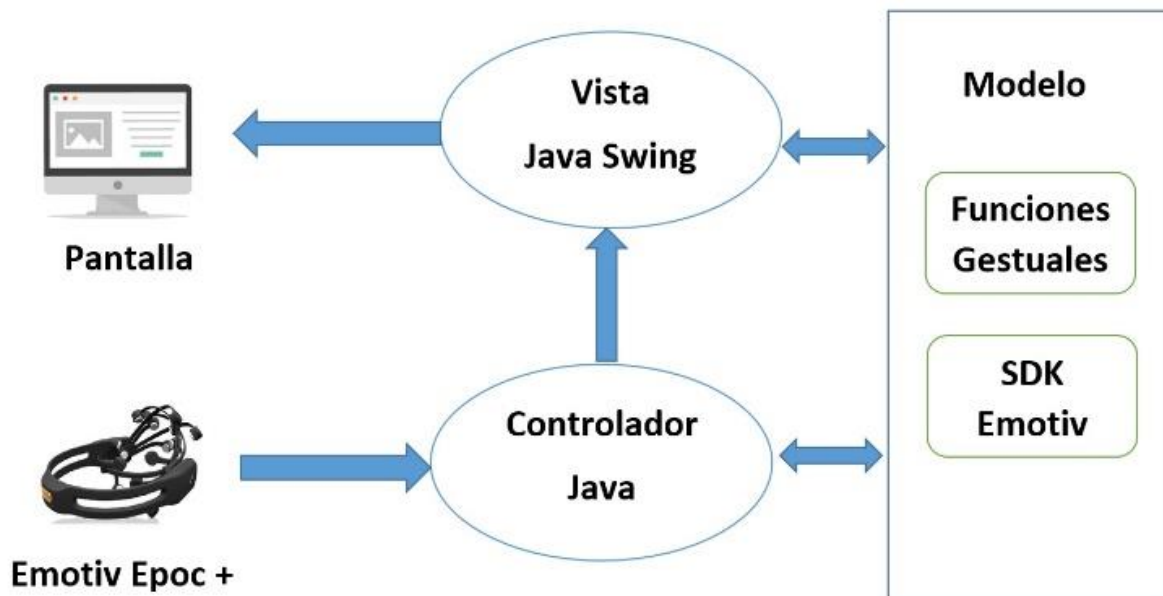
MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se presenta la descripción de la arquitectura y los módulos que conforman el prototipo para el manejo de interfaces humano-computadora a través de gestos faciales.

El patrón arquitectónico elegido para la arquitectura del prototipo es el patrón *MVC (Model-View-Controller, Modelo-Vista-Controlador)*, como se muestra en la Figura 1, contiene tres componentes:

1. **Vista:** Este componente presenta la interfaz gráfica la cual en este caso es Java Swing, interfaz que será controlada por medio de gestos faciales.
2. **Controlador:** Este componente contiene la lógica necesaria para la interacción entre el modelo y la vista, así como para manejar las interacciones del usuario.
3. **Modelo:** Componente que contiene la definición de las funciones que permitirán el control del apuntador de ratón a través de gestos faciales como son sonrisa, guiño derecho, guiño izquierdo, mirada derecha y mirada izquierda y se integran los flujos de datos al dispositivo y proporciona acceso a la API del mismo.

Fig. 1. Arquitectura del prototipo.



El patrón arquitectónico MVC ha tenido una gran influencia en el desarrollo de diseño de interfaces gráficas de usuario.

Su objetivo principal es promover la independencia de desarrollo de sus componentes, si se desea hacer un cambio en algún componente no afectará a los demás y viceversa.

El componente modelo encapsula la información utilizada por la aplicación; el componente vista encapsula la información elegida y necesaria para la representación gráfica de esa información; el componente controlador encapsula lo lógico necesario para mantener el buen funcionamiento entre el modelo y la vista y maneja los eventos de entrada del usuario [11].

Para el desarrollo del prototipo se eligieron las siguientes tecnologías:

Emotiv Epoc + por su característica de reconocer expresiones faciales y su SDK (*Software Development Kit, Kit de desarrollo de software*) brinda las herramientas que se necesitan para administrar y escalar aplicaciones. Java se escogió por su buena integración con el SDK de Emotiv Epoc +, todo esto utilizando el entorno de desarrollo NetBeans.

La decisión está determinada por la conjugación de las tecnologías de la información descritas a continuación:

- **Lenguaje de programación:** Java es un lenguaje de programación orientado a objetos, distribuido, interpretado, robusto, portable, multihilo, dinámico e independiente de arquitecturas [12].
- **Dispositivo:** Se eligió Emotiv EPOC + dado que es un electroencefalograma multicanal y está diseñado para la investigación del cerebro humano escalable y contextual y para aplicaciones avanzadas de interfaz cerebro-computadora y brinda acceso a datos cerebrales de grado profesional, su plataforma de desarrollo es compatible con Java y a diferencia de otras cuenta con reconocimiento de expresiones faciales (parpadeo, guiño, sorpresa, fruncir el ceño, sonreír, apretar, reír, sonreír), dada la naturaleza del proyecto son necesarias [13].
- **Entorno de desarrollo:** Se eligió NetBeans debido a su gran interfaz de desarrollo y amplio soporte para hacer aplicaciones gráficas [14].

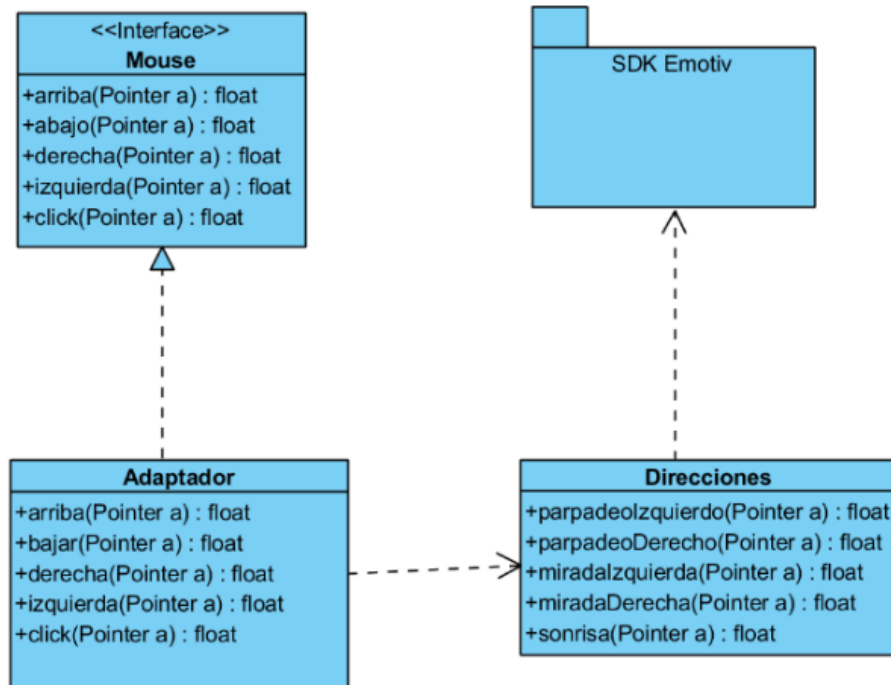
METODOLOGÍA

El prototipo permite mostrar el control del *ratón* a través de gestos faciales. Utilizando el SDK de Emotiv se detectan los gestos, los cuales se mapean a comandos ejecutables en el prototipo. Los comandos utilizados son:

- **Parpadeo Izquierdo:** Cuando la persona hace un parpadeo con el ojo izquierdo, el *ratón* se mueve con dirección hacia arriba.
- **Parpadeo Derecho:** Cuando la persona da un parpadeo con el ojo derecho, el *ratón* se mueve con dirección hacia abajo.
- **Mirada a la izquierda:** El *ratón* se mueve hacia la izquierda cuando la persona lleva su vista hacia el lado izquierdo.
- **Mirada a la derecha:** El *ratón* se dirige hacia el lado derecho cuando la persona cambia la mirada hacia el lado derecho.
- **Sonrisa:** Cuando la persona sonríe, la acción corresponde a dar un clic izquierdo al *ratón*.

En la Figura 2 se muestra la estructura de clases para el mapeo de los comandos basándose en el patrón de diseño Adapter.

Fig. 2. Diagrama de clases del prototipo.

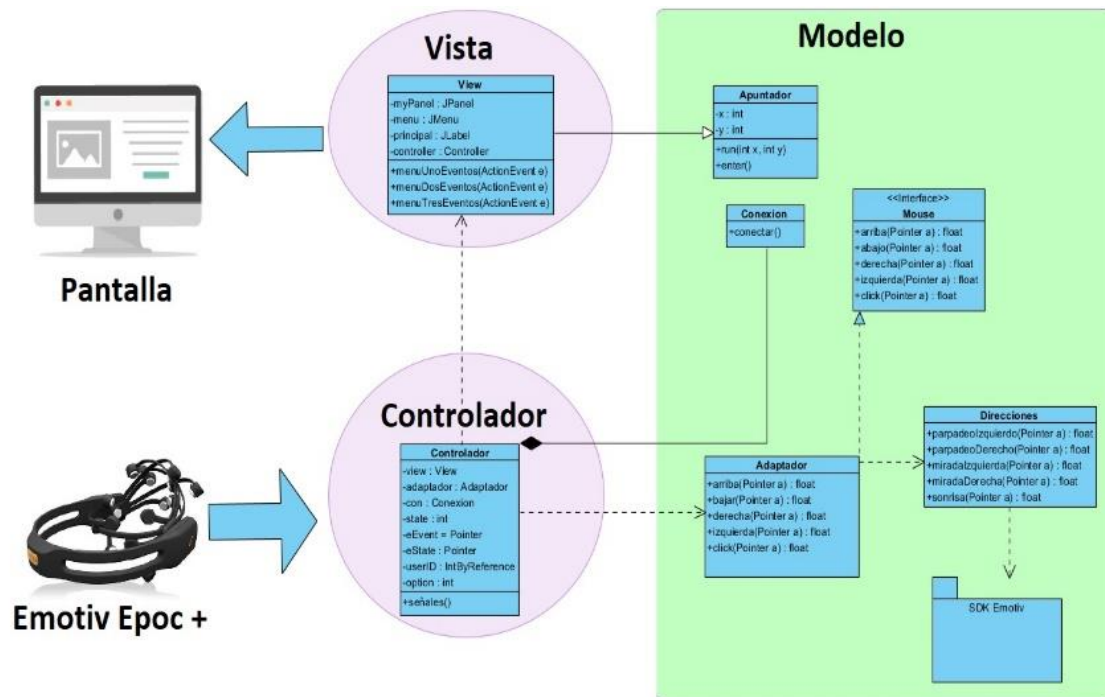


En la interfaz *Mouse* se definen los métodos a implementar para reemplazar el uso directo del ratón como lo son, arriba, abajo, derecha, izquierda y clic, los cuales son implementados en la clase *Adaptador*. La clase *Direcciones* contiene los métodos de los gestos de la cara que serán utilizados y que se basan en el uso de las funciones proporcionadas por el SDK de Emotiv.

El diagrama de clases del prototipo resultante se muestra en la Figura 3. El prototipo se diseñó bajo el modelo MVC. En la Vista se tiene la clase *View* que hereda de la clase *Apuntador*, la cual siempre debe integrarse en todos los programas en el modelo puesto que contiene las coordenadas de donde se quiere inicializar el apuntador del *ratón* al comenzar a utilizar la aplicación y el manejo del clic izquierdo.

En la parte del modelo se encuentran las interfaces y la clase mostrada en el diagrama de clases del prototipo presentado anteriormente. Todo esto es implementado en la clase controlador.

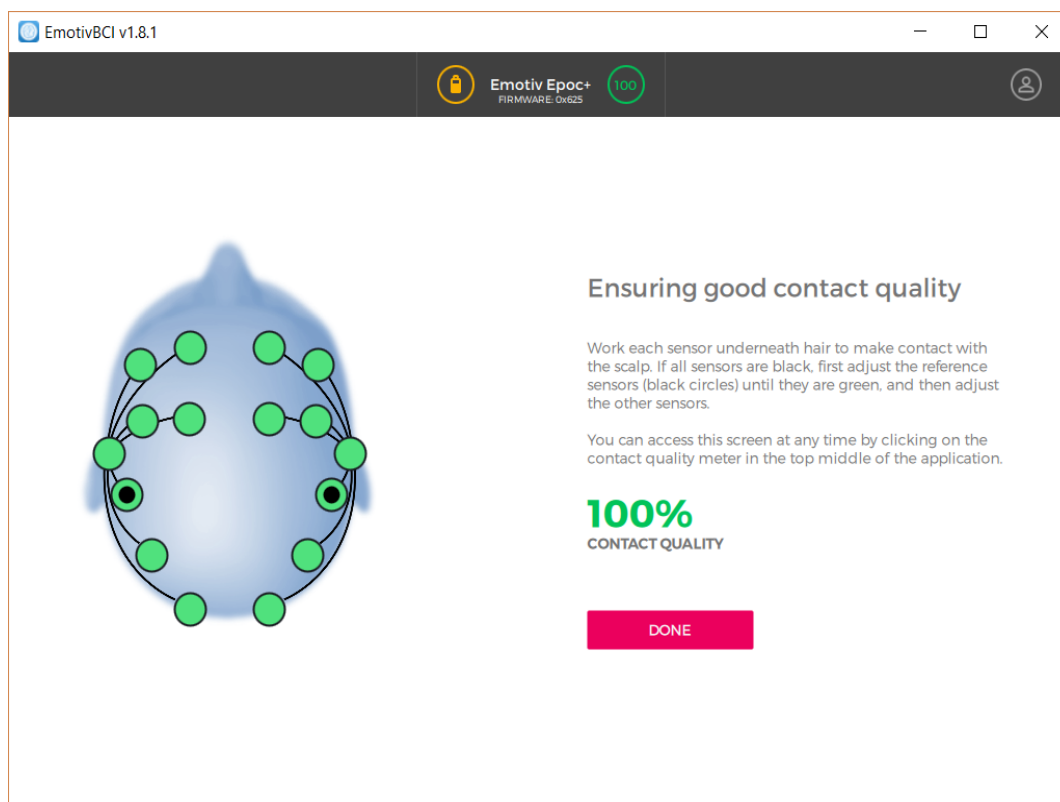
Fig.3. Diagrama de clases de la implementación del prototipo.



Para la ejecución del programa es necesario humectar con una solución salina las almohadillas que contienen los electrodos de la diadema Emotiv Epoc +.

Después de esto se debe conectar el receptor USB a la computadora e iniciar al programa EmotivBCI para verificar que todos los electrodos estén funcionando correctamente y que la carga de la batería es adecuada. La Figura 4 muestra la imagen de la diadema funcionando en forma correcta.

Fig. 4. Imagen del programa EmotivBCI, el cual muestra el estado de los electrodos de la diadema Emotiv Epoc + y el estado de la batería.



Una vez verificado el buen funcionamiento de la diadema Emotiv, inicia el funcionamiento del prototipo. Como se muestra en la Figura 5, el prototipo presenta del lado derecho, los gestos que pueden utilizarse para mover el apuntador del *ratón* y en qué dirección se dirigen, de modo que al realizar el parpadeo con el ojo izquierdo, el apuntador se moverá hacia arriba, mientras que al parpadear con el ojo derecho se moverá hacia abajo; al dirigir la mirada hacia la izquierda, el apuntador se moverá hacia la izquierda; dirigiendo la mirada a la derecha, el apuntador se mueve a la derecha; la activación del clic ocurrirá cuando se realiza una sonrisa. Al dar clic teniendo el apuntador sobre alguno de los botones, aparecerá en la caja de texto titulada “Acciones de botones” un texto indicando el número de botón seleccionado.

De igual manera, en la parte superior de la pantalla se encuentran cuatro menús, los cuales contienen submenús, y presentan un funcionamiento similar, indicando su nombre en la pantalla cuando son seleccionados.

Para iniciar el programa se debe realizar cualquier gesto, lo que producirá que el apuntador del *ratón* aparezca en la pantalla, como muestra la Figura 6.

Fig. 5. Pantalla de la implementación del programa de prueba del prototipo de la capa de funciones gestuales.

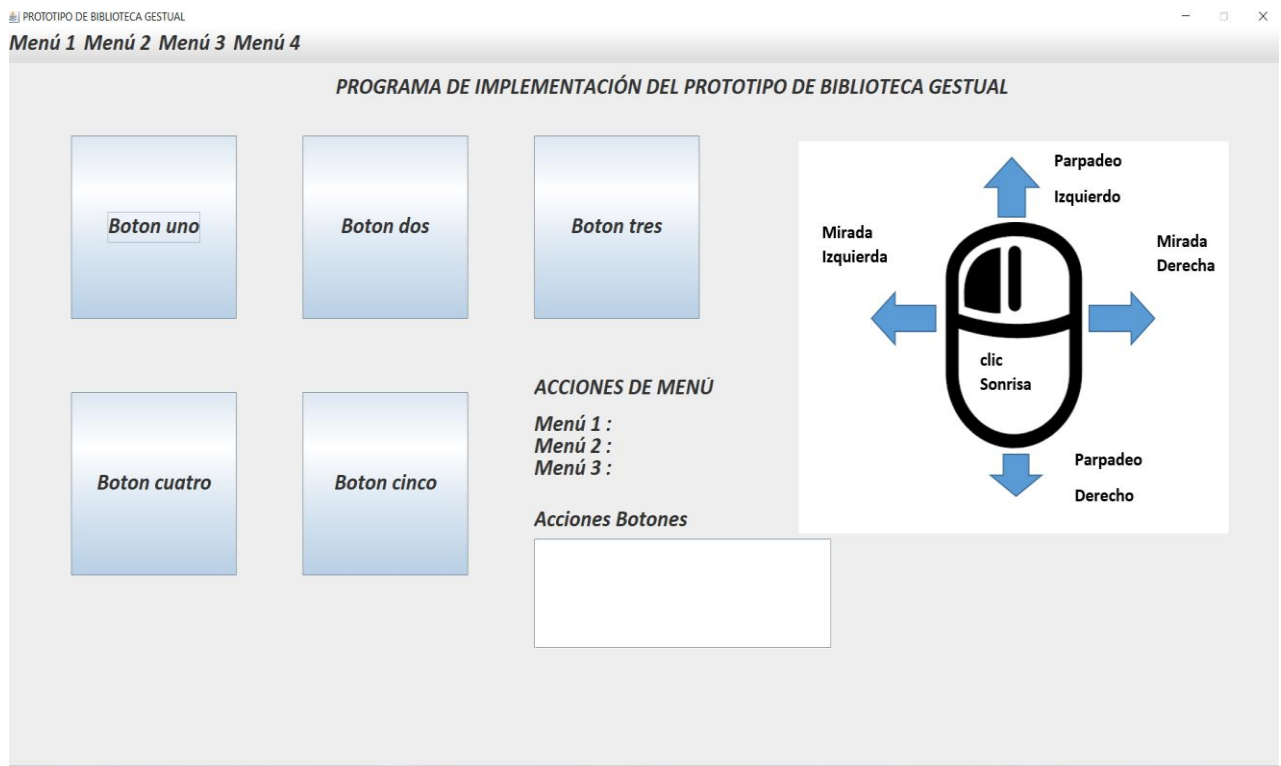


Fig. 6. Ejemplo de inicio de aplicación con gesto.



Como resultado del uso del prototipo se encontró que tuvieron un 90 % de efectividad las interfaces gestuales que fueron configuradas en el prototipo ya que en de diez veces que se probó su funcionamiento fallaron una vez al ser solicitadas. Sin embargo, se presentan algunos problemas en el funcionamiento ya que existe un desfase debido a los movimientos involuntarios de la cara, porque algunas veces al realizar un gesto involuntariamente se activa otro que no se quiere y algunas veces la reacción de la diadema se retrasa. También se encontró que el cabello abundante dificulta el reconocimiento de los electrodos de la diadema.

CONCLUSIONES

Las interfaces humano-computadora son muy usadas hoy en día en muchos sectores de la sociedad, tanto en la industria como en la vida diaria de las personas. Actualmente se observan una gran cantidad de tecnologías con las cuales el ser humano interactúa de diferentes formas, muchas aplicaciones sirven para mejorar la vida diaria de muchas personas o simplemente de ocio.

El desarrollo del prototipo para control del apuntador del *ratón* a través de gestos faciales demostró que es factible el uso de la diadema Emotiv en una interfaz gestual.

Se demostró que Java Swing es una tecnología la cual permite trabajar el uso de interfaces diferentes al *ratón* y al teclado de la computadora. Igualmente se demostró que el patrón de diseño adapter es útil para enlazar el api de la diadema con las clases creadas en el prototipo; se demostró que trabajar con un el patrón arquitectónico MVC promueve la independencia en el desarrollo de componentes; por otra parte, se concluyó que la diadema Emotiv Epoc + es un gran avance tecnológico para el uso de interfaces gestuales, pero aún no es del todo precisa al obtener las señales de interfaces gestuales mediante Java.

4.1 TRABAJOS A FUTURO

Como trabajo futuro se propone la creación de una biblioteca para el manejo de interfaces humano-computadora a través de gestos faciales, que permita la estandarización de gestos faciales, lo cual será una herramienta importante para trabajos futuros de programadores, ya que habrá más infraestructura, que en estos momentos es escasa, la importancia de estas bibliotecas radica en que pueden ser usadas tanto para el desarrollo de aplicaciones para ayudar a comunicar personas con dificultades físicas, hacer aplicaciones domóticas, juegos y muchas aplicaciones más.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo cuenta con apoyo por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT).

REFERENCIAS

- [1] A. Hawkes, A. Liu, R. Tashakkori, E. Jackson, J. Tate, S. Tashakkori, D. Kale, M. Parry ,” Using the Emotiv EPOC Neuroheadset as an EEGControlled BrainComputer Interface”, in Summer Ventures in Math and Science 2015, pp 1–15, June 2015.
- [2] G. Hornero, E. Font, J. Tejedo, O. Casas, “Interfaz gestual para el acceso a plataformas digitales y control de plataformas para el ocio”, VI Congreso Internacional de Diseño, Redes de Investigación y Tecnología para todos (DRT4ALL), Madrid, 2015 pp. 667-692.
- [3] M. Vidal, K. Pfeuffer, A. Bulling, H. Gellersen,” Pursuits: Eye-Based Interaction with Moving Targets”, The ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, Paris, 2013, pp. 3147-3050.
- [4] H. Liang, J. Chang, I. K. Kazmi, J.J. Zhang, P. Jiao,” Hand gesture-based interactive puppetry system to assist storytelling for children”, in The Visual Computer, vol 33, pp 517–531, Apr. 2017.
- [5] R. McAdam, K. Nesbitt, “Leveraging Human Movement in the Ultimate Display”, Proceedings of the Thirteenth Australasian User Interface Conference (AUICT2013), Melbourne, 2013, pp. 11-20.
- [6] E. Hayashi, M. Maas, Jason I. Hong,” Wave to Me: User Identification Using Body Lengths and Natural Gestures”, CHI '14 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems (CHI EA '14), Toronto,2014, pp. 3453-3462.
- [7] M. Heijboer, E. van den Hoven, B. Bongers, S. Bakker,” Facilitating peripheral interaction: design and evaluation of peripheral interaction for a gesture-based lighting control with multimodal feedback”, in Personal and Ubiquitous Computing, vol. 20, no 1, pp 1–22, Dec. 2015.
- [8] B. De Carolis, Giuseppe Palestra, “Gaze-based Interaction with a Shop Window”, International Working Conference on Advanced Visual Interfaces, Bari, 2016, pp. 304-305.
- [9] A. Mehler, A Lücking, G. Abrami, “WikiNect: image schemata as a basis of gestural writing for kinetic museum wikis” in Universal Access in the Information Society, vol. 14, no. 3, pp 333–349, Sep 2015.
- [10] M. Barrón-Estrada, R. Zatarain-Cabada, C. Aispuro-Gallegos, C. de la Luz Sosa-Ochoa, M. Lindor Valdez, “Java Tutoring System with Facial and Text Emotion Recognition”. International Journal of Advanced Research in Computer Science. 106. 49. 2015.
- [11] R.N. Taylor, N. Mendvidovic, E. M. Dashofy, “Software Architecture” Foundations, Theory and Practice, John Wiley & Sons, 2009, pp. 94-97.

[12] “¿Por qué los desarrolladores de software eligen Java?” [Online]. Available: <https://www.java.com/es/about/> [Accessed: 04/Abril/2018].

[13] “EMOTIV EPOC+ 14 Channel Mobile EEG”, [online]. Available: <https://www.emotiv.com/product/emotiv-epoc-14-channel-mobile-eeg/>. [Accessed: 04/Abril/2018].

[14] “The NetBeans Platform”, [online]. Available: <https://netbeans.org/features/platform/index.html> . [Accessed: 04/Abril/2018].

NOTAS BIOGRÁFICAS



Fernando Octavio Reynoso Martínez es Ingeniero en Sistemas Computacionales del Instituto Tecnológico de Orizaba y actualmente es estudiante de la Maestría en Sistemas Computacionales en el Instituto Tecnológico de Orizaba. Su área de investigación es el desarrollo de aplicaciones de escritorio. Se ha desempeñado como desarrollador en el sector privado de México.



María Antonieta Abud Figueroa, nació en la ciudad de Orizaba, Ver. Es ingeniero en electrónica por la UAM-Iztapalapa, México DF en el año 1984, y maestra en ciencias en sistemas de información por el ITESM-Morelos, en la ciudad de Cuernavaca, Mor. en el año 1991

Ella fue profesora de tiempo completo en el ITESM Campus Central de Veracruz entre los años 1985 y 1993; desde el año 1995 es profesora-investigadora en el área de posgrado del Instituto Tecnológico de Orizaba, en la ciudad de Orizaba, Ver. México. Tiene reconocimiento de Perfil Deseable PRODEP desde el año 2005 y es líder del cuerpo académico en consolidación “CADAIMIS”. Sus áreas de interés son la Ingeniería de Software y las Interfaces Humano-Computadora. La M.C. Abud actualmente es miembro del ACM.



Silvestre Gustavo Peláez Camarena, Ingeniero Industrial en producción en el Instituto Tecnológico de Orizaba, maestro en ciencias especialidad en cómputo estadístico en el Colegio de Postgraduados de Chapingo y especialidad en Educación a Distancia en la Universidad Veracruzana. Actualmente es profesor-investigador de la División de Estudios de Posgrado e Investigación del Instituto Tecnológico de Orizaba. Cuenta con reconocimiento de Perfil Deseable ante PRODEP. Publicaciones en congresos nacionales e internacionales y revistas con arbitraje estricto. Es miembro del cuerpo académico CADAIMIS reconocido por PRODEP como un cuerpo académico en formación. Miembro de ACM. Ha dirigido tesis a nivel maestría y proyectos de titulación a nivel licenciatura.



Lisbeth Rodríguez Mazahua, Doctora en Ciencias en Computación, egresada del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN). Es profesora de tiempo completo del Instituto Tecnológico de Orizaba. Ha dirigido más de cinco proyectos de investigación científica y aplicada financiados por CONACYT, el Tecnológico Nacional de México y PRODEP. Es autor de más de 50 publicaciones en revistas de reconocido prestigio y congresos especializados. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel Candidato.



Ulises Juárez Martínez, Doctor en Ciencias en la especialidad de Computación por parte del CINVESTAV. Sus áreas de interés comprenden la adaptación en vivo de sistemas de software, desarrollo de software orientado a aspectos, programación generativa, líneas de productos de software y lenguajes de programación. Actualmente es profesor investigador del Grupo de Ingeniería de Software en el TecNM/I. T. de Orizaba.



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

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA COMPLEJIDAD COGNITIVA DE LA GESTIÓN DE PROYECTO EN EL DESARROLLO DE SOFTWARE EN LA ISO/IEC 29110-5-1-2 Y LA GUÍA DE LOS FUNDAMENTOS PARA LA DIRECCIÓN DE PROYECTOS DEL PMI

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE COGNITIVE COMPLEXITY OF THE PROJECT MANAGEMENT IN THE SOFTWARE DEVELOPMENT IN ISO/IEC 29110-5-1-2 AND THE GUIDE OF THE FUNDAMENTALS FOR THE MANAGEMENT OF PMI PROJECTS

Edinson Damian¹
edacosta@unprg.edu.pe

Abraham Dávila²
abraham.davila@pucp.edu.pe

¹*Escuela de Posgrado - Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Av. Huamachuco 1130, Lambayeque
Lambayeque, Perú*

²*Departamento de Ingeniería - Pontificia Universidad Católica del Perú
Av. Universitaria 1801, Urb. Pando, San Miguel
Lima, Perú*

RESUMEN

El desarrollo de marcos de trabajo de procesos ha contribuido en la consolidación de la industria de software. Sin embargo, la dificultad de adopción de esos marcos de trabajo ha llevado al desarrollo de métricas para evaluar, entre otros aspectos, su complejidad. En este contexto, se ha señalado que el proceso de gestión de proyectos descrito en la ISO/IEC 29110-5-1-2 es menos complejo que el descrito en la Guía de los fundamentos para la dirección de proyecto del PMI. Para comprobar dicha afirmación se realizó un análisis comparativo de la complejidad cognitiva. La medición se aplicó a los entregables, actividades y proceso. A partir de lo obtenido, la descripción del proceso de gestión de proyectos de la ISO/IEC 29110-5-1-2 es menos compleja a nivel cognitivo que lo descrito en la Guía del PMI.

PALABRAS CLAVE

Complejidad Cognitiva; Dirección de Proyectos; ISO/IEC 29110.

ABSTRACT

The development of process frameworks has contributed to the consolidation of the software industry. However, the difficulty of adopting these frameworks has led to the development of metrics to evaluate, among other aspects, their complexity. In this context, it has been pointed out that the project management process described in ISO/IEC 29110-5-1-2 is less complex than the one described in the Project Management Foundations Guide of PMI. To verify this statement, a comparative analysis of the cognitive complexity was performed. The measurement was applied to the deliverables, activities and process. From the results obtained, that the description of the project management process of ISO/IEC 29110-5-1-2 is less complex at a cognitive level than that described in the PMI Guide.

KEYWORDS

Cognitive complexity; Project management; ISO/IEC 29110.

1. INTRODUCCIÓN

Un aspecto relevante en el contexto de la industria de software y la adopción de modelos de proceso software es saber si la complejidad de un modelo es adecuada para su adopción en la organización. Sí bien se han desarrollado estudios sobre la medición de proceso software como (Mitani et al., 2007), (Oliveira, Oliveira, & Belchior, 2006), (Slavek, Lukić, & Köhler, 2012), y (Ram, Rodriguez, & Oivo, 2018), ninguno de ellos evalúa la complejidad del modelo como tal. En contraste se tiene que: (i) en (Rossi & Brinkkemper, 1996) se introduce el concepto de complejidad cognitiva como una medida del grado de complejidad conceptual en función de los factores de complejidad; (ii) en (Perepletchikov, Ryan, & Tari, 2013) se propone un modelo jerárquico de la complejidad cognitiva de productos de trabajo, tareas y metodología; y (iii) en (García, Piattini, Ruiz, Canfora, & Visaggio, 2006), se propone métricas relacionadas al proceso software y un marco para el modelado y evaluación de proceso software. En ese contexto, se reconoce que una organización que logra determinar la complejidad cognitiva de un modelo o metodología, podrá: estimar con mayor fiabilidad el esfuerzo para su implementación o tomar decisiones en el caso de una selección entre múltiples opciones.

De otro lado, la publicación de la ISO/IEC 29110 en el 2011 (ISO/IEC, 2016), representa un hito importante en la industria de software pues está pensada para las pequeñas organizaciones (empresas, áreas, unidades organizacionales, entre otras). Una de las características de esta Norma es que presenta dos procesos (Implementación de Software y Gestión de Proyecto) que son “más ligeros” y que se afirma más adecuado al tamaño de la organización (ISO/IEC, 2011). En particular, para el caso del proceso definido de Gestión de Proyecto, también se dice que es más ligero que una implementación completa de la Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos del PMI (referida en la industria como PMBOK de Project Management Body of Knowledge) (PMI, 2017). Sin embargo, en la revisión bibliográfica no se ha encontrado un análisis comparativo de la ISO/IEC 29110-5-1-2 con alguna implementación completa del PMBOK desde la perspectiva de la complejidad cognitiva.

En este artículo se analiza de manera comparada los modelos de gestión de proyectos (en el contexto de la industria de software) de la ISO/IEC 29110-5-2 y una implementación basada en el PMBOK a partir de la determinación de las métricas de complejidad cognitiva. En lo que sigue, el artículo se organiza de la siguiente manera: en la Sección 2, se presenta un marco de referencia; en la Sección 3, se presentan las métricas construidas para realizar esta evaluación; en la Sección 4, se muestran los resultados de las mediciones y el análisis correspondiente; y en la Sección 5, presenta la discusión final y trabajo futuro.

2. MARCO DE REFERENCIA

El presente estudio se ha realizado tomando como base el concepto y métricas de complejidad cognitiva adaptados en su aplicación a procesos de la gestión de proyectos. A continuación se presentan: la complejidad cognitiva, métricas asociadas y la gestión de proyectos.

2.1. Complejidad Cognitiva

En (Perepletchikov et al., 2013) se presenta un modelo de calidad para metodologías de desarrollo de software, como se observa en la Figura 1, organizado en 3 perspectivas, 7 características y 22 sub-características. El Modelo define (descompone) la calidad en 3 perspectivas, siendo relevante para nuestro estudio el relacionado al artefacto estructurado. Dicha perspectiva contiene una característica de comprensibilidad y 3 sub-características de complejidad cognitiva, con sus métricas asociadas. Las sub características de la complejidad cognitiva, siguiendo la notación de los autores, son: (i) S.C.1.1. Complejidad cognitiva del producto de trabajo que presenta 6 métricas; (ii) S.C.1.2 Complejidad cognitiva de las tareas que presenta 4 métricas; y (iii) S.C.1.3 Complejidad cognitiva de la metodología que presenta 14 métricas. De las métricas establecidas en las sub características de la perspectiva de artefacto estructurado (Perepletchikov et al., 2013), el criterio que se ha tomado como referencia es considerar solo aquellas que tienen relación directa con la construcción de un valor único final de complejidad cognitiva como se observa en la Tabla 1. En particular se puede identificar que M6 de la S.C.1.1 está en función de M1, M2 y M3 de la misma S.C.1.1; esta forma de agregar las métricas como distancia euclidiana es definida por los autores a partir del trabajo de Rossi y Brinkkemper, que se presenta en la Sección 2.2.

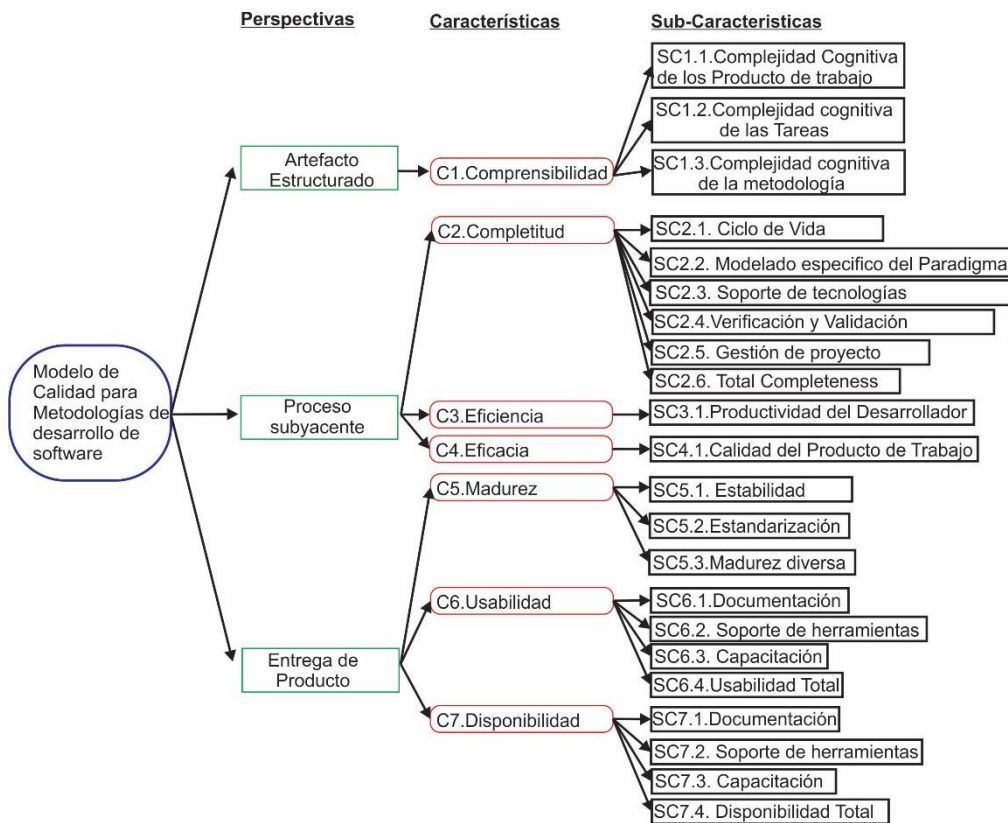
2.2. Métricas de Rossi y Brinkkemper

En (Rossi & Brinkkemper, 1996) se presenta un conjunto de métricas para el evaluar la complejidad de técnicas y métodos para el desarrollo de sistemas en función de objeto, propiedad y relación. A partir de dicha definición se generan tres métricas como factores de complejidad individual (Rossi & Brinkkemper, 1996) que permiten determinar la complejidad conceptual (ver Tabla 2). Para llegar a dichas métricas se establece que los elementos: Objeto, Propiedad y Relación-rol se conceptualizan como un espacio tridimensional y la medición como un punto en cada eje correspondiente a cada elemento. Por tal razón, la métrica propuesta por los autores se determinar como una distancia (euclidiana) del vector que definen en conjunto los valores de Objeto, Propiedad y Relación-rol.

SC	M	Fórmula	Descripción
1.1	M1	$n(O)$	Número de tipos de objetos por tipo de producto de trabajo.
1.1	M2	$n(P)$	Número de tipo de propiedades por tipo de producto de trabajo
1.1	M3	$n(R)$	Número de tipos de relaciones por producto de trabajo
1.1	M6	$C'(wp) = \sqrt{n(O)^2 + n(P)^2 + n(R)^2}$	Complejidad conceptual por tipo de producto de trabajo.
1.2	M1	$BTI = NWP_{in}(T) + NWP_{out}(T)$	Interacción básica de tareas es la suma de la cantidad de productos de trabajo entrada y la de salida de cada tarea.
1.3	M7	$C'(M) = \sum_{wp \in WP} C'(wp)$	Complejidad total de los productos de trabajo de la metodología.

Tabla 1. Métricas de complejidad.
Adaptada de (Perepletchikov et al., 2013)

Fig. 1: Modelo de calidad para metodologías de desarrollo de software.
Adaptado de (Perepetchikov et al., 2013)



ID	Métrica	Definición
R1	n(OT)	Número de tipos de objetos de la técnica.
R2	n(RT)	Número de conceptos con que se describen las conexiones entre los objetos.
R3	n(PT)	Número de propiedades existentes dentro de la técnica que definen al objeto o la relación.
R4	C' (M)	Complejidad conceptual cuya fórmula es: $C'(M) = \sqrt{n(O_T)^2 + n(R_T)^2 + n(P_T)^2}$

Tabla 2. Métricas de complejidad.
Adaptada de (Rossi & Brinkkemper, 1996)

2.3. Métricas de García y Otros

En (García et al., 2006), como parte del marco para el modelado y evaluación de procesos software (FMESP, por sus siglas en inglés de Framework for the Modeling and Evaluation of Software Processes), se proponen 12 métricas relacionados al proceso de software. Para la presente investigación se consideraron de (García et al., 2006) las siguientes 4 métricas que se han precedido en su identificación con la letra G, tal como se observa en la Tabla 3.

Id	Métrica	Definición
G1	NA	Número de actividades del modelo de proceso software
G2	NDWP _{in} , de Number of input Dependences of the Work Products with the Activities in the Process	Número de entradas dependientes de los productos de trabajo con las actividades en los procesos
G3	NDWP _{in} , de Number of input Dependences of the Work Products with the Activities in the Process	El número de salidas dependientes de los productos de trabajo con las actividades en los procesos
G4	NDWP, de Number of Dependences between Work Products and Activities	El número de dependencias entre productos de trabajo y actividades: $NDWP(PM) = NDWP_{in}(MP) + NDWP_{out}(MP)$ (o $G4 = G3 + G2$).

Tabla 3. Métricas para modelos de procesos software

2.4. Trabajos Relacionados

El enfoque métrico de complejidad conceptual fue aplicado en varias investigaciones como: en el método de medición de la complejidad del modelo de gestión de casos y notación (Marin, Lotriet, & Van Der Poll, 2014); en la evaluación de eficiencia de proyectos de desarrollo de software (Cao, Gu, & Thompson, 2012); en (Erickson & Siau, 2005) se desarrolla una medición de complejidad de la técnica UML en la práctica; en (Erickson & Siau, 2004) se destaca la importancia de la complejidad teórica y práctica de un método de desarrollo de sistemas; y, en (Zhang, Kishore, Sharman, & Ramesh, 2007) se realiza una comparación de complejidades entre varios diagramas de UML y un lenguaje de modelado de integración ágil.

2.5. Gestión de Proyecto en la ISO/IEC 29110-5-1-2

La ISO/IEC 29110-5-1-2 (ISO/IEC, 2011) publicada en enero del 2011, es el perfil básico en ingeniería de software y comprende los procesos de Gestión de Proyectos (GP) e Implementación de Software (IS). Estos procesos comprenden prácticas que se basan en la ISO/IEC 12207:2008 (procesos de ciclo de vida del software) y los contenidos de los productos de software desarrollados en la ISO/IEC 15289:2006 pero seleccionadas y adaptadas para pequeñas organizaciones (ISO/IEC, 2011), considerando que una pequeña organización tienen hasta 25 personas en desarrollo de software (ISO/IEC, 2016).

Con respecto al flujo de información del proceso de gestión de proyectos de la ISO/IEC 29110-5-1-2 (ver Figura 2), este contiene entregables de entrada, salida e internos que permiten la interacción entre las 4 actividades (ISO/IEC, 2011): (i) planeación del proyecto; (ii) ejecución del plan de proyecto; (iii) evaluación y control del plan de proyecto; y (iv) cierre del proyecto. Así mismo (ISO/IEC, 2011), cada tarea tiene productos de entradas y productos de salida; los productos de entrada tienen como fuente una entidad o proceso externo; y los productos de salida tienen como destino una entidad o proceso externo.

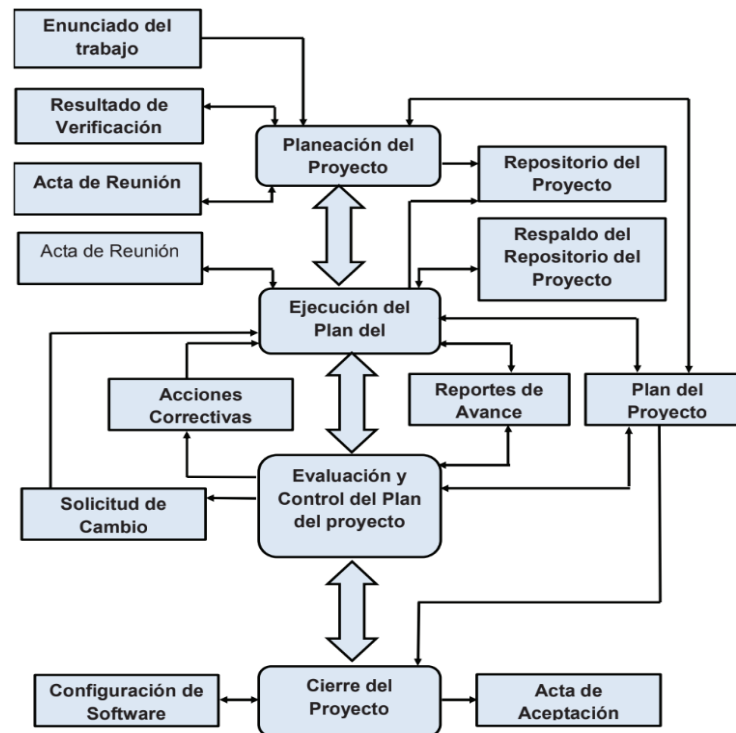


Fig. 2: Proceso de Gestión de Proyectos, Adaptado de (ISO/IEC, 2011)

2.6. Gestión de Proyecto del PMBOK

La Guía PMBOK es un conjunto de buenas prácticas reconocidas que son ampliamente aplicadas por profesionales de la gestión de proyectos para la gestión exitosa de proyectos en todo el mundo (Merquida & Antonia, 2014). Estas buenas prácticas de gestión cubren todo el ciclo de vida de un proyecto (Mas & Mesquida, 2013). Esta Guía (PMI, 2017) contiene 5 grupos de procesos para la dirección de proyectos: (i) grupo de procesos de inicio; (ii) grupo de proceso de planificación; (iii) grupo de procesos de ejecución; (iv) grupo de procesos de monitoreo y control; y (v) grupo de procesos de cierre; y establece 10 áreas de conocimiento: (i) .integración, (ii) alcance, (iii) cronograma, (iv) costos, (v) calidad, (vi) recursos, (vii) comunicaciones, (viii) riesgos, (ix) adquisiciones, y (x) interesados. La estructura contenido en el PMBOK (PMI, 2017) identifica para cada área de conocimiento un conjunto de procesos relacionados como por ejemplo, para el área de conocimiento 4. Gestión de la Integración del Proyecto, donde se identifica 7 procesos, de los cuales se presentan 3 a continuación: 4.1 Desarrollar el Acta de Constitución del Proyecto; 4.2 Desarrollar el Plan para la Dirección del Proyecto; y 4.3 Dirigir y gestionar el Trabajo del Proyecto. Y por último, cada proceso se caracteriza a través de sus entradas, salidas y en conjunto las herramientas y técnicas.

MÉTRICAS PARA EL ANÁLISIS COMPARATIVO

En esta sección se presenta la selección y desarrollo de las métricas para el estudio comparativo. Estas métricas se presentan de manera agrupadas por las sub características tal como se define en el modelo de (Pereplechikov et al., 2013). Las sub características son: (i) complejidad conceptual de las actividades y proceso; (ii) complejidad de las dependencias; y (iii); complejidad cognitiva de la metodología. Para nuestro estudio se ha considerado identificar las métricas definidas para calcular la complejidad cognitiva con el prefijo Z y un correlativo quedando desde Z1 hasta la Z12, los que se presentan a continuación:

- a. **Complejidad estructural del entregable.** Para determinar las métricas a utilizar para esta complejidad, se ha tomado como referencia (Pereplechikov et al., 2013), (Göpferich, 2009) y (Arthur & Stevens, 1989). La métrica se basa en la descomposición de la comprensibilidad aplicado a un entregable (tipo documento) como: (i) coherencia entre títulos y contenidos, (ii) organización en secuencia lógica dirigida por los títulos, (iii) la amplitud del contenido determinada por la estructura del documento o índice; y, (iv) profundidad del contenido determinada por la estructura del documento (índice). Las métricas de Z1 a Z5 se presentan en la Tabla 4 y se obtienen de un instrumento que incluye las estructuras de los documentos asociados a cada propuesta. Para la calificación se utiliza una escala de Likert.
- b. **Complejidad conceptual de las actividades y proceso.** Para determinar esta complejidad se utilizó como referencia las métricas, criterios y filosofía usados en la definición desarrollada en (Rossi & Brinkkemper, 1996) y las propuestas de (Pereplechikov et al., 2013) y (García et al., 2006). Las métricas definidas para nuestro estudio se presentan en la Tabla 4 y se describen a continuación: (i) la métrica Z6, considerando lo de (Pereplechikov et al., 2013), se define por analogía a partir de la métrica M1 de la SC1.2 (Ver Tabla 1); (ii) la métrica Z7, considerando lo de (García et al., 2006), se definió a partir de la métrica G1; y la métrica Z8 se obtuvo de la métrica G4 (que incluye dos métricas parciales como se observa en la Sección 2.3; (iii) la métrica Z9, basado en (Rossi & Brinkkemper, 1996), se obtuvo de la métrica R4 de la Tabla 2. La métrica Z10 que representa la complejidad del proceso se obtienen de la sumatoria de las métricas anteriores y que está relacionada a con la M7 de la SC.1.3 (ver Tabla 1).
- c. **Complejidad de las dependencias.** Dentro de esta complejidad se definió la métrica Z11 que se basó en lo definido en (García et al., 2006) como la métrica de número de dependencias descrito en la Tabla 3.
- d. **Complejidad cognitiva de la metodología.** Para determinar la complejidad cognitiva de la metodología se usó el concepto espacio tridimensional del trabajo de (Rossi & Brinkkemper, 1996). Para dicho espacio se utilizó de base el Entregable, Proceso y Dependencias siendo las métricas respectivas: (i) C'(En), complejidad estructural del entregable; (ii) C'(P), complejidad total del proceso y (iii) ND(P), número de dependencias de los entregables con todas las actividades. En la Tabla 4 se presenta la fórmula establecida para la métrica Z12 que es la complejidad cognitiva de la metodología.

RESULTADOS

En esta sección se presenta los resultados de las mediciones de complejidad cognitiva a través de las métricas establecidas, ver Tabla 4, para la ISO/IEC 29110-5-1-2 y una implementación completa del PMBOK.

- a. **Complejidad Cognitiva en la Gestión de Proyectos de la ISO/IEC 29110-5-1-2.** Se tomó como base la Sección 9 Descripción de Producto del documento de la ISO (ISO/IEC, 2011).

Las métricas de complejidad estructural del entregable obtenidas fueron. $Z1 = 64$, $Z2 = 64$, $Z3 = 64$, $Z4 = 64$, y a partir de ello se obtiene $Z5 = 64$ Estas métricas a través de una evaluación por parte de expertos temáticos y usuarios avanzados.

Las métricas de complejidad conceptual total por actividades y de proceso obtenidas se presentan en la Tabla 5, donde se calcula por cada actividad las métricas $Z6$, $Z7$, $Z8$ y $Z9$. Siendo $Z9$ obtenida en función a $Z6$, $Z7$ y $Z8$. El valor de $Z10$ se obtiene de la suma de los valores parciales de $Z9$, lo que da un total de $Z10=78.7$.

La métrica de dependencias por proceso, identificado como $Z11$, se calcula analizando entradas y salidas en la Figura 2, obteniendo el siguiente resultado: $Z11=14$ entradas +13 salidas = 27.

M	Definición	Descripción
Z1	Coherencia de títulos con contenidos.	Esta métrica mide la característica de los títulos adecuados en función del contenido del documento. ¿Los títulos de las secciones representan adecuadamente los contenidos del tipo de documento?
Z2	Organización en secuencia lógica dirigida por los títulos.	Esta métrica mide la característica de los títulos adecuados en función de la secuencia lógica del contenido del documento. ¿Los títulos de las secciones siguen un orden (transición temática o secuencia lógica) adecuado para el tipo de documento?
Z3	Amplitud del contenido determinada por la estructura del documento (índice).	Esta métrica mide la estructura del ¿La estructura del tipo de documento (en número de secciones en cada nivel) organiza de manera adecuada el contenido?
Z4	Profundidad del contenido determinada por la estructura del documento (índice).	¿La estructura del tipo de documento (en profundidad de niveles) organiza de manera adecuada el contenido?
Z5	C'(En)	Complejidad estructural del entregable $Z5 = (Z1 + Z2 + Z3 + Z4)/4$
Z6	NEn(A)	Número de entregables totales por actividad. $NEn(A) = NEnin(A) + NEnout(A)$ Donde NEnin = número de entregables de entrada NEnout = número de entregables de salida A = actividad
Z7	NT(A)	Número de tareas por actividad.
Z8	NDEnT(A)	Número total de dependencias de los entregables con todas las tareas por actividad. $NDEnT(A) = NDEnTin(A) + NDEnTout(A)$ Donde NDEnTin(A) = número de dependencias de entrada del entregable con todas las tareas. NDEnTout(A) = número de dependencias de salida del entregable con todas las tareas. A = actividad
Z9	C'(A)	Complejidad conceptual total por actividad. $C'(A) = \sqrt{NEn(A)^2 + NT(A)^2 + NDEnT(A)^2}$ $Z9 = \sqrt{(Z6)^2 + (Z7)^2 + (Z8)^2}$
Z10	C'(P)	Complejidad total por proceso $C'(P) = \sum C'(A) \dots (\text{ver Z9})$ $Z10 = \sum (Z9)$
Z11	ND(P)	Número de dependencias por proceso $ND(P) = NDEnAin(P) + NDEnAout(P)$ Donde NDPEnAin = número de dependencias de entrada de los entregables con todas las actividades. NDPEnAout = número de dependencias de salida de los entregables con todas las actividades.
Z12	C'(M)	Complejidad cognitiva de la metodología $C'(M) = \sqrt{C'(En)^2 + C'(P)^2 + ND(P)^2}$ $Z12 = \sqrt{(Z5)^2 + (Z10)^2 + (Z11)^2}$

Tabla 4. Métricas para evaluación de la complejidad cognitiva

Finalmente, la complejidad cognitiva de la ISO/IEC 29110-5-1-2, se establece en $Z_{12}=104.97$.

Actividad	Z6	Z7	Z8	Z9
PM.1 Planificación de proyecto	5	15	35	38.4
PM.2 Ejecución del plan de proyecto	7	6	22	23.9
PM.3 Eval. y control del plan de proyecto	4	3	7	8.6
PM.4 Cierre de proyecto	3	2	7	7.9

Tabla 5. Resultados de la complejidad conceptual de cada actividad en Gestión de Proyecto de la ISO/IEC 29110-5-1-2

- b. **Complejidad cognitiva de una implementación completa PMBOK.** Se tomó como base una implementación desarrollada por una empresa consultora de dirección de proyectos en el sector de tecnologías de información. Por acuerdos de confidencialidad el nombre de la empresa se mantendrá en reserva. Considerando la manera en que trabaja la Consultora, se realizó el análisis por grupos de procesos del PMBOK. Las métricas de complejidad estructural del entregable obtenidas fueron. $Z_1 = 90$, $Z_2 = 90$, $Z_3 = 90$, $Z_4 = 89$, y a partir de ello se obtiene $Z_5 = 89.75$. Las métricas de complejidad conceptual total por actividades y de proceso obtenidas se presentan en la Tabla 6, donde se calcula por cada actividad las métricas Z6, Z7, Z8 y Z9. El valor de Z_{10} se obtiene de la suma de los valores parciales de Z9, lo que da un total de $Z_{10}=420.9$. La métrica de dependencias por proceso, es decir $Z_{11}= 99$, esta se obtiene del conteo realizado en el gráfico de interacciones entre procesos de la dirección de proyectos de la tercera sección página 53 del PMBOK. Finalmente, la complejidad cognitiva del PMBOK, se determina según la métrica Z_{12} igual a 441.6.

Grupo de procesos de la dirección de proyecto	Z6	Z7	Z8	Z9
Grupo de procesos de Inicio	3	2	11	11.6
Grupo de procesos de planificación.	39	24	202	207.1
Grupo de procesos de ejecución.	9	8	71	72.0
Grupo de procesos de monitoreo y control.	5	11	116	116.6
Grupo de procesos de cierre	10	2	9	13.6

Tabla 6. Resultados de la complejidad conceptual del grupo de proceso del PMBOK

DISCUSIÓN Y TRABAJO FUTURO

En este artículo se obtuvieron los resultados de un análisis de complejidad cognitiva, determinándose que el proceso de gestión de proyectos de la ISO/IEC 29110-5-1-2 obtuvo una complejidad cognitiva de 104.97 y para el caso de la implementación basada en el PMBOK se obtuvo una complejidad cognitiva de 441.6. Estos resultados evidencian que la ISO/IEC 29110-5-1-2 es menos compleja en comparación con la implementación completa basada PMBOK, e implica además que el esfuerzo de implementar un modelo basado en la ISO/IEC 29110-5-1-2 es menor que una implementación completa basada en el PMBOK.

De otro lado, para el caso de definir una metodología basada en PMBOK, se puede utilizar la complejidad cognitiva para evaluar su facilidad y esfuerzo de adopción en una organización.

Además, esta investigación propone métricas para medir la complejidad estructural de los entregables, traducéndose como la complejidad cognitiva. Como trabajo futuro se propone realizar una medición de la complejidad cognitiva de los procesos de desarrollo de software de las pequeñas empresas en comparación con la ISO/IEC 12207. Asimismo resulta interesante contar con una herramienta de software para automatizar el cálculo de estas métricas de complejidad para la comparación de modelos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado gracias al apoyo brindado por el Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, en el marco de la movilidad académica de la Red Peruana de Universidades.

REFERENCIAS

- Arthur, J. D., & Stevens, K. T. (1989). Assessing the adequacy of documentation through document quality indicators. *Conference on Software Maintenance*, 40–49.
- Cao, Q., Gu, V. C., & Thompson, M. A. (2012). Using complexity measures to evaluate software development projects: A nonparametric approach. *Engineering Economist*, 57(4), 274–283.
<https://doi.org/10.1080/0013791X.2012.729878>
- Erickson, J., & Siau, K. (2004). Theoretical and practical complexity of modeling methods. *Communications of the ACM*, 50(8), 46–51.
<https://doi.org/10.1145/1278201.1278205>
- Erickson, J., & Siau, K. (2005). Toward Practical Measures of Complexity in Real Time Modeling Methods. *11th Americas Conference on Information Systems*, 3067–3074.
- García, F., Piattini, M., Ruiz, F., Canfora, G., & Visaggio, C. A. (2006). FMESP: Framework for the modeling and evaluation of software processes. *Journal of Systems Architecture*, 52(11), 627–639.
<https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2006.06.007>
- Göpferich, S. (2009). Comprehensibility assessment using the Karlsruhe Comprehensibility Concept. *The Journal of Specialised Translation*, (11), 12–38. Retrieved from http://www.jostrans.org/issue11/art_goeperich.pdf
- ISO/IEC. (2011). *ISO/IEC TR 29110-5-1-2:2011 Software Engineering -- Lifecycle Profiles for Very Small Entities (VSEs) -- Part 5-1-2: Management and Engineering Guide: Generic Profile Group: Basic Profile*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/51153.html>
- ISO/IEC. (2016). *ISO/IEC TR 29110-1:2016 Systems and software engineering -- Lifecycle profiles for Very Small Entities (VSEs) -- Part 1: Overview*. Retrieved from <https://www.iso.org/standard/62711.html>
- Marin, M. A., Lotriet, H., & Van Der Poll, J. A. (2014). *Measuring Method Complexity of the Case Management Modeling and Notation (CMMN)*. 209–216. <https://doi.org/10.1145/2664591.2664608>
- Mas, A., & Mesquida, A. L. (2013). Software project management in small and very small entities | Gestión de proyectos de software en pequeñas y micro empresas. *Iberian Conference on Information Systems and Technologies, CISTI*, 406–412.
- Merquida, A.-L., & Antonia, M. (2014). A project management improvement program according to ISO/IEC 29110 and PMBOK. *Journal of Software: Evolution and Process*. <https://doi.org/10.1002/smr.1665>
- Mitani, Y., Matsumura, T., Barker, M., Tsuruho, S., Inoue, K., & Matsumoto, K. (2007). *Proposal of a Complete Life Cycle In-Process Measurement Model Based on Evaluation of an In-Process Measurement Experiment Using a Standardized Requirement Definition Process*.
<https://doi.org/10.1109/ESEM.2007.27>
- Oliveira, J. M. M. De, Oliveira, K. B. De, & Belchior, A. D. (2006). *Measurement Process: A Mapping Among CMMI-SW, ISO / IEC 15939, IEEE Std 1061, Six Sigma and PSM*. 15939(2002).
- Pereplechikov, M., Ryan, C., & Tari, Z. (2013). *An Analytical Framework for Evaluating Service-Oriented Software Development Methodologies*.
<https://doi.org/10.4304/jsw.8.7.1642-1659>

- PMI. (2017). *Guía de los Fundamentos para la Dirección de Proyectos*.
- Ram, P., Rodriguez, P., & Oivo, M. (2018). *Software Process Measurement and Related Challenges in Agile Software Development : A Multiple Case Study*.
- Rossi, M., & Brinkkemper, S. (1996). Complexity metrics for systems development methods and techniques. *Information Systems*, 21(2), 209–227. [https://doi.org/10.1016/0306-4379\(96\)00012-9](https://doi.org/10.1016/0306-4379(96)00012-9)
- Slavek, N., Lukić, I., & Köhler, M. (2012). Software process measuring model [Model mjerenja softverskog procesa]. *Tehnicki Vjesnik*, 19(1), 11–17. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84859181540&partnerID=40&md5=870159bb67251643fecf0dab02b9beb5>
- Zhang, H., Kishore, R., Sharman, R., & Ramesh, R. (2007). Agile Integration Modeling Language (AIML): A conceptual modeling grammar for agile integrative business information systems. *Decision Support Systems*, 44(1), 266–284. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2007.04.009>

NOTAS BIOGRÁFICAS



Edinson Damian es Ingeniero de Sistemas de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, y actualmente, egresado de Maestría con Mención en Gerencia de TI y Gestión de Software en la escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo. Su área de investigación es Medición del proceso software. Se ha desempeñado como analista de sistemas y consultor en el sector privado de Perú.



Abraham Dávila es investigador y profesor principal en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) desde el 2000. Actualmente es director e investigador principal del proyecto ProCalProSer (2013-2016 Fase I y 2017-2019 Fase II) y director y miembro fundador de GIDIS-PUCP. Posee el grado de bachiller en ciencias con mención en Ingeniería Mecánica y magister en Informática por la PUCP. Miembro del grupo de trabajo de la ISO/IEC que elabora la serie de normas ISO/IEC 29110. Sus principales áreas de interés son: calidad en informática (a nivel de proceso software, producto software y gestión de servicios) y educación en ingeniería de software.

APÉNDICE A: DETERMINACIÓN DE MÉTRICAS

Ejemplo para determinar la complejidad conceptual en la ISO/IEC 29110-5-1-2

La métrica Z6 se obtiene por un conteo de los entregables que entran y salen (Ver Figura 2). Esos entregables son: plan de proyecto, configuración de software y acta de aceptación y por tanto el valor de $Z6 = 3$.

La métrica Z7 se obtiene contando la cantidad de tareas por actividad. Así, en la Tabla A.1, se observa que la actividad PM.4 referida a cierre de proyectos que tiene dos tareas: PM.4.1 y PM.4.2; por lo que $Z7 = 2$.

La métrica Z8 se obtiene contando la cantidad de dependencias de entregables, esto es la suma de los entregables que entran y los entregables que salen. Esto significa que para ambas tareas PM.4.1 y PM.4.2 se tiene un total de 4 dependencias a la entrada y 3 dependencias a la salida, lo que da un total de $Z8=7$ dependencias.

Lista de tareas	Entrada de productos	Salida de productos
PM.4.1 Formalizar la terminación del proyecto de acuerdo con las instrucciones de entrega establecidas en el plan de proyecto, proporcionar apoyo de aceptación y obtener el registro de aceptación firmado	Plan de proyecto - instrucciones de entrega Configuración de software (entregable)	Acta de aceptación Configuración de software (Aceptado)
PM.4.2 Actualización del repositorio de proyecto	Configuración de proyecto (aceptado) Repositorio de proyecto	Repositorio de proyecto (actualizado)

Tabla A.1. Lista de tareas del PM.4 cierre de proyecto de la ISO/IEC 29110-5-1-2

Ejemplo para determinar la complejidad conceptual del PMBOK

La métrica Z6 se obtiene por un conteo de los entregables del grupo de inicio que entran y salen. Estos entregables son: Acta de constitución del proyecto, Registro y clasificación de los interesados, Checklist de presentación para reunión de inicio de proyecto, por tanto el valor de $Z6 = 3$.

La métrica Z7 se obtiene realizando un conteo de la cantidad de actividades del área de conocimientos pertenecientes al grupo de procesos de inicio, es decir Gestión de la integración del proyecto y Gestión de interesados del proyecto. Así, en la Tabla A.2, se observa que el grupo de procesos de inicio tiene dos áreas de conocimiento; por lo que $Z7 = 2$.

La métrica Z8 se obtiene contando la cantidad de dependencias de entregables, esto es la suma de los entregables que entran y los entregables que salen. Esto significa que para ambas áreas de conocimiento cuatro y trece se tiene un total de 6 dependencias a la entrada y 5 dependencias a la salida, lo que da un total de $Z8=11$ dependencias.

Área de conocimiento	Grupo de procesos de inicio	Productos de entrada	Productos de salida
4. Gestión de integración del proyecto	4.1 Desarrollar el acta de constitución de proyecto.	-Enunciado de trabajo -Caso de negocio -Acuerdos -Factores ambientales de la empresa. -Activos de los procesos la organización	-Acta de constitución de proyecto
13. Gestión de los interesados del proyecto	13.1 Identificar a los interesados	-Documento de adquisición. -Factores ambientales de la empresa -Activos de los procesos de la organización	-Registro de interesados.

Tabla A.2. Grupo de Procesos de Inicio del PMBOK.



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

HACIA UNA METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE CONTRATOS INTELIGENTES

TOWARDS A METHODOLOGY FOR THE DESIGN OF SMART CONTRACTS

Carlos O. Solis-Osorio¹
carlosomarso.003@gmail.com

Elizabeth Pérez-Cortés¹
pece@xanum.uam.mx

Humberto Cervantes-Maceda ¹
hcm@xanum.uam.mx

¹*Universidad Autónoma Metropolitana campus Iztapalapa
Av. San Rafael Atlixco 186, Iztapalapa, CDMX., México*

RESUMEN

Los contratos inteligentes representan un aspecto importante de las cadenas de bloques. Su objetivo es complementar a los contratos tradicionales que implican modificaciones sobre los datos almacenados en la cadena. En este artículo se define una metodología para el diseño de contratos inteligentes y se ilustra su uso con un caso de estudio.

PALABRAS CLAVE

Cadena de bloques, Contratos inteligentes, Diseño, Metodología.

ABSTRACT

Smart contracts represent an important aspect of blockchains. Their main objective is to complement the traditional contracts that involve modifications to the data stored in the chain. In this article we present a methodology for the design of smart contracts and we also illustrate its application with a case study.

KEYWORDS

Blockchain, Smart Contracts, Design, Methodology.

1. INTRODUCCIÓN

Las cadenas de bloques *blockchains* se presentaron en el 2009 como la tecnología que da soporte a *Bitcoin* (S. Nakamoto, 2009), sin embargo, posteriormente se descubrió que esta tecnología puede ser de gran utilidad en múltiples aplicaciones que van mucho más allá de las criptomonedas. Los tipos de aplicaciones que pueden beneficiarse al utilizar una cadena de bloques como almacenamiento se han diversificado considerablemente. Desde su lanzamiento en 2009 el número de proyectos relacionados con cadenas de bloques en la plataforma de GitHub creció en promedio 8600 proyectos por año y hasta 2017 existían aproximadamente 36000 proyectos en la plataforma (Jesus Leal Trujillo, Steve Fromhart y Val Srinivas, 2017).

Blockchain es una tecnología que permite realizar aplicaciones que involucran a varias partes (generalmente distintas organizaciones) que tienen la necesidad de compartir datos y realizar transacciones sin necesidad de la existencia de intermediarios y teniendo diversas garantías sobre los datos, tales como la inmutabilidad y el no repudio.

Un contrato inteligente (Nick Szabo, 1996) es un programa informático que permite plasmar aspectos contractuales relativos a las transacciones entre las partes mediante código. Si bien no todas las plataformas tecnológicas de cadenas de bloques soportan contratos inteligentes, existen algunas que ya cuentan con dicha característica tales como: Hyperledger Fabric, IBM Blockchain y Ethereum. Sobre estas plataformas, los contratos inteligentes están almacenados dentro de la cadena de bloques y no son controlados por ninguna de las partes implicadas. Una vez firmados y almacenados en la cadena de bloques, ya no pueden ser modificados de manera sencilla.

El código del contrato inteligente se ejecuta cuando alguna de las partes desea interactuar con la cadena y cumple con una serie de condiciones.

Una parte importante en el diseño de un sistema basado en cadenas de bloques es la identificación y diseño de los contratos inteligentes, ya que además de gestionar cierta parte de la lógica de negocio, serán cruciales en la toma de decisiones para la arquitectura general del sistema. De acuerdo a la investigación que realizamos, en la literatura especializada no se ha definido ninguna metodología que guíe el diseño de contratos inteligentes. En este documento se presenta una propuesta de metodología para el diseño de contratos inteligentes y su aplicación en un caso de estudio.

El resto de este documento está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se presentan los conceptos básicos que se necesitan para comprender este artículo, en la sección 3 se presenta nuestra propuesta de metodología, en la sección 4 se describe el caso de estudio, en la sección 5 se aplica la metodología propuesta al caso de estudio y finalmente, en la sección 6 se listan los resultados y se enuncian las conclusiones.

2. MARCO TEÓRICO

Las cadenas de bloques son un mecanismo de almacenamiento de datos distribuido que gestiona transacciones. Las transacciones representan modificaciones a los datos guardados en la cadena y son almacenadas en bloques. Cada bloque contiene un conjunto de transacciones y una firma que lo identifica como único, dicha firma es generada mediante una función hash aplicada a los datos que contiene el bloque y a la firma del bloque anterior. En consecuencia si la información de un bloque es modificada también sería afectada su firma y todos los bloques posteriores serán invalidados. Este mecanismo garantiza que la información contenida en la cadena no pueda ser modificada (Decker C. y Wattenhofer R, 2013). Además, cada que se desea agregar un bloque nuevo, se convoca a un proceso de consenso para verificar que el bloque que se desea añadir sea válido (Zheng Z., Xie S., Dai H., Chen X., y Wang H., 2017). Esta característica de las cadenas de bloques hace que las organizaciones involucradas en el proyecto intervengan en la validación de los bloques que se están añadiendo a la cadena y por lo tanto, una vez que se verifica un bloque, significa que la información que ahí se almacena es reconocida como correcta por todos los que la han validado y ninguno podrá negarla en el futuro, esta característica de la información se conoce como no repudio.

Como cualquier otra tecnología las cadenas de bloques presentan bondades y limitantes haciendo que su uso sea conveniente sólo en ciertos escenarios. A continuación, mencionamos algunas ventajas y desventajas de las cadenas de bloques (Gatteschi V., Lamberti F., Demartini C., Pranteda C., y Santamaría V., 2018).

Ventajas:

1. Almacenamiento de datos distribuido. Reduce la pérdida de datos en caso de eventos inesperados, ya que los datos se encuentran replicados en diferentes nodos que generalmente son parte de las organizaciones involucradas.

2. Descentralización. No requiere de intermediarios de confianza, permitiendo que las transacciones se realicen directamente entre dos o más organizaciones involucradas.

3. Transparencia. Los datos almacenados en la cadena son visibles para cualquier parte. Todas las organizaciones que tienen acceso a la cadena de bloques pueden leer el estado de una transacción o incluso la historia de los datos.

4. Inmutabilidad. La información almacenada en la cadena de bloques es inmutable, los datos no pueden modificarse ni eliminarse.

5. Automatización. Las cadenas de bloques con soporte para contratos inteligentes, permiten a través de estos, la automatización de actividades, garantizando la correcta ejecución de sus cláusulas sin beneficiar indebidamente a ninguna de las partes involucradas.

Desventajas:

1. Alto consumo energético. Las cadenas de bloques se caracterizan por un alto consumo energético ya que para el proceso de consenso usualmente se hace uso de la prueba de trabajo \textit{(proof of work)}, dicha prueba requiere de hardware costoso que consume una cantidad considerable de energía. Para solucionar este problema actualmente existen alternativas a la prueba de trabajo (Zheng Z., Xie S., Dai H., Chen X., y Wang H., 2017).

2. Almacenamiento. La replicación de los datos requiere mayor espacio de almacenamiento, los nodos encargados de validar las transacciones deben alojar una copia de la cadena de bloques. Por ejemplo, hasta enero del 2019 la cadena de bloques de *Bitcoin* tenía un peso aproximado de 244 GB (Cryptocurrency statistics, 2019) y aumentará conforme se añadan bloques nuevos.

3. Rendimiento. Las cadenas de bloques no toleran una tasa alta de transacciones. En la red de *Bitcoin* la adición de un bloque nuevo en la red tarda de 10 a 60 minutos (Cryptocurrency statistics, 2019).

4. Confidencialidad. La transparencia de los datos podría ser perjudicial si la información almacenada requiere de privacidad, aunque se puede optar por la utilización de algún algoritmo de cifrado que ayude a mantener la privacidad de los datos.

Si bien existen desventajas de usar cadenas de bloques, estas no siempre se presentan. Por ejemplo, la confidencialidad no siempre es necesaria y por lo tanto sólo representaría una desventaja cuando esta sea requerida. Decidir si un proyecto de software se verá beneficiado con la inclusión de una cadena de bloques es una tarea importante. Una lista de criterios para tomar dicha decisión se presenta en (Carlos Solis-Osorio, Elizabeth Pérez-Cortés y Humberto Cervantes-Maceda, 2018).

Con respecto al uso de contratos inteligentes en un proyecto de software, si se le compara con el uso de contratos tradicionales, trae consigo los siguientes beneficios:

1. Un contrato inteligente no está sujeto a interpretaciones pues está escrito en un lenguaje de programación. En contraste, un contrato tradicional está escrito en lenguaje natural.

2. Un contrato inteligente no requiere de un intermediario que le añada validez, reduciendo los costos y el tiempo que toma la ejecución del mismo.

3. Debido a que el contrato es alojado en la cadena de bloques no puede modificarse, haciéndolo más seguro en comparación con un contrato tradicional.

Para ilustrar mejor el concepto consideremos un ejemplo que involucra a tres organizaciones distintas: un proveedor de vegetales orgánicos y dos restauranteros. Dicho proveedor se encarga de abastecer de vegetales a cada uno de los restaurantes.

Cada restaurante tiene su propio sistema que se encarga de gestionar el almacén, sin embargo, se desea incluir un sistema de cadena de bloques que garantice la rastreabilidad de los vegetales suministrados, esto sin eliminar los sistemas con los que ya cuenta cada organización. Este es uno de los casos típicos que ameritan el uso de cadenas de bloques pues se desea registrar cada transacción de la que han sido objeto los vegetales, desde su origen hasta la entrega en el restaurante para su consumo. Este tipo de escenarios ya han sido resueltos mediante el soporte de las cadenas de bloques, como el rastreo de origen de oro (Royal Mint, 2019).

Dos de las reglas de negocio asociadas al sistema descrito en el ejemplo anterior se muestran a continuación:

1. Cuando un restaurante adquiere vegetales del proveedor, estos deben haber sido cosechados en los 10 días previos a la adquisición.
2. El sistema de almacén de los restauranteros es capaz de notificar al encargado cuando existan menos de 20 piezas de cualquier vegetal.

Dichas reglas de negocio pueden pertenecer a uno o más procesos de negocio. Recordemos que un proceso de negocio es un conjunto de actividades y tareas que una vez completadas, ofrecen un servicio o producto al cliente.

Los contratos inteligentes ayudan a modelar algunas de las reglas de negocio involucradas en nuestro sistema, principalmente aquellas que hacen uso de los datos que serán almacenados en la cadena. Además al modelar las reglas de negocio mediante contratos inteligentes aprovechamos las bondades que estos ofrecen para implementarlas de manera clara y concisa, proporcionando confianza a los diferentes involucrados, ya que dichas reglas no son ambiguas y garantizan la correcta ejecución de la lógica de negocio.

En el caso de nuestro ejemplo, un contrato inteligente es capaz de implementar todas las reglas de negocio mencionadas anteriormente, sin embargo, esto no siempre es la mejor opción. Si analizamos la segunda regla de negocio, los datos asociados a la existencia de vegetales no se encuentran almacenados en la cadena de bloques, estos son gestionados por el sistema que ya existía en los restaurantes y es de interés únicamente para un involucrado del sistema de tal forma que dicha regla de negocio será gestionada por el sistema ya existente. Por otro lado, la primera regla de negocio es pertinente dentro del contrato ya que debe ser validada en el momento en que se realizan transacciones entre el proveedor y el restaurante.

Las cadenas de bloques y los contratos inteligentes tienen muchas configuraciones distintas y, dependiendo el contexto, se debe seleccionar la más adecuada.

En particular, toda la lógica de negocio relacionada con los datos almacenados en la cadena deberá ser implementada mediante contratos inteligentes. Definir qué datos deben ser almacenados en la cadena, y en consecuencia qué parte de la lógica de negocio debe ser implementada en contratos inteligentes, es uno de los principales retos en el desarrollo de sistemas basados en cadenas de bloques.

Hasta donde sabemos, actualmente no se cuenta con una metodología que sirva de guía en el diseño de los contratos inteligentes. En este documento se presenta una propuesta de metodología para el diseño de contratos inteligentes y su aplicación en un caso de estudio.

3. METODOLOGÍA PARA DISEÑAR CONTRATOS INTELIGENTES

A continuación, presentaremos nuestra propuesta de metodología para el diseño de contratos inteligentes, tomando como base la identificación de las organizaciones y los procesos de negocio.

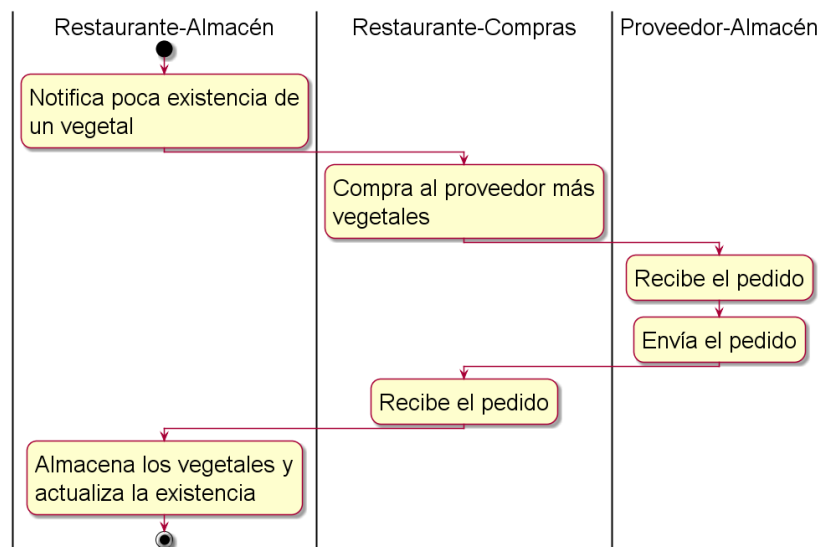
3.1 Identificación de las organizaciones involucradas y sus procesos de negocio

El primer paso es determinar cuáles son las organizaciones involucradas en el proyecto, para esto se puede consultar si existe una matriz de roles y responsabilidades y buscar en ella las diferentes organizaciones involucradas en el proyecto, de lo contrario, se puede analizar el caso de estudio en busca de las organizaciones involucradas.

Una vez identificadas las organizaciones es necesario definir los procesos de negocio del sistema, esto con la finalidad de tener claras las actividades que se realizarán dentro del sistema. Para identificar los diferentes procesos de negocio, se puede consultar si ya existe documentación de los procesos que se desean automatizar en las organizaciones involucradas, de lo contrario, se pueden realizar entrevistas con los involucrados en el proyecto con la finalidad de identificar los procesos de negocio. En el contexto del ejemplo mencionado anteriormente, la compra de vegetales sería un proceso de negocio.

Una vez que se tienen identificados los procesos de negocio, se tienen que documentar, por ejemplo mediante un diagrama de actividades (Figura 1). Los actores involucrados en el diagrama se muestran con la estructura Organización-Actor, indicando el actor y la organización a la que pertenece.

Fig. 1: Proceso de compra de vegetales



3.2 Identificar las entidades y los atributos requeridos para soportar los procesos de negocio

Una vez que se identificaron los diferentes procesos de negocio, es necesario determinar las entidades que forman parte del dominio del problema en cada uno de los procesos. Esto permitirá determinar posteriormente los atributos que darán soporte a la lógica de negocio del sistema.

Para determinar las diferentes entidades, es necesario utilizar el diagrama de actividades realizado en el paso previo e identificar los sustantivos que estén relacionados con las actividades del diagrama, por ejemplo, de la actividad *notifica poca existencia de un vegetal* obtenemos la entidad *VEGETALES*, posteriormente es necesario identificar los atributos asociados a cada entidad, por ejemplo, los atributos de un *vegetal* son: *nombre*, *precio*, *origen*, *recolector*, etc. Al final obtendremos una lista de entidades con sus respectivos atributos. Todas las entidades y atributos identificados formarán parte del conjunto de datos que dará soporte al proceso de negocio que se esté analizando.

3.3 Identificar las entidades y los atributos requeridos para soportar los procesos de negocio

Si bien se puede almacenar toda la información relacionada con el sistema dentro de una cadena de bloques, esto no siempre es adecuado, debido a que la capacidad de almacenamiento dentro de un bloque es relativamente baja. Es conveniente mantener en la cadena de bloques solo la información que requiera de las características que esta ofrece.

Para ayudar a decidir qué datos almacenar en la cadena, es necesario plantearse las siguientes preguntas para cada uno de los atributos pertenecientes a las entidades obtenidas anteriormente: ¿el atributo es de interés para más de una organización involucrada en el sistema?, de ser así, ¿el atributo requiere de la propiedad de no repudio?, ¿es de interés para las organizaciones involucradas obtener información acerca de las transacciones que han modificado el atributo? Si se responde que sí a las preguntas anteriores es muy probable que el dato que está siendo evaluado deba ser almacenado en la cadena de bloques. Todos los atributos para los cuales se obtenga una respuesta negativa podrán ser gestionados por una base de datos tradicional.

3.4 Identificar las diferentes operaciones que harán uso de la información almacenada en la cadena de bloques

Una vez que se identificaron los diferentes atributos que serán almacenados en la cadena de bloques, es necesario definir las diferentes operaciones o acciones que se requieren realizar sobre los atributos para cumplir con el objetivo del proceso de negocio. Para realizar dicha tarea es necesario retomar el diagrama de actividades descrito anteriormente y para cada una de las actividades contenidas en el diagrama, plantearse la siguiente pregunta: ¿esta actividad modifica los atributos almacenados en la cadena? Si se responde positivamente a dicha pregunta entonces la actividad deberá ser implementada mediante un contrato inteligente. Por ejemplo, en el diagrama de actividades de la figura 1, una de las actividades que modifica el estado de los atributos en la cadena es la compra de vegetales. Este procedimiento debe repetirse para cada una de las actividades de todos los procesos de negocio identificados previamente.

3.5 Identificar los contratos inteligentes

Las operaciones identificadas en la sección anterior deben ser agrupadas de acuerdo a la entidad de negocio de la que hacen uso y cada conjunto de operaciones resultante junto con su entidad de negocio serán modeladas por un contrato inteligente. Por ejemplo, si retomamos el contexto de los restauranteros, la operación compra de vegetales hace uso de la entidad *VEGETALES*, por lo tanto dicha operación formará parte del contrato inteligente *ManejoVegetales*. Para el nombrado de los contratos inteligentes se antepone la palabra *Manejo* al nombre de la entidad para indicar que ese contrato gestiona los atributos relacionados con dicha entidad.

4. CASO DE ESTUDIO

Con la intención de mostrar de manera práctica cómo utilizar la metodología descrita anteriormente, esta se aplicará a un sistema de manejo de inventario de bienes de inversión. Para determinar si el proyecto se vería beneficiado con el uso de una cadena de bloques, el caso de estudio fue sometido al análisis propuesto en (Carlos O. Solis-Osorio, Elizabeth Pérez-Cortés y Humberto Cervantes-Maceda., 2018), obteniendo un resultado aprobatorio.

Consideremos una institución académica donde la adquisición de algún bien de inversión (computadoras, escritorios, sillas, etc.) involucra la realización de una petición por escrito al Departamento de Administración, indicando información personal del solicitante, el bien solicitado y el costo del mismo; posteriormente la solicitud es enviada al Departamento de Patrimonio en donde se revisa y se autoriza la solicitud para después ser enviada a la Coordinación de Servicios Administrativos en donde es revisada nuevamente y enviada al Departamento de Proveeduría, es aquí donde se realiza la compra del bien. Una vez que el bien es recibido se notifica a la aseguradora; en cuanto el bien se encuentra asegurado se notifica al solicitante para que acuda a retirarlo. Una vez que el bien es retirado por la persona que lo solicitó, queda bajo su resguardo y a partir de este momento es responsable del bien material así como de su buen uso. Un proceso similar se lleva a cabo para dar de baja un bien por pérdida o robo, descompostura u obsolescencia. En el caso particular de la pérdida o robo de un bien, adicionalmente se inicia un proceso legal para hacer válido el seguro del bien.

Existe un caso especial en donde un empleado tiene el resguardo de cierto material y decide transferirlo a otro empleado. Este proceso se considera un traspaso de bienes y es realizado de forma similar al proceso de alta.

Adicionalmente se desea proporcionar a la Secretaría de Hacienda un medio confiable para que ellos puedan realizar auditorías sobre los recursos otorgados a la institución.

5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

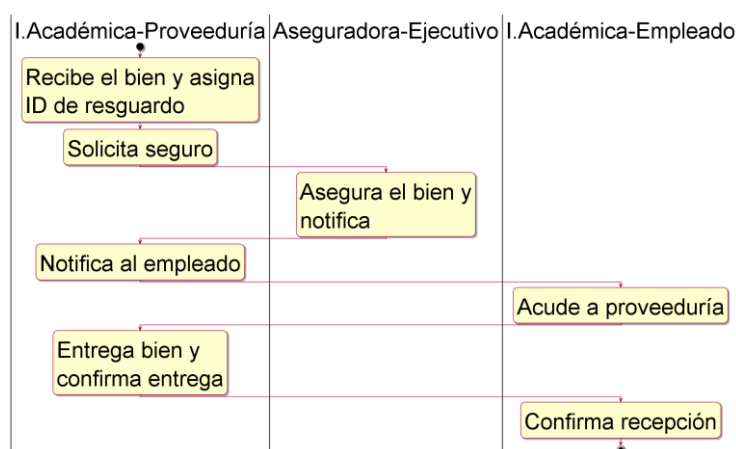
A. Identificación de las organizaciones involucradas y sus procesos de negocio.

Analizando el caso de estudio se puede identificar las organizaciones involucradas en el proyecto: la institución académica, la Secretaría de Hacienda y la aseguradora. Para la identificación de los procesos de negocio se llevaron a cabo entrevistas con el personal involucrado en el proyecto, a continuación se listan los procesos identificados:

- Alta, baja y traspaso de un bien.
- Aseguramiento de un bien.
- Auditoría de recursos.

Para ejemplificar el uso de la metodología se hará uso del proceso de negocio alta de un bien (Figura 2).

Fig. 2: Proceso de alta de un bien



B. Identificar las entidades y los atributos requeridos para soportar los procesos de negocio.

Analizaremos el proceso de negocio de *alta de un bien*. En este caso los atributos identificados pertenecen a tres entidades:

- Datos asociados a un *bien*: *identificador, tipo, costo, fecha de adquisición, responsable, lugar y descripción*.
- Datos asociados a un *seguro*: *prima, porcentaje de cobertura, vigencia y monto asegurado*.
- Datos asociados a un *trabajador*: *identificador, correo electrónico y nombre*.

C. Determinar qué información debe ser almacenada en la cadena de bloques.

Para decidir qué atributos almacenar en la cadena, es necesario plantear para cada uno de los atributos identificados, las preguntas definidas en el paso tres de la metodología, si se responde positivamente a las preguntas, entonces el atributo analizado deberá ser alojado en la cadena de bloques. Por ejemplo, para el atributo *costo* de la entidad *bien* aplicamos las preguntas:

- ¿El atributo es de interés para más de un involucrado en el sistema? podemos responder que sí a esta pregunta ya que el *costo* es un dato que es de interés para la institución educativa. De igual forma la aseguradora requiere de este dato para realizar los cálculos requeridos en el seguro como el *monto asegurado*, la *prima*, el *porcentaje de cobertura*, etc. Además, el dato también es de interés para la Secretaría de Hacienda, ya que realizarán auditorías acerca de los recursos invertidos en bienes de inventario.
- ¿El atributo requiere de la propiedad de no repudio? sí, ya que deseamos que todos los interesados en este dato lo reconozcan como válido.

- ¿Es de interés para los involucrados obtener información acerca de las transacciones que han modificado el atributo? sí, ya que el costo de un bien no cambia con el tiempo e identificar dicho cambio podría implicar un comportamiento malicioso.

Una vez que aplicamos dichas preguntas a todos los atributos identificados, obtenemos las entidades que serán alojadas en la cadena de bloques:

- Bien: *identificador, costo, fecha de adquisición y el responsable.*
- Seguro: *prima, porcentaje de cobertura, identificador del bien asegurado, vigencia y el monto asegurado.*
- Empleado: *identificador, nombre y jefatura.*

D. Identificar las diferentes operaciones que harán uso de la información almacenada en la cadena de bloques.

Para identificar las operaciones nos basamos en las actividades presentadas en el proceso de negocio de la figura 2 y para cada una de las actividades nos planteamos la siguiente pregunta: ¿esta actividad modifica los atributos almacenados en la cadena?

Las actividades del proceso de negocio alta de un bien que modifican los atributos almacenados en la cadena son las siguientes: *asignación de una etiqueta de resguardo, registro de un bien, aseguramiento de un bien y recepción de un bien solicitado por un empleado.*

E. Identificar los contratos inteligentes.

De acuerdo con la lista de actividades obtenida en el punto anterior, identificamos cuáles de esas actividades hacen uso de la misma entidad de datos. Por ejemplo, la actividad *aseguramiento de un bien* modifica la entidad de datos *SEGURO*, además en la vida cotidiana este tipo de procesos se realizan mediante contratos tradicionales, por lo tanto, es conveniente crear un contrato inteligente que se encargue de la gestión de los seguros. En cambio, las operaciones: *asignación de una etiqueta de resguardo, registro de un bien y recepción de un bien solicitado por un empleado*, modifican de la entidad *BIEN*, por lo tanto deberán ser gestionadas por otro contrato inteligente, en este caso el contrato *ManejoBienes*.

Una vez realizado el análisis anterior para todas las actividades identificadas, obtendremos una versión preliminar de los contratos inteligentes, en la figura 3 mostramos los contratos identificados. Es importante mencionar que dentro de cada contrato inteligente se encuentra una estructura de datos que coincide con las entidades identificadas en el paso tres de la metodología, dicha entidad define el modelo de datos que utilizará cada contrato inteligente. De igual forma las operaciones identificadas en el inciso D de la metodología se traducen en los diferentes métodos que es capaz de ejecutar el contrato, por ejemplo en el contrato *ManejoBienes* el método *insertarBien*, proviene de las operaciones: *asignación de una etiqueta de resguardo y registro de un bien.*

Para documentar el contrato inteligente se utilizó un diagrama de clases perteneciente a UML, añadiendo un ícono en la esquina superior izquierda como se sugiere en (Rocha H., y Ducasse S., 2018). Dicho ícono nos indica que se refiere a un contrato inteligente.

Fig. 3: Contratos inteligentes: *ManejoBienes*, *ManejoAuditorías*, *ManejoSeguros* y *ManejoEmpleados*.



6. CONCLUSIÓN

El diseño de un sistema basado en cadenas de bloques es una actividad importante que se divide en diferentes fases, una de las fases más importantes es el diseño de los contratos inteligentes. En este artículo presentamos una propuesta de metodología para el diseño de contratos inteligentes tomando como base la identificación de las organizaciones participantes y los procesos de negocio. La ejecución de la metodología propuesta cumplió con su objetivo y el diseño de los contratos obtenido será la base para la implementación de la lógica de negocio en contratos inteligentes. Además, dichos contratos inteligentes serán de suma importancia al momento de tomar decisiones sobre la arquitectura del sistema, ya que considerando los datos se definirá si se requiere usar un sistema adicional de almacenamiento de datos o no.

Como se mencionó anteriormente, al revisar la literatura científica no encontramos ninguna metodología para guiar el diseño de los contratos inteligentes. Lo más cercano es el proceso de diseño para aplicaciones basadas en cadenas de bloques que se presenta en (Xu X., Weber I., y Staples M., 2019). Dicho proceso coincide con nuestra propuesta en la necesidad de separar la lógica de negocio que será gestionada por la cadena de bloques y la que será gestionada por otras tecnologías, sin embargo, esa propuesta no aborda propiamente el diseño de los contratos inteligentes.

Por otro lado, es relevante la correcta documentación de cualquier sistema de software, ya que es una forma de modelar y transmitir los detalles del sistema. A lo largo del artículo utilizamos diagramas de clases pertenecientes a UML para poder modelar los contratos inteligentes, e hicimos uso de un ícono de una cadena para diferenciarlos, sin embargo, estos diagramas no fueron creados para modelar este tipo de artefactos. Además, por limitaciones de tiempo no se realizó una evaluación completa de la metodología. En consecuencia, como trabajo futuro, se estudiará la creación de patrones de diseño enfocados totalmente a las cadenas de bloques, se discutirá si es necesaria la creación de un lenguaje de modelado para sistemas orientados a cadenas de bloques y se aplicará a la metodología un protocolo de pruebas empírico mediante el uso de casos.

REFERENCIAS

S. Nakamoto. (2009). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/>

Jesus Leal Trujillo, Steve Fromhart y Val Srinivas. (2017). Evolution of blockchain technology: Insights from the GitHub platform. <https://www2.deloitte.com/insights/us/en/industry/financial-services/evolution-of-blockchain-github-platform.html>

N. Szabo. (1996). Smart Contracts: Building Blocks for Digital Markets. http://www.fon.hum.uva.nl/rob/Courses/InformationInSpeech/CDROM/Literature/LOTwinterschool2006/szabo.best.vwh.net/smart_contracts_2.html

Decker C., y Wattenhofer R. (2013). Information propagation in the bitcoin network. In IEEE P2P 2013 Proceedings. IEEE.

Zheng Z., Xie S., Dai H., Chen X., y Wang H. (2017). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. In 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress) (pp. 557-564). IEEE.

Gatteschi V., Lamberti F., Demartini C., Pranteda C., y Santamaría V. (2018). To blockchain or not to blockchain: That is the question. IT Professional, 20(2), 62-74.

Cryptocurrency statistics. (2019). <https://bitinfocharts.com/>

Carlos O. Solis-Osorio, Elizabeth Pérez-Cortés y Humberto Cervantes-Maceda. (2018). ¿Usar o no Blockchain para mi Sistema?. Software Guru, 57, pp. 32-34.

Royal Mint, How Blockchain is disrupting the finance industry, royal Mint News and Insights. (2019). <http://rmg.royalmint.com/>

Rocha H., y Ducasse S. (2018). Preliminary steps towards modeling blockchain oriented software. In 2018 IEEE/ACM 1st International Workshop on Emerging Trends in Software Engineering for Blockchain (WETSEB) (pp. 52-57). IEEE.

Xu X., Weber I., y Staples M. (2019). Architecture for blockchain applications (pp. 1-307). Berlin, Germany: Springer.

NOTAS BIOGRÁFICAS

Carlos Omar Solis Osorio es licenciado en Computación de la UAM-Iztapalapa y actualmente, estudiante de Maestría en Ciencias y Tecnologías de la Información, centrando su investigación en las cadenas de bloques y los retos que estas implican en la ingeniería de software.

Elizabeth Pérez Cortés es profesora-investigadora en la UAM-Iztapalapa. Realiza docencia e investigación en Sistemas Distribuidos, en particular en bases de datos distribuidas, sistemas par a par, datos abiertos enlazados y esquemas de incentivos.

Humberto Cervantes Maceda es profesor-investigador en la UAM-Iztapalapa. Además de realizar docencia e investigación dentro de la academia en temas relacionados con arquitectura de software, realiza consultoría y tiene experiencia en la implantación de métodos de arquitectura dentro de la industria.



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

Estimación del esfuerzo de proyectos de software con algoritmos de aprendizaje de máquinas

Software project effort estimation with machine learning algorithms

Jesús Iván Saavedra Martínez¹

ivan.saavedra@ciencias.unam.mx

María Guadalupe Elena Ibarguëngoitia González¹

gig@ciencias.unam.mx

Gibran Fuentes Pineda¹

gibranfp@unam.mx

¹*Universidad Nacional Autónoma de México Ciudad universitaria, Ciudad de México, México*

Resumen

La estimación del esfuerzo de proyectos de software es el proceso de predecir el esfuerzo requerido para desarrollar o mantener un sistema de software. Desarrollar modelos de estimación y técnicas apropiadas es fundamental para evitar pérdidas causadas por una estimación deficiente, donde se termina invirtiendo más esfuerzo del estimado.

La precisión y confiabilidad de las estimaciones desempeñan un papel muy importante en la gestión de proyectos, ya que permiten un monitoreo y control factible para garantizar que los proyectos se terminarán de acuerdo a lo planeado.

Este documento presenta una comparación entre modelos de estimación tradicionales basados en modelos estadísticos y modelos generados a partir de algoritmos de regresión de aprendizaje de máquinas.

Palabras clave

estimación de software; aprendizaje de máquinas, modelos de estimación, algoritmos de regresión, tamaño funcional.

Abstract

Software project effort estimation is the process of predicting the effort required to develop or maintain a software system. Developing estimation models and appropriate techniques is essential to avoid losses caused by a poor estimation, where more effort is spent than estimated.

The accuracy and reliability of the estimates play a very important role in project management, as they allow a feasible monitoring and control to ensure that the projects will be finished as planned.

This document presents a comparison between traditional estimation models based on statistical models and models generated from machine learning regression algorithms.

Keywords

software estimation, machine learning, estimation models, regression algorithms, functional size.

1. Introducción

La estimación de proyectos de software es una actividad importante en pequeñas y grandes organizaciones alrededor del mundo. Se han realizado investigaciones en la estimación de proyectos de software durante más de 20 años y una gran cantidad de modelos han sido propuestos. La cuestión es: ¿qué tan eficiente es actualmente la estimación de proyectos en la industria? la respuesta es: no muy eficiente [1].

A pesar de que en la industria se han desarrollado un amplio número de prácticas basadas en la estimación de proyectos, estas son poco favorables, es decir, tienen resultados poco confiables [2].

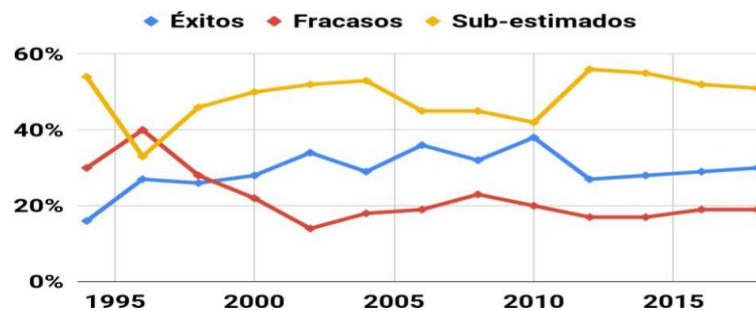


Figura 1: Tendencias de éxito de proyectos de software (Fuente: [1])

La Fig. 1 muestra las tendencias de éxito de proyectos de software del año 1994 al 2018. Los resultados se obtuvieron utilizando los datos del Standish Group Chaos Report [1]. Podemos observar que en la actualidad cerca del 50 % de los proyectos son subestimados, es decir, se termina invirtiendo más esfuerzo del estimado. Alrededor del 30% de los proyectos son exitosos, terminando el proyecto de acuerdo a lo planeado. Por último, aproximadamente el 20% son proyectos fracasados, donde estos fueron cancelados o no se utilizaron.

En este trabajo proponemos estimar el esfuerzo de proyectos de software aplicando algoritmos de aprendizaje de máquinas. Los algoritmos utilizados en este estudio incluyen: regresión lineal (LR), máquinas de regresión de vectores de soporte (SVR) y árboles de decisión de regresión (DTR). Además, el estudio busca comparar el desempeño de distintos modelos de estimación. Los resultados del estudio muestran que no siempre una regresión lineal simple, con la selección de un subconjunto de datos dada una característica del proyecto, genera el modelo de estimación con el mejor desempeño.

El resto del documento está organizado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta información general relacionada con los modelos de estimación de software. La Sección 3 describe los algoritmos de aprendizaje de máquinas, haciendo énfasis en los algoritmos de regresión. La Sección 4 muestra el caso de estudio, aplicando aprendizaje de máquinas para generar modelos de estimación utilizando un subconjunto de proyectos de la base de datos internacional gestionada por el International Software Benchmarking Standards Group (ISBSG) [3], donde los proyectos seleccionados fueron medidos utilizando el método de Puntos de Función del International Function Point Users Group (IFPUG) [4]. Por último, la Sección 5 establece las conclusiones y el trabajo futuro.

2. Estimación de software

¿Qué es la estimación? PMBOK [5] lo define de la siguiente manera:

” Una evaluación cuantitativa de la cantidad o resultado probable. Normalmente se aplica a los costos, recursos, esfuerzo y duración del proyecto y suele estar precedida por un modificador”.

Cuando se pide una estimación, a menudo se está pidiendo un compromiso o un plan para cumplir con un objetivo. Las distinciones entre las estimaciones, las metas y los compromisos son fundamentales para la comprensión de lo que es una estimación, lo que no es y cómo hacer mejores estimaciones. Una estimación es la predicción más optimista con una probabilidad distinta de cero de ser cierta, que tiene la misma probabilidad de estar por encima o por debajo del valor real [6].

¿Qué es una buena estimación? Expertos han propuesto diversas definiciones de una buena estimación del esfuerzo de proyectos de software. McConnell [6] ha declarado que una exactitud de 10% es posible, pero sólo en proyectos bien controlados, ya que proyectos poco controlados tienen demasiada variabilidad para lograr ese nivel de precisión. La mayor parte de los métodos de estimación tienen como objetivo predecir el costo y esfuerzo del proyecto. De acuerdo a Tuya [7] estos métodos pueden ser clasificados en cuatro categorías [8]:

1. Juicio de experto: basado en la experiencia de una persona.
2. Analogía: un enfoque más formal, donde los expertos comparan el proyecto a estimar con uno o más proyectos anteriores intentando encontrar similitudes y diferencias.
3. Descomposición: basado en un análisis de las características del proyecto, haciendo estimaciones individuales sobre los componentes del proyecto.

4. Modelos algorítmicos: basados en técnicas que identifican los factores clave que contribuyen al esfuerzo requerido para desarrollar el proyecto, generan un modelo matemático que relaciona dichos factores con el esfuerzo. Los modelos se basan normalmente en información obtenida de proyectos pasados.

Los modelos algorítmicos representan el enfoque más formal y son los que proporcionan resultados más confiables [7]. Estos modelos utilizan procedimientos como la regresión [9] para generar un modelo construido por una o varias expresiones matemáticas que relacionan el esfuerzo con una variable primaria, generalmente el tamaño funcional, y en algunos casos varios factores de ajuste secundarios.

El momento en el que se define el método de estimación también es importante, ya que algunos necesitan de datos históricos para poder ser implementados. Por ello, Abran [10] define otra clasificación de estimación: a priori y a posteriori.

- A priori: se tiene un ambiente de alta incertidumbre y un nivel de abstracción de necesidad muy alto. Usualmente se tiene una ventana de tiempo y recursos limitados, la mayoría de las características que se conocen son cualitativas. Los métodos utilizados generalmente son el juicio de experto.
 - Ventajas: no se necesitan datos históricos, manejo de incertidumbre a través de precisión de significado y la decisión sobre el juicio de experto puede ser muy valiosa debido a la información incompleta con la que se cuenta.
 - Desventajas: la experiencia le pertenece al experto y no a la organización, la experiencia no se puede replicar sistemáticamente.
- A posteriori: no hay incertidumbre y se conoce toda la información. Los métodos utilizados se basan en el análisis numérico y estadístico, como IFPUG [4], COSMIC [11], COCOMO [12], etc.
 - Ventajas: fácil de interpretar debido a que siguen un algoritmo.
 - Desventajas: requiere datos históricos, información oportuna, confiable y precisa.

Para la clasificación a posteriori, los modelos matemáticos típicamente son contruidos utilizando datos de proyectos terminados. Por lo tanto, la mayor parte de los llamados “modelos de estimación” en la literatura, son en realidad modelos de productividad [10]. Algunos de los beneficios de los modelos de productividad basados en proyectos pasados son los siguientes:

- La eficiencia de estos modelos puede ser analizada y descrita. Cualquiera puede utilizar estos modelos para estimar futuros proyectos.
- Siempre que se ingresa la misma información al modelo, se tendrá el mismo resultado.

3. Algoritmos de aprendizaje de máquinas

El uso de algoritmos de aprendizaje de máquinas en la estimación de software recientemente ha ganado una gran popularidad, esto a causa del amplio margen de error en los métodos de estimación tradicionales [13].

En la actual industria de desarrollo software, donde hay avances tecnológicos frecuentes y nuevos lenguajes de programación disponibles, las mejoras metodológicas y los cambios en las habilidades de los equipos de proyectos demandan modelos de estimación que se adapten a entornos cambiantes a través del tiempo [14]. Los algoritmos de aprendizaje de máquinas tienen la capacidad de aprender y mejorar en función de las predicciones generadas, a través de la estimación más cercana a los datos observados y cualquier conocimiento previo [15].

Principalmente, el proceso de aprendizaje de los algoritmos puede tomar de una tarea descriptiva o predictiva elegida sin supervisión o supervisada. El aprendizaje sin supervisión se basa en patrones que no están vinculados a ninguna característica en el conjunto de datos de entrenamiento [16], para fines tales como agrupación, reglas de asociación o detección de anomalías. En cambio, el aprendizaje supervisado debe tener entradas definidas explícitamente, correspondientes a salidas conocidas por una característica objetivo-determinada [17] que se utiliza para la clasificación o la predicción. Para ambos, hay numerosos algoritmos disponibles que se pueden aplicar según el resultado deseado. Este estudio se centra en la predicción del esfuerzo del proyecto. Para ello se utilizaron tres algoritmos predictivos: LR, SVR y DTR.

3.1. Algoritmos de regresión

El objetivo de los algoritmos de regresión es crear una función $f(x)$ que asigne adecuadamente un conjunto de variables independientes $x_1, x_2, \dots, x_n$ a una variable dependiente y . En este caso, el objetivo es construir una serie de modelos de regresión utilizando la base de datos de la ISBSG y comparar el desempeño que tienen para estimar el esfuerzo de desarrollo de proyectos de software de manera precisa.

La regresión lineal es uno de los casos más comunes. Es fundamental para la práctica de la estadística y es parte del conocimiento básico de cualquier estadística aplicada [18]. En los modelos de estimación de software tradicionales, el modelo viene dado por una recta, donde la variable x representa el tamaño funcional, la variable y *representa* el esfuerzo, α *representa* la ordenada al origen que podríamos tomar como un costo fijo y β *representa* la pendiente de la recta que indica la cantidad que crecerá (o decrecerá) la variable respuesta en términos de un incremento de la variable independiente [2].

Cuando un modelo de productividad no puede modelar de la mejor manera todas las circunstancias posibles de datos de entrada, puede ser necesario identificar más de un modelo para el mismo conjunto de datos. Los subconjuntos de datos para generar los diferentes modelos de estimación pueden tener algunas características en común, como el tipo de desarrollo, arquitectura, lenguaje de programación, sistema operativo, etc. [2].

En este caso, se debe analizar la correlación de las características con el esfuerzo del proyecto, con el fin de determinar qué subconjuntos de datos generarán los modelos más precisos, ya que un error común es hacer una partición de los datos de acuerdo a las características de los proyectos que deseamos estimar, sin validar los modelos de estimación generados.

Del mismo modo, una regresión lineal simple, tomando solo la característica del tamaño funcional, no siempre genera el modelo con la mayor precisión, ya que, dependiendo de los datos de entrada, una regresión lineal múltiple u otros algoritmos de regresión pueden ajustarse de mejor manera y tener predicciones más precisas, tal y como se muestra en la sección 4 de este documento.

Además de la regresión lineal, los otros dos algoritmos que utilizaremos son máquinas de regresión de vectores de soporte [19] y árboles de decisión de regresión [20]. El primero tiene la capacidad de modelar problemas complejos lineales y no lineales y generar resultados altamente precisos, incluso en datos ruidosos. Sin embargo, su proceso de entrenamiento puede llevar mucho tiempo en un gran volumen de datos.

En el caso de los árboles de decisión de regresión, son un tipo especial de árbol de decisión desarrollado para tareas de regresión. Esta técnica construye un modelo en forma de árbol, dividiendo recursivamente el conjunto de datos hasta que un criterio de paro se satisface. Esta división se realiza con el propósito de alcanzar la máxima homogeneidad posible relativa a la variable dependiente. Todos los nodos en el árbol, menos los terminales (también llamados hojas), especifican una condición basada en una de las variables que tienen influencia en la variable dependiente. Luego de que el árbol es generado, se puede utilizar para realizar predicciones siguiendo un camino a través de él de acuerdo con los valores específicos de las variables de entrada [21]. En los árboles de regresión, la elección de cada nodo está usualmente guiada por el criterio del error cuadrático medio mínimo [22].

4. Estimación de software con algoritmos de aprendizaje de máquinas

4.1. Preprocesamiento de los datos

La aplicación de los algoritmos de aprendizaje de máquinas requiere que los datos estén en un formato matemáticamente factible a través de un preprocesamiento. Estas técnicas consisten en la reducción de datos, la proyección de datos y el tratamiento de datos faltantes. La reducción de datos tiene como objetivo reducir el tamaño de las entradas de datos mediante la selección de características. La proyección de datos tiene la intención de transformar los datos, por ejemplo, escalando todas las características en un mismo rango predefinido. El tratamiento de datos faltantes incluye eliminar valores perdidos y/o reemplazarlos [23]. Para este estudio aplicaremos las tres técnicas.

La base de datos a utilizar contiene un total de 951 registros con las siguientes características:

1. FunctionalSize (*FS*) [numeric]
2. ValueAdjustmentFactor (*VAF*) [numeric]
3. ProjectElapsedTime (*PET*) [numeric]
4. DevelopmentType (*DT*) [Enhancement, New Development]
5. BusinessAreaType (*BAT*) [Banking, Telecommunications]
6. ClientServer (*CS*) [Yes, No]
7. DevelopmentPlatform (*DP*) [MF, PC, Multi, MR]
8. LanguageType (*LT*) [3GL, 4GL]
9. FirstOS (*FOS*) [Unix, Mainframe, Windows]
10. MaxTeamSize (*MTS*) [numeric]
11. NormalisedWorkEffortLevel1 (*NWE1*) [numeric]

Es importante mencionar que deseamos predecir el esfuerzo de desarrollo

del proyecto, por lo que la variable objetivo será la característica *NWE1*.

La Tabla 1 muestra las características categóricas de los primeros 10 registros de la base de datos. Primero convertiremos las características categóricas de representación textual a numérica. Realizaremos la conversión de los datos de la siguiente manera:

- *DT* [Enhancement=0, New Development=1]
- *BAT* [Banking=0, Telecommunications=1]
- *CS* [Yes=1, No=0]
- *DP* [MF=0, PC=1, Multi=2, MR=3]
- *LT* [3GL=0, 4GL=1]
- *FOS* [Unix=0, Mainframe=1, Windows=2]

DT	BAT	CS	DP	LT	FOS
Enhancement	?	Yes	?	?	?
New Development	?	?	MF	3GL	Unix
Enhancement	?	?	MF	3GL	Unix
Enhancement	?	?	?	3GL	?
Enhancement	?	?	?	?	?
Enhancement	?	Yes	?	4GL	?
Enhancement	?	No	MF	3GL	Mainframe
Enhancement	?	?	MF	3GL	Mainframe
New Development	?	?	PC	4GL	Windows
New Development	?	Yes	Two	Two	?

TABLA 1: Características categóricas de los primeros 10 registros

FS	VAF	PET	DT	BAT	CS	DP	LT	FOS	MTS	NWE1
3	1.09	0	0	?	1	?	?	?	?	28
620	?	7	1	?	?	0	0	0	?	18160
730	1.14	?	0	?	?	0	0	0	?	20975
114	1.18	?	0	?	?	?	0	?	?	7290
460	1	4	0	?	?	?	?	?	5	2253
7	1.1	1.87	0	?	1	?	1	?	?	396
80	1.12	13.7	0	?	0	0	0	1	3.5	3199
4	?	0.1	0	?	?	0	0	1	?	145
309	?	3	1	?	?	1	1	2	?	2516
69	0.95	9	1	?	1	?	0	?	?	2915

TABLA 2: Primeros 10 registros después de la conversión de las características categóricas

La Tabla 2 muestra los primeros 10 registros después del

preprocesamiento de datos. Lo siguiente es el tratamiento de valores faltantes, para ello obtendremos las siguientes estadísticas para cada característica: valor mínimo (min), máximo (max), media (mean), mediana (median), moda (mode) y porcentaje de valores faltantes (m v (%)).

En la Tabla 3 podemos observar que las características *BT* y *CS* tienen más del 70 % de valores faltantes, por lo que serán descartadas ya que no proporcionan suficiente información para construir modelos adecuados. Por otra parte, las características *DP*, *FOS* y *MTS* tienen entre el 50% y 70% de valores faltantes. Para *DP* y *FOS* asignaremos una categoría única a los valores faltantes (4 y 3 respectivamente), ya que son características categóricas y para *MTS* (continua) utilizaremos el promedio (7,5). Por último, *VAF*, *PET* y *LT* cuentan con menos de la tercera parte de valores faltantes. Para *VAF* y *PET* (continuas) utilizaremos los promedios (1,04 y 6,04 respectivamente) y para *LT* (categórica) utilizaremos la moda (0). Después de todo el preprocesamiento, los datos quedan de acuerdo a la Tabla 3.

caract	min	max	mean	median	mode	m v (%)
FS	3.0	4911.0	301.95	135.0	51.0	0.0
VAF	0.65	1.3	1.03	1.0	1.0	0.33
PET	0.0	44.0	6.00	5.0	3.0	0.30
DT	0.0	1.0	0.22	0.0	0.0	0.0
BAT	0.0	1.0	0.81	1.0	1.0	0.77
CS	0.0	1.0	0.79	1.0	1.0	0.71
DP	0.0	3.0	0.95	0.0	0.0	0.50
LT	0.0	1.0	0.35	0.0	0.0	0.25
FOS	0.0	2.0	0.82	1.0	1.0	0.68
MTS	0.5	80.0	7.69	5.0	4.0	0.57
NWE1	4.0	73920.0	3327.77	1520.0	480.0	0.0

TABLA 3: Estadísticas de las características

FS	VAF	PET	DT	DP	LT	FOS	MTS	NWE1
3	1.09	0	0	4	0	3	7.5	28

620	1.04	7	1	0	0	0	7.5	18160
730	1.14	6.04	0	0	0	0	7.5	20975
114	1.18	6.04	0	4	0	3	7.5	7290
460	1	4	0	4	0	3	5	2253
7	1.1	1.87	0	4	1	3	7.5	396
80	1.12	13.7	0	0	0	1	3.5	3199
4	1.04	0.1	0	0	0	1	7.5	145
309	1.04	3	1	1	1	2	7.5	2516
69	0.95	9	1	4	0	3	7.5	2915

TABLA 4: Primeros 10 registros después de todo el preprocesamiento de los datos

4.2. Correlación entre las características

Una vez realizado el preprocesamiento de los datos, creamos una matriz de correlación que mide las relaciones lineales entre las características. El coeficiente de correlación varía de -1 a 1. Si el valor es cercano a 1, significa que existe una fuerte correlación positiva entre las dos características. Cuando está cerca de -1, estas tienen una fuerte correlación negativa.

En la Fig. 2 podemos observar que las 3 características con mayor correlación a *NWE1* son: *FS* (0,69), *PET* (0,58) y *MTS* (0,5). Sin embargo, es común en las estimaciones de proyectos de software que la duración del proyecto se determine a partir del esfuerzo, por lo que es una característica que no conocemos de inicio cuando queremos estimar un nuevo proyecto. Por lo tanto, *PET* no será considerada en la generación de los modelos de predicción. Por otra parte, podemos observar 2 características con correlación negativa (*LT* y *FOS*), prácticamente con una correlación igual a cero. Sin embargo, esto no significa que quedarán fuera de los modelos de predicción que generaremos.

La Fig. 3 muestra el diagrama de dispersión de la característica con mayor correlación (*FS*) respecto a *NWE1*. Podemos observar que existe una fuerte correlación positiva, a mayor tamaño funcional mayor esfuerzo.

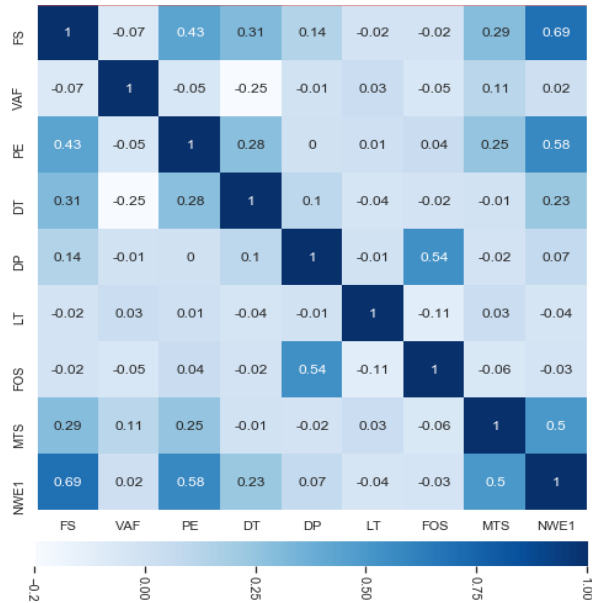


Figura 2: Matriz de correlación de las características

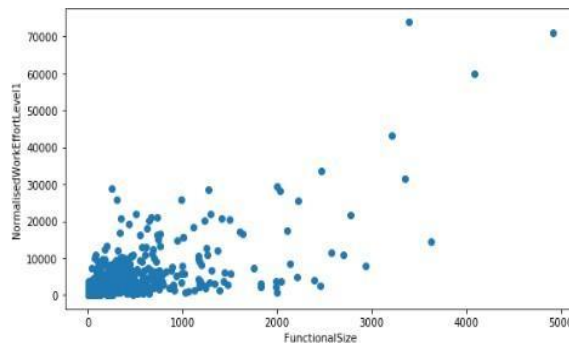


Figura 3: Diagrama de dispersión de FunctionalSize con NormalisedWorkEffortLevel1

Para un mayor panorama del desempeño de los modelos, las características que formarán parte de los modelos utilizarán las siguientes selecciones:

- todas las características
- características con correlación positiva
- características con mayor correlación a *NWE1*
- únicamente la característica *FunctionalSize*

Esta última en particular es muy importante, ya que uno de los objetivos de este documento es comparar los modelos de LR generados únicamente con *FunctionalSize* contra modelos generados con algoritmos de aprendizaje de máquinas. Por otra parte, haremos una partición de los datos dada una característica del proyecto y analizaremos los modelos de estimación generados con la partición de los datos.

4.3. Criterios de calidad para modelos de estimación

Los criterios de evaluación de errores son esenciales para validar la precisión de los modelos.

Para evaluar la calidad de estos utilizaremos las siguientes métricas:

1. **Coeficiente de determinación (R^2)** [9]: Es la proporción de la suma total de los cuadrados de la variable dependiente por las variables independientes en el modelo.

$$R^2 = \frac{SS_R}{SS_T}$$

donde SS_T es el total de la suma de los cuadrados y SS_R es la regresión de la suma de los cuadrados. Es decir:

$$\frac{(n \sum xy - (\sum x)(\sum y))^2}{(n(\sum x^2) - (\sum x)^2)(n(\sum y^2) - (\sum y)^2)}$$

Una R^2 cerca de 1 indica que existe una fuerte relación entre la variable independiente y la variable dependiente. Un valor de R^2 cercano a 0 estaría hablando de un modelo poco adecuado, pues la variabilidad del error sería muy grande

2. **Mediana del Error Absoluto (Median Absolute Error - MedAE)** [25]: Es particularmente interesante porque es robusto a los valores atípicos. La pérdida se calcula tomando la mediana de todas las diferencias absolutas entre el objetivo y la predicción. Si y_i' es la predicción de la muestra e y_i es el valor verdadero correspondiente, entonces la mediana del error absoluto estimado sobre n muestras se define de la siguiente manera:

$$MedAE = median(|y_1 - y_1'|, \dots, |y_n - y_n'|)$$

3. **Magnitud Media del Error Relativo (Mean Magnitude of Relative Error - MMRE)** [9]: Indica la media de la Magnitud del Error Relativo (Magnitude of Relative Error - MRE). El MRE corresponde al valor absoluto de la diferencia entre el esfuerzo conocido del proyecto y la predicción de la muestra y_i' dividido por el esfuerzo conocido:

$$MMRE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - y_i'|}{y_i}$$

4. **Nivel de predicción del modelo (PRED)** [9]: Indica la proporción de proyectos que son menores o iguales a un porcentaje establecido (comúnmente 25 %) respecto al MRE:

$$PRED(l) = \frac{k}{n}$$

donde k es el número de proyectos en el conjunto de datos de tamaño n para los cuales su

$$MRE \leq l.$$

Por lo tanto, los resultados esperados idealmente de un modelo de estimación adecuado son: una R^2 y PRED cerca de 1 y un MedAE y MMRE cerca de 0.

4.4. Generación y validación de modelos

Una vez que hemos preprocesado los datos, seleccionado las características que se utilizarán para la generación de los modelos y definido los criterios de calidad para evaluarlos, lo siguiente es definir, entrenar y validar los modelos de predicción. Para ello utilizamos el lenguaje de programación Python y la biblioteca de sklearn [25]. Dentro de esta biblioteca podemos elegir distintos parámetros de los algoritmos, algunos principales son el kernel para el caso de SVR y el grado para DTR.

Las Fig. 4, 5 y 6 muestran el desempeño de los algoritmos utilizando distintos tamaños del conjunto de datos de entrenamiento. Podemos observar que las primeras dos gráficas (LR y SVR) presentan escenarios donde el desempeño aumenta muy poco a mayor cantidad de datos de entrenamiento, mientras que la tercera gráfica (DTR) aumenta el desempeño a mayor número de datos, pero muestra un escenario de alta varianza.

Para una primera aproximación, se aplicó una validación cruzada de 5 iteraciones a los 3 algoritmos utilizando todas las características. Este procedimiento verifica la precisión (R^2) de los modelos, obteniendo la media y desviación estándar de las predicciones obtenidas en las iteraciones. Además, asegura que los modelos no estén sobreajustados y permite su evaluación adecuada [24].

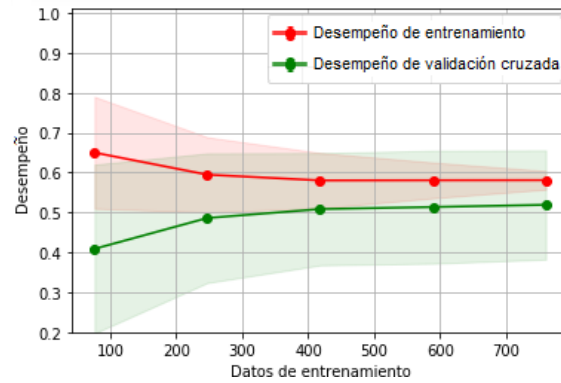


Figura 4: Gráfica de desempeño con distintos tamaños del conjunto de datos de entrenamiento con regresión lineal

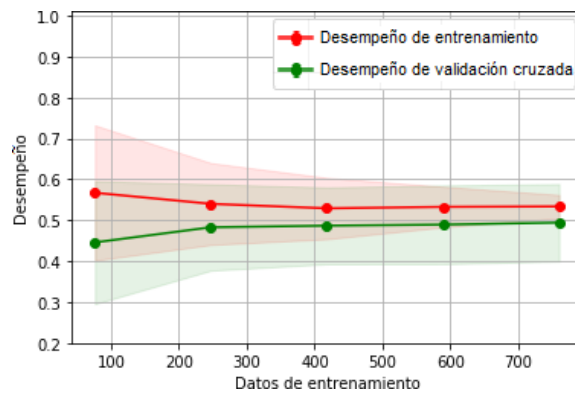


Figura 5: Gráfica de desempeño con distintos tamaños del conjunto de datos de entrenamiento con máquinas de vectores de soporte

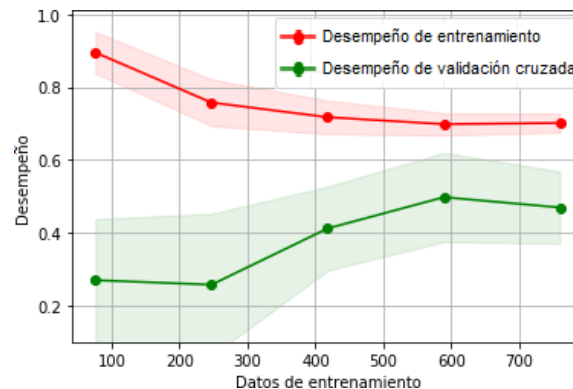


Figura 6: Gráfica de desempeño con distintos tamaños del conjunto de datos de entrenamiento con árboles de decisión

La Tabla 5 muestra la validación cruzada tomando el 70% de los datos para entrenamiento de los modelos y el 30 % para validación.

Una vez definidos los algoritmos, procedemos a entrenar y validar los modelos, utilizando el 70 % de todos los datos para entrenamiento y el 30% restante para evaluarlos con los criterios de calidad.

En la Tabla 6 podemos observar que no hay un algoritmo ni una selección de las características en las que se obtengan siempre los mejores resultados. LR tuvo mejores valores en la mayoría de los casos para la R^2 , pero los peores en MMRE. Para SVR siempre tuvo los mejores resultados para MedAE y MMRE, pero no para los demás criterios. Por último, DRT solo presentó un PRED más alto la mayoría de las veces.

Algoritmo	Precisión		Iteraciones				
LR	0.59	$\pm 0,10$	0.62	0.59	0.67	0.51	0.59
SVR	0.55	$\pm 0,02$	0.57	0.54	0.56	0.54	0.55
DTR	0.43	$\pm 0,23$	0.41	0.50	0.56	0.46	0.22

TABLA 5: Validación cruzada de 5 iteraciones de los 3 algoritmos

Selección	Algoritmo	R^2	MedAE	MMRE	PRED
Todas las características	LR	0.62	1110.81	3.2	0.19
	SVR	0.58	825.07	2.13	0.2
	DTR	0.39	901.57	2.56	0.21
Características con correlación positiva	LR	0.56	1212.49	3.48	0.18
	SVR	0.56	851.67	2.36	0.22
	DTR	0.53	1286.87	2.74	0.2
Características con mayor correlación	LR	0.55	1214.19	3.54	0.17
	SVR	0.54	845.45	2.34	0.21
	DTR	0.58	1247.5	2.63	0.21
Solo con Functional Size	LR	0.37	1153.28	2.96	0.14
	SVR	0.38	858.3	1.79	0.22
	DTR	0.21	1330.32	2.88	0.18

TABLA 6: Evaluación de criterios de calidad utilizando todas las características

Es importante resaltar que entrenar los algoritmos únicamente con la característica FS solo obtuvo mejores resultados en MMRE que las demás selecciones.

Lo siguiente es entrenar y comparar los algoritmos haciendo una partición de los datos dada una característica del proyecto, como lo hacen los modelos de estimación tradicionales. Se hace una partición de los datos para generar diferentes modelos de predicción de acuerdo con una característica en común, como el tipo de desarrollo [2]. En la base de datos tenemos 2 tipos distintos, Enhancement y New Development.

La Fig. 7 muestra el diagrama de dispersión de *FS* con *NWE1*, resaltando en distintos colores el tipo de desarrollo (Enhancement en rojo y New Development en gris). En principio parece no haber gran diferencia en el comportamiento de los datos dada la característica.

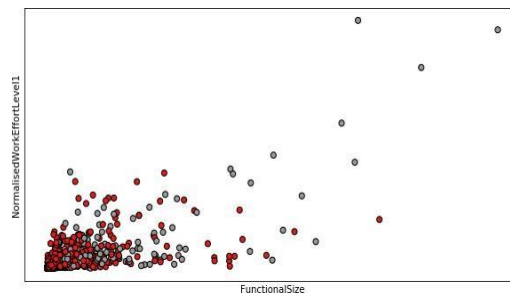


Figura 7: Diagrama de dispersión de *FS* con *NWE1* resaltando el tipo de desarrollo (Enhancement rojo y New Development gris)

Las Tablas 7 y 8 muestran el resultado de entrenar nuevamente los algoritmos, en esta ocasión con la partición de los datos por tipo de desarrollo en Enhancement y New Development, con 733 y 218 registros respectivamente.

En la Tabla 7 podemos observar que la mayoría de las veces la R^2 y el MMRE tuvo peores

resultados para LR y SVR, mientras que para DTR estos valores mejoran con la partición de los datos. Dada la partición, entrenar y validar los modelos utilizando todas las características obtuvo mejores resultados en R^2 y el MMRE. En esta ocasión, entrenar los algoritmos únicamente con *FS* obtuvo mejores resultados, dando mejores valores para MedAE y PRED con SVR.

Selección	Algoritmo	R ²	MedAE	MMRE	PRED
Todas las características	LR	0.29	1301.11	4.84	0.19
	SVR	0.31	712.87	2.43	0.24
	DTR	0.55	778.41	2.01	0.26
Características con correlación positiva	LR	0.32	1253.51	5.03	0.19
	SVR	0.3	689.44	2.47	0.24
	DTR	0.54	778.41	2.01	0.25
Características con mayor correlación	LR	0.32	1186.08	4.92	0.21
	SVR	0.29	700.87	2.45	0.24
	DTR	0.52	846	2.03	0.25
Solo con Functional Size	LR	0.2	1189.95	4.64	0.15
	SVR	0.2	589.92	2.03	0.28
	DTR	0.17	947.86	2.38	0.16

TABLA 7: Evaluación de criterios de calidad con tipo de desarrollo Enhancement

Selección	Algoritmo	R ²	MedAE	MMRE	PRED
Todas las características	LR	0.71	1824.19	2.64	0.23
	SVR	0.54	1714.33	2.24	0.2
	DTR	0.58	2707.99	2.89	0.12
Características con correlación positiva	LR	0.73	1898.3	2.63	0.26
	SVR	0.54	1714.6	2.24	0.23
	DTR	0.41	2707.99	2.89	0.14
Características con mayor correlación	LR	0.74	1625.02	2.28	0.24
	SVR	0.54	1691.3	2.22	0.21
	DTR	0.41	2707.99	2.9	0.15
Solo con Functional Size	LR	0.67	1720.26	2.17	0.17
	SVR	0.48	1159.71	1.62	0.23
	DTR	0.35	2863.26	2.8	0.15

TABLA 8: Evaluación de criterios de calidad con tipo de desarrollo New Development

Algoritmo	R ²	MedAE	MMRE	PRED
LR	61	0	3	
SVR	211	9	4	
DTR	40	3	5	

TABLA 9: Número de ocasiones en que cada algoritmo presentó los mejores resultados

La partición de los datos por New Development (Tabla 8) resultó muy interesante, ya que presentó los mejores valores para R^2 , MMRE y PRED, mientras que el mejor valor de MedAE fue con la partición de Enhancement. A diferencia de este, entrenar los algoritmos con todas las características presentó los resultados más bajos que las demás selecciones. Sin embargo, FS nuevamente presentó el mejor MedAE y en esta ocasión el mejor MMRE. Respecto a los algoritmos, DTR siempre presentó los peores resultados, LR fue mejor en la R^2 y en la mayoría de PRED, mientras que SVR presentó el mejor MMRE y en la mayoría de los casos el mejor MedAE.

Por último, la Tabla 9 muestra el número de veces que cada algoritmo presentó los mejores resultados para los criterios de calidad de los modelos validados. Podemos observar que SVR predominó en los criterios de MedAE y MMRE obteniendo casi siempre los mejores resultados. Por otra parte, LR obtuvo la mayoría de las veces mejores resultados en la R^2 . Para el caso de PRED, se comportó de manera más uniforme respecto a la predicción de los algoritmos, ya que DTR obtuvo los mejores resultados en este criterio, pero solo una ocasión más que LR y dos más que SVR.

5. Conclusión

En los últimos años, investigadores y profesionistas han propuesto varias metodologías para la estimación del esfuerzo de proyectos de software. En este documento hemos propuesto el uso de algoritmos de aprendizaje de máquinas para generar modelos de estimación, pero ¿estos son mejores que los modelos de estimación de software tradicionales?, la respuesta es: no en todos los casos. De acuerdo con los resultados obtenidos, los modelos de estimación basados en algoritmos de aprendizaje de máquinas obtuvieron en la mayoría de las veces mejores resultados para los criterios de calidad. Los resultados de las comparaciones entre los modelos dieron resultados muy variados. En algunos casos, entrenar los algoritmos con todas las características de los proyectos dio mejores criterios de calidad, donde una ventaja de los algoritmos de aprendizaje de máquinas es que no se limitan a utilizar solo el tamaño funcional para el entrenamiento y validación de los modelos. Sin embargo, en otras ocasiones fue más conveniente utilizar solo el tamaño funcional como lo hacen los modelos de estimación tradicionales.

Los resultados que obtuvimos haciendo una partición de los datos dada una característica del proyecto, en este caso por tipo de desarrollo, fueron convenientes solo para New Development, ya que presentó mejores criterios

de calidad que los modelos sin la partición. Sin embargo, Enhancement tuvo resultados menos precisos. Por lo tanto, es necesario validar la calidad de todos los modelos que se generen haciendo una partición de los datos para asegurar que podemos generar estimaciones confiables a partir de ellos.

5.1. Trabajo futuro

En la actual industria de desarrollo de software, donde surgen nuevas metodologías, herramientas y lenguajes de programación, contar con modelos de estimación confiables es de suma importancia. Sería de gran apoyo contar con un sistema que haga el análisis y preprocesamiento de los datos y genere los modelos de estimación más precisos posibles para los proyectos que deseamos estimar, ya que además de darnos confianza en las estimaciones, nos ahorraría tiempo y recursos. Desarrollar un sistema con estas características es parte de un trabajo de tesis de maestría, el cual utiliza principalmente algoritmos de aprendizaje de máquinas, como los descritos en este documento.

REFERENCIAS

- [1] "The Standish Group", Standishgroup.com, 2019. [Online]. Available: <http://standishgroup.com/>. [Accessed: 21- May- 2019].
- [2] A. Abran, Software Project Estimation: The Fundamentals for Providing High Quality Information to Decision Makers, Illustrated ed., Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2015, p. 261.
- [3] International Software Benchmarking Standards Group, ISBSG Repository R1 - Field Descriptions, Software project data, 2017.
- [4] International Function Point Users Group, Function Point Counting Practices Manual, Version 4.3.1, Measurement Manual, Jan 2010.
- [5] Project Management Institute, Inc., A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK), 5 ed., Newtown Square, Pennsylvania USA: PMI Publishing Division, 2000, p. 596.
- [6] S. McConnell, Software Estimation: Demystifying the Black Art, Illustrated ed., the University of California: Microsoft Press, 19 Nov 2009, p. 308.
- [7] J. Tuya, I. R. Román y J. J. D. Cosín, Técnicas cuantitativas para la gestión en la ingeniería del software, Netbiblo, 2007, p. 373.
- [8] A. Idri, A. Abran, and T. M. Khoshgoftaar, "Estimating Software Project Effort by Analogy Based on Linguistic Values," in Proceedings - International Software Metrics Symposium, Jan 2002, p. 21-30.
- [9] J. O. Rawlings, S. G. Pantula y D. A. Dickely, Applied Regression Analysis: A Research Tool, Second ed., Department of Statistics, North Carolina State University: Springer Science & Business Media, 2001, p. 660.
- [10] A. Abran, Software Benchmarking, Estimation and Quality Models Based on Functional Size with COSMIC – ISO 19761, Draft Apr 2008.

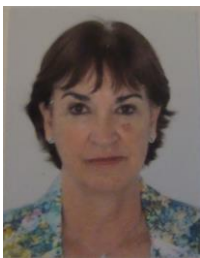
- [11] COSMIC Measurement Practice Committee, The COSMIC Functional Size Measurement Method, Version 4.0.2, Measurement Manual, Dec 2017.
- [12] B. W. Boehm, Clark, Horowitz, Brown, Reifer, Chulani, R. Madachy, and B. Steece, Software Cost Estimation with Cocomo II with Cdrom, 1st ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall PTR, 2000.
- [13] K. Srinivasan and D. Fisher, "Machine learning approaches to estimating software development effort," IEEE Transactions on Software Engineering, vol. 21, 1995, p. 126-137.
- [14] P. Pospieszny et al., An effective approach for software project effort and duration estimation with machine learning algorithms, The Journal of Systems and Software, 137 (2018), p. 184-196,
- [15] T. Mitchell, Machine learning. New York: McGraw Hill, 2017.
- [16] Linoff, G.S., Berry, M.J.A., Data Mining Techniques: For Marketing, Sales, and Customer Relationship Management. John Wiley Sons, 2011.
- [17] Cios, K., Pedrycz, W., Swiniarski, R., Kurgan, L., Data Mining A Knowledge Discovery Approach. Springer Science, New York, New York, USA, 2007.
- [18] J. J. Faraway, Extending the Linear Model with R: Generalized Linear, Mixed Effects and Nonparametric Regression Models, Boca Raton: CRC Press, 2006, p. 345.
- [19] Han, J., Kamber, M., Pei, J., Data Mining: Concepts and Techniques, Morgan Kaufmann, 2006.
- [20] I. H. Witten, E. Frank, Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques, 2nd ed., Morgan Kaufmann, San Francisco, 2005.
- [21] IDRI, A. & ELYASSAMI, S. Applying Fuzzy ID3 Decision Tree for Software Effort Estimation. International Journal of Computer Science Issues, 2011.
- [22] BRAGA, P. L., OLIVEIRA, A. L. I., RIBEIRO, G. H. T. & MEIRA, S. R. L. Bagging Predictors for Estimation of Software Project Effort. In: International Joint Conference on Neural Networks, Orlando, Florida, 2007.
- [23] N. Mittas, L. Angelis, LSEbA: least squares regression and estimation by analogy in a semi- parametric model for software cost estimation, Empirical Softw. Eng. 15, 2010.
- [24] Krogh, Anders Jesper, V., Neural Network Ensembles, Cross Validation, and Active Learning. In: Advances in Neural Information Processing Systems, 7, 1995, pp. 231-238.
- [25] "scikit-learn: machine learning in Python — scikit-learn 0.21.1 documentation", Scikit- learn.org, 2019. [Online]. Available: <https://scikit-learn.org>

learn.org/stable/index.html. [Accessed: 21- May- 2019].

Notas biográficas



Jesús Iván Saavedra Martínez es estudiante de la Maestría en Ciencia e Ingeniería de la Computación en la UNAM y también es Ayudante de Profesor de Asignatura desde el 2016 en la Facultad de Ciencias de la misma universidad. Ha impartido cursos de Ingeniería de Software principalmente en el área de Medición y Estimación de Software y cursos con temas relacionados a la Inteligencia Artificial.



María Guadalupe Elena Ibargüengoitia González es profesora de la UNAM tanto en la Facultad de Ciencias en la carrera de Ciencias de la Computación, como en el Posgrado en Ciencia e Ingeniería de la Computación. Ha impartido cursos de Ingeniería de Software desde 1982 a nivel licenciatura y desde 1993 en el posgrado. Actualmente imparte cursos de Ingeniería de Software a nivel licenciatura y maestría en universidades nacionales e internacionales. Ha asesorado a empresas y organizaciones en el desarrollo de software.



Gibran Fuentes Pineda es investigador y desarrollador en minería de datos, aprendizaje de máquinas y visión por computadora con un enfoque en large-scale problems y robótica. Es profesor e investigador asociado del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y Sistemas. Actualmente imparte cursos de aprendizaje de máquinas y aprendizaje profundo.



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

Análisis del Desempeño de Sistema de Detección de Señal SSVEP Utilizando Clasificadores Árbol Simple y Máquina de Vectores de Soporte

Performance Analysis of SSVEP Signal Detection System Using Simple Tree and Support Vector Machine Classifiers

Alma Delia Corral Sáenz¹
adcorral@itchihuahua.edu.mx

Raúl Rangel González¹
rrangel@itchihuahua.edu.mx

Mario Ignacio Chacón Murguía¹
mchacon@ieee.org

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

Resumen: Un tipo de interfaces cerebro-computadora (BCI) son los sistemas que interpretan patrones de actividad cerebral para facilitar a personas con discapacidad motora o del habla, la comunicación o el control de dispositivos. Una forma de comunicación exitosa han sido los deletreadores basados en potenciales evocados de estado estable (SSVEP por sus siglas en inglés) que parten de la generación de estímulos visuales para provocar determinada actividad cerebral, registrarla e interpretarla mediante algoritmos de clasificación. Dentro de estos sistemas falta realizar un análisis para determinar un clasificador que tenga una relación tiempo de procesamiento y desempeño eficientes para aplicaciones en entornos controlados. En este trabajo se parte de la generación y registro de señales SSVEP, para realizar un análisis de desempeño de los clasificadores de árbol simple ST, y de máquinas de vectores de soporte SVM, los cuales son algoritmos de baja complejidad computacional encontrados en los métodos de análisis de SSVEP. De acuerdo a los resultados obtenidos, el porcentaje promedio de acierto del ST para una señal de 10 s fue de 84.58% para el canal O1 y un 78.75% para el O2; mientras que el del SVM fue 78.33%.

Palabras clave: BCI, señal EEG, SSVEP, ST, SVM.

Abstract: One type of Brain computer interfaces are the systems that interpret brain activity patterns to assist people with motor or speech disability in communication or control devices tasks. A successful manner of communication is the use of spellers based on steady state visually evoked potentials (SSVEP) which are generated from visual stimulus. These stimuli are later registered and interpreted through classifiers algorithms. However, there is a lack of analysis in these systems that consider processing time and efficient performance for applications in controlled environment. In this work, SSVEP signals are generated and registered to analyzed the performance of simple tree (ST) and support vector machine (SVM) classifiers, which are low computational complexity algorithms found in methods of SSVEP analysis. According to the results, the average percentage of success of the ST for a 10 s signal was 84.58% for the O1 channel and 78.75% for the O2 channel; while for the SVM was 78.33%.

Keywords: BCI, EEG signal, SSVEP, Simple tree, Support vector machines.

1. Introducción

El desarrollo o mejoramiento de esquemas de comunicación para personas que presentan discapacidad motora y del habla ha cobrado mayor interés desde el surgimiento de las interfaces cerebro-computadora. Los deletreadores basados en potenciales evocados han sido una de las estrategias que esta tecnología ha propiciado. Estas interfaces de comunicación presentan al usuario o paciente un estímulo que provoca cambio en actividad cerebral y es medido y registrado mediante señales de electroencefalografía (EEG) que posteriormente son procesadas, caracterizadas e interpretadas para dar un significado al estímulo detectado. Los SSVEP son potenciales evocados que han sido utilizados de forma exitosa para estos fines de comunicación y se basan en la generación de un estímulo a una frecuencia determinada que provoca que en la actividad cerebral se refleje la misma frecuencia. SSVEP es un potencial evocado muy común en la literatura ya que muestra un comportamiento estable y no requiere de entrenamiento en el usuario final (Lim, Lee, Hwang, Kim, & Im, 2015) (Zhang, Yu, Yin, & Zhou, 2016).

La generación del estímulo SSVEP se realiza mediante figuras u objetos que parpadean a cierta frecuencia, por ejemplo, rectángulos (Zhanga, Zhou, Jin, Wanga, & Cichockib, 2015), teclados (Lim, Lee, Hwang, Kim, & Im, 2015), dibujos (Zhao, y otros, Junio 2017), dameros (Funase, Wakita, Ita, & Takumi, 2016), etc. La adquisición de las señales SSVEP es mediante electrodos colocados de acuerdo al sistema internacional 10-20 y en diversos trabajos se presentan diferentes configuraciones de electrodos para obtener la señal SSVEP. Sin embargo, de acuerdo a (Lee, Lin, Cherng, & Ko, 2016), con el uso de los electrodos O_1 y O_2 es suficiente para adquirir correctamente la señal SSVEP. El análisis y procesamiento de las señales SSVEP se hace tradicionalmente extrayendo e interpretando características en el dominio de la frecuencia utilizando métodos como análisis del espectro de potencia (Zhanga, Zhou, Jin, Wanga, & Cichockib, 2015) (Lee, Lin, Cherng, & Ko, 2016), análisis canónico de correlación (Zhanga, Zhou, Jin, Wanga, & Cichockib, 2015) (Lee, Chuang, Yeng, Chen, & Lin, Dic 2017), análisis de componentes independientes (Nakanishi, Yijun, Hsu, Wang, & Jung, sep 2017), redes neuronales artificiales (Turnip, Suhendra, K, & Sihombing, 2017) o tensores (Ji, y otros, 2016). Entre las aplicaciones del análisis de la señal SSVEP se encuentran deletreo con caracteres alfanuméricos (Lim, Lee, Hwang, Kim, & Im, 2015) (Yin, Zhou, Jiang, Yu, & Hu, junio 2015) (Tang, Wang, Dong, Pei, & Chen, 2017), marcación de números telefónicos (Cheng, Gao, Gao, & Xu, oct 2002), robótica (Zhao, y otros, Junio 2017), rehabilitación (Zhao, Chu, Han, & Zhang, julio 2016) y aplicaciones enfocadas a estudiar el funcionamiento del ojo y el sistema visual humano como en (Cotrina, Benevides, Castillo-Garcia, & Benevides, julio 2017) (Maye, Zhang, & Engel, julio 2017).

De las aplicaciones mencionadas, los deletreadores han sido las más recurridas ya que mediante la selección de símbolos se pueden transmitir diferentes mensajes que pueden ser utilizados en múltiples aplicaciones. Los deletreadores han utilizado distintas figuras y objetos para generar el estímulo, pero uno que ha sido poco explorado es el damero, una figura similar a un tablero de ajedrez que de acuerdo a (Funase, Wakita, Ita, & Takumi, 2016), estimula efectivamente la corteza visual. Esta área de oportunidad motiva a proponer en este trabajo un método novedoso para detectar una señal SSVEP generada con un deletreador que utiliza dameros como el estímulo que provoca en la actividad cerebral el patrón de determinada frecuencia. Para ello, el método propuesto contempla un protocolo de adquisición de señales, realiza un análisis en el dominio de la frecuencia para el preprocesamiento y extracción de características, clasifica mediante dos modelos: máquinas de vectores de soporte y árbol simple; interpreta a cuál carácter de la interfaz corresponde y realiza una toma de decisión que conducirá al carácter elegido.

El resto del artículo se presenta de la siguiente manera: en la sección 2 se plantea el método propuesto, en la sección 3 se describe el deletreador desarrollado, en la sección 4 se muestran los resultados y en la sección 5 se presentan las conclusiones.

2. Método Propuesto

La Figura 1 muestra el esquema general del método propuesto que consta de las etapas de adquisición, preprocesamiento, extracción de características, clasificación de la señal SSVEP e interpretación en la interfaz. Todas estas etapas se describen en las siguientes subsecciones.

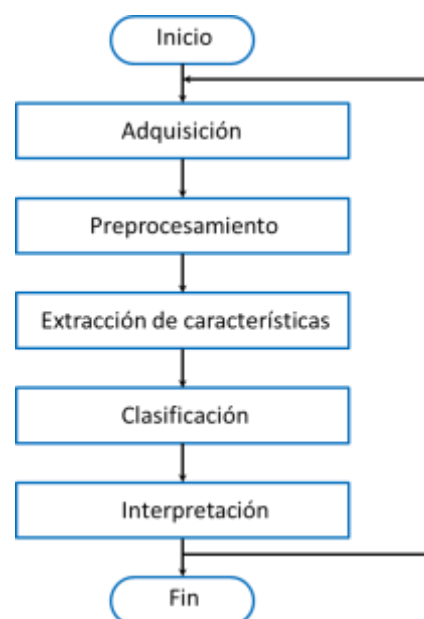


Figura 1. Esquema general del método propuesto.

2.1 Adquisición de señal

En la etapa de adquisición de la señal, se genera el estímulo SSVEP mediante dameros que parpadean a determinada frecuencia, creando la ilusión de que los cuadros están cambiando de posición (Zhang, Yu, Yin, & Zhou, 2016). Los dameros empleados se componen de patrones blanco y negro en 4x4 cuadros internos y un punto rojo en el centro para que el usuario enfoque su mirada. En la Figura 2 se muestra un damero con las dimensiones empleadas.

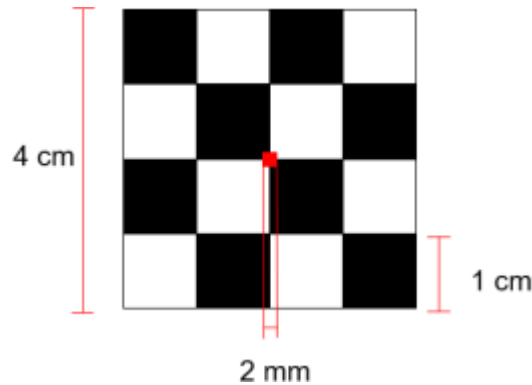


Figura 2. Damero con patrón de colores blanco y negro con punto rojo en el centro para enfocar la mirada.

Las especificaciones en la generación de la señal se basan en las dimensiones de los cuadros internos del damero, distancia entre el damero y el sujeto, la frecuencia de parpadeo y las condiciones del entorno. Las dimensiones de los cuadros internos se determinaron al fijar un ángulo de visión de 1 grado que debe tener el sujeto de pruebas al mirar el cuadro interno del estímulo a una distancia común de 55 cm al mirar la pantalla de una computadora. El ángulo de visión de 1 grado es usual en la generación de potenciales evocados visuales en procedimientos clínicos (Trujillo & Borrego, 1985). La dimensión de los cuadros internos del damero se define por:

$$\text{dim} = 2 * \left(D * \arctan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) \quad (1)$$

donde D es la longitud en centímetros entre el ojo del sujeto y la pantalla donde están los estímulos y θ es el ángulo de visión que se desea obtener. Para seleccionar los valores de frecuencias de parpadeo se realizaron dos consideraciones: que una frecuencia no debe ser múltiplo de otra para evitar falsos positivos por armónicos, y que deben evitarse frecuencias dentro de la banda alfa, especialmente entre los 10 y 11 Hz debido a que en la región occipital del cerebro se presenta gran actividad de este tipo al cerrar y abrir los ojos y la información generada por esta actividad podría presentar una mayor

amplitud que la que se genera por un SSVEP. Las frecuencias de parpadeo entonces fueron definidas mediante la fórmula:

$$F_p = \frac{F_r}{M} \quad (2)$$

donde F_r se refiere a la frecuencia de actualización de la pantalla y M es un número entero, de manera que las frecuencias de parpadeo obtenidas se muestran en la Tabla 1:

Tabla 1. Frecuencias de parpadeo

Número entero M	Frecuencia de parpadeo F_p
10	6 Hz
9	6.6 Hz
8	7.5 Hz
7	8.57 Hz

Al momento de generar la señal, ciertas condiciones del entorno se mantuvieron bajo control para facilitar que las características de las muestras fueran consistentes y que los cambios producidos en ellas fueran inducidos puramente por el sujeto de pruebas como respuesta al estímulo visual del damero y no por condiciones externas. Las variables bajo control son:

Iluminación. Se debe contar con una iluminación baja (Ding, Sperling, & Srinivasan, 2006). Se obtuvieron las muestras en habitación con 4 luxes en promedio.

Luces parpadeantes. No deben existir dentro del campo de visión del usuario para evitar distracciones.

Elementos distractores. No deben existir dentro del campo de visión del usuario (Bondre & Kapgate, 2015).

Postura. Se sugiere tener una postura cómoda y similar en todos los casos (Bondre & Kapgate, 2015). Los sujetos de prueba utilizaron una silla con descansa brazos para tener una postura uniforme.

Temperatura. Debe ser agradable para el sujeto de pruebas. Se mantuvo un rango entre los 22 y 26 °C durante la toma de muestras.

Una vez definidas las condiciones en la selección del estímulo, fue seleccionada la diadema Emotiv EPOC+® como el dispositivo para registrar la actividad cerebral. La diadema tiene las siguientes características:

- Es un dispositivo comercial y accesible en costo para cualquier persona.
- Ofrece frecuencia de muestreo de 128 Hz, suficiente para muestrear la frecuencia de parpadeo más alta de los dameros que es de 8.57 Hz.
- Cuenta con 14 electrodos para adquisición de señales de EEG, de los cuales fueron seleccionados el O_1 y O_2 que se posicionan en el lóbulo occipital, área cerebral en donde se encuentra la corteza visual, activada por el estímulo del damero. De acuerdo a (Lee, Lin, Cherng, & Ko, 2016), estos electrodos son suficientes para la obtención de las señales SSVEP.
- Proporciona datos crudos de las señales EEG.
- Tiene resolución mayor a 10 μ V, que es el rango de amplitud que tienen los potenciales evocados (Abbasi, Gaume, Francis, Dreyfus, & Vialatte, 2015).
- Tiene un rango dinámico mayor a ± 10 μ V para no tener pérdida de información.

La lectura de los electrodos O_1 y O_2 se realiza mediante el software TestBench. La frecuencia de muestreo es de 128 Hz y fueron descartadas las señales donde se presentaron artefactos por desconexión de electrodos, es decir, solo se consideraron aquellas en las que ambos electrodos hicieron un registro efectivo.

La adquisición de señales fue realizada con 3 sujetos de prueba durante un evento llamado sesión. La sesión se refiere a un lapso de 40 minutos en el que se adquirieron 120 señales de 20 segundos cada una. Con los primeros datos de las señales de 20 s se crean otras 120 señales de una ventana de 10 s y 120 señales de una ventana de 5 s, con lo que al final se tienen para análisis 360 señales de cada sujeto. Las señales adquiridas se definen en este artículo como $x_p(n)$, donde n es el índice de tiempo y p se refiere a los canales definidos por los electrodos O_1 y O_2 .

2.2 Preprocesamiento de la señal

Una vez adquirida la señal por ambos electrodos o canales, a cada una de ellas se le aplicó la transformada discreta de Fourier (DFT por sus siglas en inglés) definida por:

$$X_p(k) = \sum_{n=1}^{N-1} x_p(n) e^{-j \frac{2\pi kn}{N}}, \quad k=1, \dots, N \quad p=\{O_1, O_2\} \quad (3)$$

donde k es el índice de frecuencia, N el tamaño de la señal. Luego se realiza un ajuste para eliminar la mitad redundante y el escalamiento en $N/2$ mediante:

$$Y_p(k) = |2X_p(k) / N| \quad \text{para} \quad 1 \leq k \leq N/2 + 1 \quad (4)$$

2.3 Extracción de características

Para este trabajo, se consideró que la característica más relevante que se puede obtener de la actividad cerebral al presentarse el estímulo SSVEP es la componente de frecuencia con mayor amplitud en la señal. Primero se acota $Y_p(k)$ a la banda entre 5.6 Hz y 9 Hz para que contenga solo la banda de las 4 frecuencias de parpadeo definidas con (2). Para ello, se calcula la resolución de la frecuencia en Hz mediante:

$$\text{Res} = \frac{F_s}{N} \quad (5)$$

donde F_s es la frecuencia de muestreo. Luego se recorta la señal $Y_p(k)$ de la siguiente forma:

$$Y_{fp}(k) = \left\{ Y_p(k) \mid \frac{5.6}{\text{Res}} \leq k \leq \frac{8.8}{\text{Res}} \right\} \quad (6)$$

donde el 5.6 y el 8.8 se refieren a los límites inferior y superior de las frecuencias en las cuales se puede presentar el estímulo. Una vez obtenido el vector $Y_{fp}(k)$ acotado dentro de las frecuencias de interés, se procede a encontrar los índices de las amplitudes máximas de las frecuencias en los canales O_1 y O_2 definidas como $k_{\max_{ij}}$, donde $i=20s, 10s, 5s$ y $j=\{O_1, O_2\}$, luego se obtienen los valores de frecuencia que les corresponden:

$$f_{ij} = k_{\max_{ij}} \text{Res} \quad \text{para } i=20s, 10s, 5s ; j=\{O_1, O_2\} \quad (7)$$

misimos que serán definidos como características de frecuencia. Este procedimiento se realiza a cada muestra de las ventanas de 20, 10 y 5 s y se guardan en un vector en el orden siguiente: los primeros dos elementos corresponden a las características obtenidas cuando se aplicó el estímulo de 6 Hz, los siguientes corresponden al de 6.6 Hz, los siguientes al de 7.5 Hz y los últimos al de 8.57 Hz. Esto define el siguiente vector de características:

$$\text{feat}_i = \{f_{i01}, f_{i02}\} \quad (8)$$

En la Figura 3 se muestra el espacio de características de 120 señales de la ventana de 20 s para el sujeto 1, siendo el eje horizontal el valor de f_{o1} y el eje vertical el valor de f_{o2} . Los ejes están en escala de Hertz. Con la gráfica se pretende mostrar que tanto el valor de f_{o1} como el de f_{o2} son similares en la mayoría de los casos y están lo suficientemente separadas entre clases. En la gráfica se pueden observar grupos definidos por f_{o1} y f_{o2} en los que los valores de ambos elementos no son iguales, lo que hace que estos vectores se separen del grupo donde se encuentra su respectiva clase, esto pasa generalmente por no seguir correctamente el protocolo de toma de muestras y se generan frecuencias con mayor amplitud que las del SSVEP.

Las características que se muestran en la Figura 3 son 120 en total, pero se encuentran sobrepuestas, ya que varias sesiones generaron los mismos valores tanto en el electrodo O_1 como en el O_2 , por lo cual aparecen en el mismo punto.

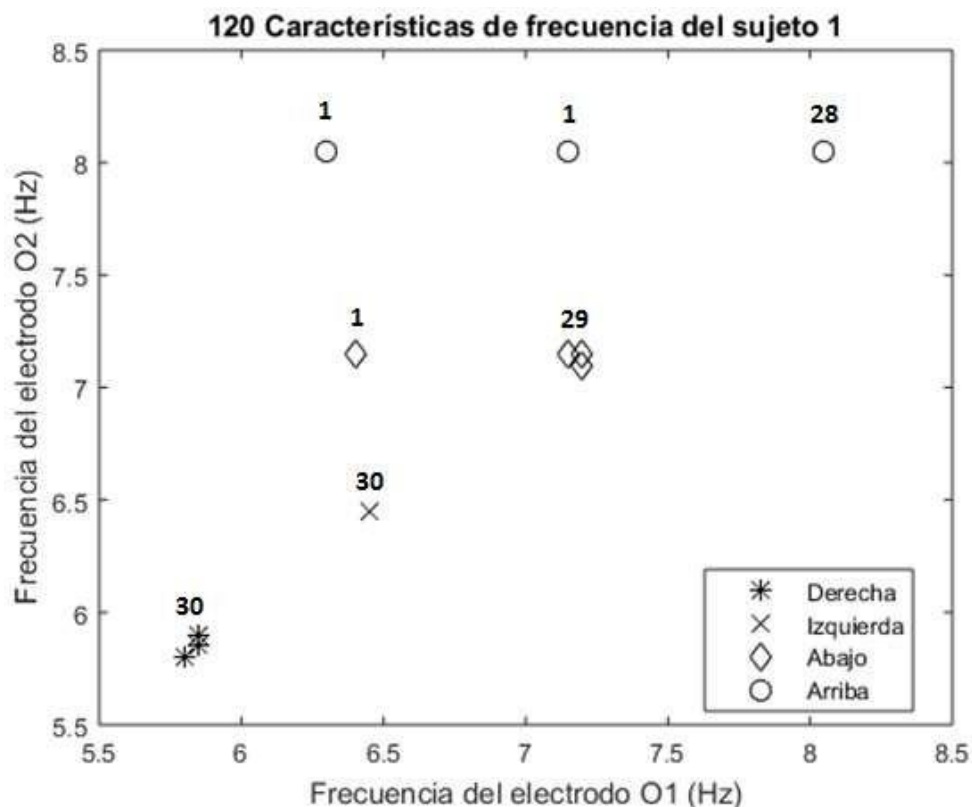


Figura 3. Gráfica de las características de frecuencia de los electrodos O_1 y O_2 del sujeto 1.

2.4 Clasificación

En la literatura, existen varios tipos de clasificadores para estudiar el fenómeno de SSVEP (da Cruz, Wan, Wong, & Cao, 2015) (Shyam Prasad, et al., 2017). Para seleccionar el clasificador con mejor rendimiento, se realizó un análisis

estadístico de los clasificadores SSVEP que se reportan en la literatura y con base en las conclusiones de éste, se optó por seleccionar los clasificadores *simple tree* (ST) y *support vector machine* (SVM) debido que ambos tienen una velocidad de predicción rápida, un uso de memoria bajo para el ST y medio para el SVM y una fácil interpretación. El uso del ST es útil cuando se trabaja con un solo electrodo y el SVM cuando se trabaja con la información de ambos electrodos. Para generar el conjunto de datos de entrenamiento de ambos clasificadores, se obtuvieron 120 pruebas con un sujeto y para generar el conjunto de datos de prueba, se obtuvieron 360 pruebas con tres sujetos. Las clases se refieren al damero que fue seleccionado según se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Nombres de las clases según la posición de los dameros.

Rangos de frecuencia	Posición del damero en la interfaz	Nombre de la clase
5.6 – 6.15	Parte derecha	Derecha
6.175 – 6.8	Parte izquierda	Izquierda
6.775 – 7.6	Parte inferior	Abajo
7.6 – 8.8	Parte superior	Arriba

2.4.1 Clasificador ST

Para la creación del clasificador ST se realizó lo siguiente: se extrajo del valor esperado dentro de cada clase y se crearon de 3 nodos, cada uno posicionado en el punto medio de las clases adyacentes: 6.15 Hz, 6.8 Hz y 7.6 Hz. El algoritmo a utilizar es el ID3 (Mitchell, 1997) que hace uso de la ganancia de información y la entropía E . La ganancia se utiliza para saber el orden de los nodos dentro del árbol y la entropía para saber si es un nodo es final o si se dividirá aún más. La entropía se calcula de la siguiente manera:

$$E(S) = - \sum_{z \in Z} p(z) \log_2(p(z)) \quad (9)$$

donde S es el conjunto de datos que contienen las frecuencias de las clases (de 5.5 a 8.8Hz), Z el conjunto de clases que se pueden encontrar en S y $p(z)$ la probabilidad de obtener un elemento de la clase z en el conjunto S . En este caso z se refiere a la frecuencia SSVEP que se debe detectar. Cuando el valor de la entropía sea igual a cero indicará que todos los datos del conjunto S de elementos pertenecen a la misma clase, por lo que el nodo evaluado será el último. El cálculo de la ganancia de información se realiza de la siguiente forma.

$$G(S, A) = E(S) - \sum_{t \in T} p(t) E(t) \quad (10)$$

donde T se refiere a los subconjuntos de datos que se crean al dividir el conjunto S por la condición que impone el atributo A , $p(t)$ la probabilidad de obtener un elemento del subconjunto t , el cual se refiere al rango de frecuencias que definen cada clase y $E(t)$ la entropía del subconjunto t . El atributo que se escoge para dividir a un nodo es el que mayor ganancia de información tenga.

Debido a que los valores del sujeto de prueba son distribuidos por partes iguales dentro de cada clase el valor de ganancia de información va a ser igual para cada atributo, por lo que el orden de división de los nodos se escoge por su valor numérico de forma ascendente. La entropía fue indicando cuando detener la división de los nodos. El diagrama del árbol generado se muestra en la Figura 4, donde f_{ox} indica que se trata de una característica de frecuencia de cualquiera de los dos electrodos.

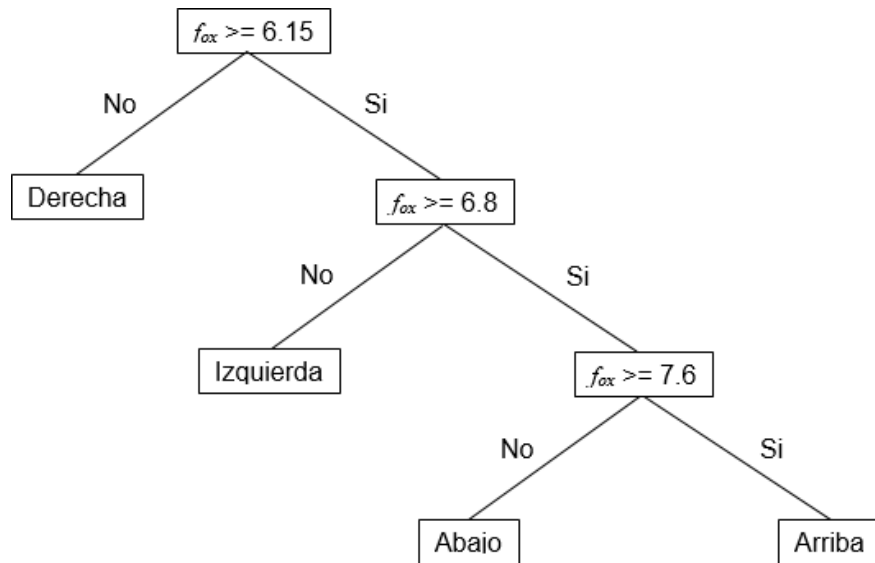


Figura 4. Clasificador *Simple Tree*.

Una vez generado el árbol de decisión con los 3 atributos se implementó un algoritmo basado en condicionales para evaluar las características de $feat_i$ en el orden en el que se encuentran los atributos hasta encontrar la clase a la que pertenecen. Este algoritmo se define de la siguiente forma:

Si $feat_i$ es menor a 6.15
Establecer la clase a la que pertenece $feat_i$ como “Derecha”;
Si no, si $feat_i$ es menor a 6.8
Establecer la clase a la que pertenece $feat_i$ como “Izquierda”;
Si no, si $feat_i$ es menor a 7.6
Establecer la clase a la que pertenece $feat_i$ como “Abajo”;
Si no, si $feat_i$ es igual o mayor a 7.6
Establecer la clase a la que pertenece $feat_i$ como “Arriba”;

2.4.2 Clasificador SVM

En este caso, se generó un SVM para definir un conjunto de funciones discriminantes lineales (FDL) que definan un clasificador multiclase. Cada FDL separa un espacio geométrico de características en 2 clases mediante un hiperplano que generalmente es $H(feat_i)=0$. En este trabajo fue utilizada una función de Matlab® para generar un conjunto de FDL para los casos multiclases. Esta función pide como parámetros de entrada las características $feat_i$ y también la clase a la que pertenecen. Por defecto la función regresa un clasificador SVM lineal del tipo uno contra uno; este tipo quiere decir que se crea una FDL por cada par de clases. El número de FDL se define de la siguiente forma:

$$n_{FDL} = n_c(n_c - 1) / 2 \quad (11)$$

donde n_c es el número de clases, así que para manejar 4 clases son necesarios 6 FDL. Con las 6 FDL creadas con la función *fitecoc()* se procede a generar las ecuaciones que los definen. De manera general la ecuación de una FDL es la siguiente:

$$H_l(f_{caract}) = \beta_{0l}f_{i0l} + \beta_{02}f_{i02} + b, \quad l=1,...,6 \quad (12)$$

donde β_{01} y β_{02} son los pesos para formar la pendiente del hiperplano, b el *offset* del hiperplano y l un índice por FDL. A continuación se muestran las ecuaciones de cada FDL.

$$\begin{aligned}
H_1(f_{caract}) &= -1.6917f_{io1} - 1.6417f_{io2} + 20.5 \\
H_2(f_{caract}) &= -0.55f_{io1} - 1.25f_{io2} + 11.5612 \\
H_3(f_{caract}) &= -0.1865f_{io1} - 0.8912f_{io2} + 7.3492 \\
H_4(f_{caract}) &= -1.1036f_{io1} - 1.7536f_{io2} + 19.4286 \\
H_5(f_{caract}) &= 4.5861 \cdot 10^{-4}f_{io1} - 1.2505f_{io2} + 9.0628 \\
H_6(f_{caract}) &= 2.924 \cdot 10^{-4}f_{io1} - 2.2219f_{io2} + 16.8846
\end{aligned} \tag{13}$$

Los hiperplanos son válidos para las señales en cualquier ventana de tiempo: 20, 10 y 5s. Para mostrar los hiperplanos de cada FDL se iguala a cero la ecuación y se toma F_{io1} para el eje horizontal y F_{io2} para el eje vertical. En la Figura 5 se puede observar cada uno de los hiperplanos, teniendo a la izquierda el nombre del FDL al que corresponde cada uno.

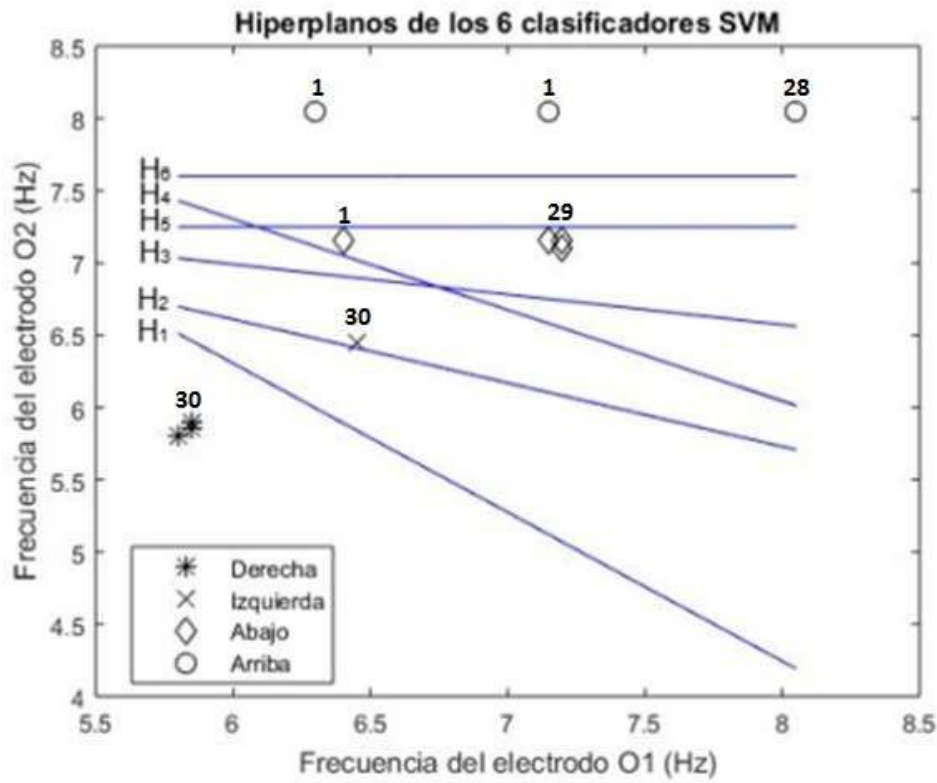


Figura 5. Hiperplanos de los 6 clasificadores SVM.

2.5 Interpretación

El último paso en la creación de un sistema BCI es la interpretación que se le da a la señal clasificada dentro una aplicación. En este trabajo la aplicación consiste en un deletreador para personas que carecen de movilidad y de la

capacidad del habla. Para el deletreador se desarrollaron dos interfaces: una creada en Visual Studio usando el lenguaje de programación C# y otra en Matlab. La interfaz de C# es con la que interactúan directamente los sujetos de prueba; es la que se utiliza en la sesión para la toma de muestras, en la cual se generan los estímulos para evocar el SSVEP. La interfaz de Matlab es un formulario para indicar el modelo del clasificador que se va a usar y seleccionar las muestras que serán procesadas. Por ser un sistema BCI fuera de línea, esta interfaz se utiliza solo después de tomar las muestras. Ambas interfaces completan la aplicación. A continuación, se describe cada una de ellas.

2.5.1 Deletreador: interfaz gráfica para toma de muestras

La interfaz gráfica de usuario de Visual Studio fue programada en lenguaje C#. La frecuencia de parpadeo de los estímulos fue generada usando temporizadores para que cada estímulo tuviera su propia frecuencia y no se interfirieran unos con otros. Los temporizadores tienen los siguientes retardos: 117 milisegundos para la frecuencia de 8.57 Hz, 133 milisegundos para 7.5 Hz, 150 milisegundos para 6.6 Hz y 167 milisegundos para 6 Hz. En la Figura 6 se pueden ver los dameros que se encuentran en los 4 extremos de la pantalla y que mostrarán los estímulos a una frecuencia dada; el damero de la derecha tendrá una frecuencia de 6 Hz, el de la izquierda de 6.6 Hz, el de abajo 7.5 Hz y el de arriba 8.57 Hz.

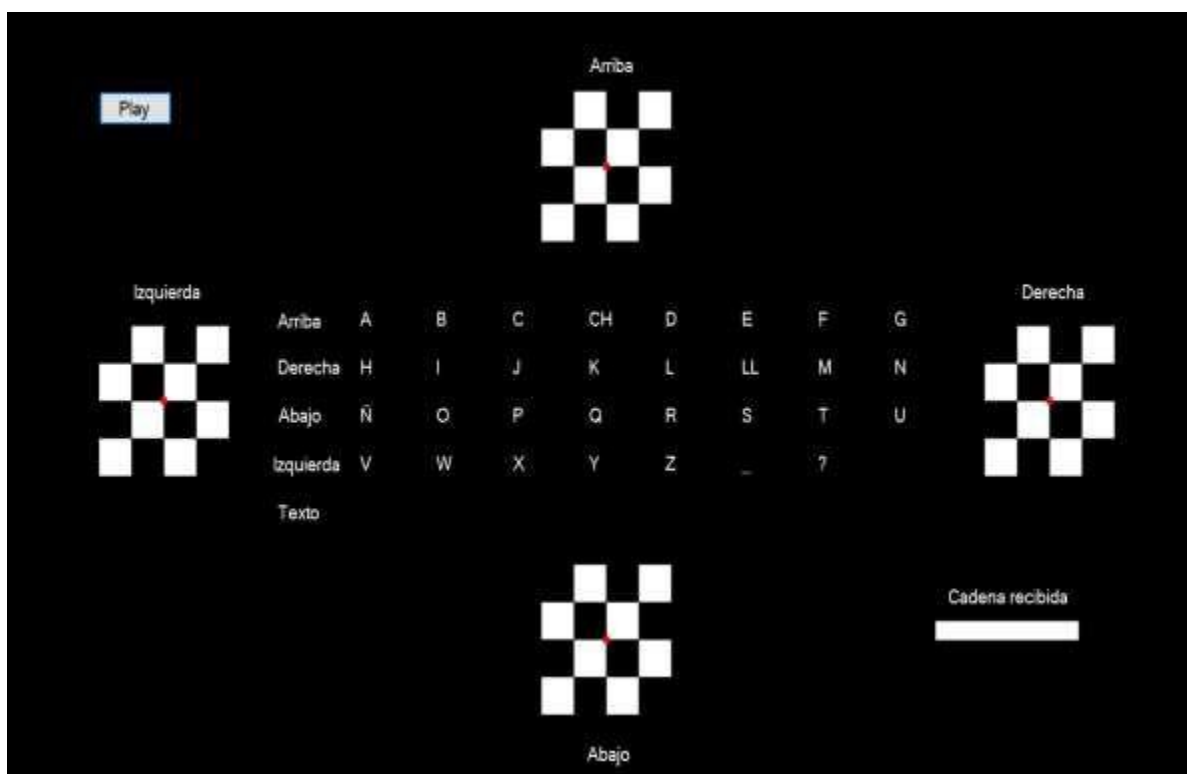


Figura 6. Interfaz gráfica para toma de muestras.

La interfaz maneja un componente para configurar un puerto serial con los mismos valores que en Matlab y que se muestran a continuación:

- Tasa de baudios de 9600
- Tamaño del paquete de datos de 8 bits
- Sin bit de paridad
- 1 bit de parada
- Sin control de flujo
- Se usa un puerto de comunicación diferente entre Matlab y Visual Studio

El abecedario que se encuentra en el centro de la pantalla se creó con el uso de una caja de texto en la cual se escribieron las letras con espacios horizontales de una tabulación y verticales de 2 renglones. De este abecedario es donde se van a escoger las letras para deletrear, siendo el último componente necesario para la creación del deletreador. El abecedario cuenta con 27 letras 2 dígrafos 2 símbolos y la opción de borrar, en total son 32 opciones a elegir las cuales están divididas en 4 renglones. Para escoger una letra se elige el renglón en donde se encuentra la opción, se observa el estímulo correspondiente que hace que desaparezcan los demás renglones y las letras del elegido se redistribuyen en los 4 renglones y así sucesivamente hasta elegir la letra en 3 iteraciones. El sujeto simplemente tiene que aprenderse estos pasos para poder comunicarse con el mundo exterior, siendo esto una alternativa para poder expresar sus necesidades.

2.5.2 Deletreador: interfaz de modelo de clasificador

Para la ejecución de la aplicación es necesario definir ciertos parámetros como: el tipo del clasificador a utilizar, la ventana de datos que se extraerá de una señal, el sensor del cual se extraerán las características en caso de usar ST. También por ser un sistema BCI fuera de línea se requiere ingresar la señal que va a ser procesada. También es útil poder visualizar la clasificación de la señal y su representación en la frecuencia. Todo lo mencionado anteriormente se encuentra dividido en 3 secciones en la interfaz de control en Matlab que se muestra en la Figura 7.



Figura 7. Interfaz gráfica de modelo de clasificador

La primera sección se llama *Opciones de clasificación* y tiene 3 menús de desplazamiento: *Tipo de modelo*, la cual da a escoger ST o SVM; *Ventana*, donde se define el tamaño de datos que se extraerán (20, 10 y 5 segundos); y *Sensor* para elegir los electrodos O_1 u O_2 . Este último solo se activa cuando se escoge el clasificador ST. La segunda sección se llama *Selección de la muestra* y se presiona el botón buscar para abrir un explorador donde se puede buscar el archivo de interés. La última sección se llama *Señales en la frecuencia* y se encuentra a la derecha de la interfaz. Allí se grafica $Y_p(k)$ a partir de los 2 Hz en adelante, lo cual es útil para distinguir de manera visual cual electrodo está teniendo mayor rendimiento en cuestión de la lectura de SSVEP y de esta manera, si se está usando el clasificador ST, poder escoger ese electrodo para el paso de predicción. En la parte abajo a la izquierda de la interfaz se tienen 3 componentes que dan información de la señal adquirida.

El nombre de la clase definida por el clasificador se envía a través de comunicación serial hacia el programa hecho en C#; se realizó de esta manera por ser la forma más sencilla de comunicar Matlab con Visual Studio. El programa en C# solamente requiere el nombre de la clase para manejar el comportamiento del deletreador.

3. RESULTADOS

3.1 Desempeño de los clasificadores

Para conocer el desempeño de los clasificadores se obtuvieron las tasas de acierto como en (Friman, Volosyak, & Gräser, 2007), para cada uno de los sujetos con los 3 tamaños de ventanas; posteriormente estas tasas serán desglosadas en matrices de confusión. En el caso del sujeto de prueba se obtuvo únicamente el desempeño para las ventanas de 10 y 5 segundos puesto que las señales de 20 segundos fueron utilizadas para el desarrollo de los clasificadores.

En la Tabla 3 están los resultados del sujeto 1. Se escribe “NA” en la columna de los 20 segundos porque estas fueron las muestras con las que se desarrollaron los clasificadores. Como análisis de los resultados se puede decir que la clasificación de las características del electrodo O2 con el clasificador ST tuvo mejor desempeño que con el electrodo O1, llegando alcanzar hasta un 89.17% de acierto en un tamaño de señal de 10 segundos, por lo cual éste es el que se usa en la ejecución de la aplicación. El clasificador SVM tuvo porcentajes más altos que el ST para el electrodo O1 pero menor que el de O2.

Tabla 3. Porcentajes de acierto del sujeto 1.

Clasificador	Porcentaje de acierto según tamaño de la muestra		
	20 segundos	10 segundos	5 segundos
Simple Tree O1	NA	84.17%	77.50%
Simple Tree O2	NA	89.17%	82.50%
Support Vector Machine	NA	85.83%	78.33%

En la Tabla 4 están las tasas de acierto del sujeto 2, las tasas de acierto entre la clasificación con ST para O1 y O2 son iguales a los 20 segundos, pero para las demás ventanas se obtuvo mejor resultado para las f_{o2} . En esta tabla se observa que solo la tasa de acierto del clasificador SVM presentó un desempeño similar que el O2 excepto en la ventana de 5 segundos, en la cual el desempeño fue menor.

Tabla 4. Porcentajes de acierto del sujeto 2

Clasificador	Porcentaje de acierto según tamaño de la muestra		
	20 segundos	10 segundos	5 segundos
Simple Tree O1	90.83%	70.00%	54.17%
Simple Tree O2	90.83%	77.50%	70.00%
Support Vector Machine	90.83%	77.50%	63.33%

En la Tabla 5 se tienen los porcentajes de acierto del sujeto número 3, que son los más altos comparándolos con los resultados de los sujetos 1, 2 y 4 (tablas 2, 3 y 5), esta tabla muestra porcentajes hasta de 94.16% de acierto en tamaños de muestra de 5 segundos en el electrodo O1, este porcentaje hace viable utilizar este tamaño de señales dentro de la aplicación.

Tabla 5. Porcentajes de acierto del sujeto 3

Clasificador	Porcentaje de acierto según tamaño de la muestra		
	20 segundos	10 segundos	5 segundos
Simple Tree O1	99.17%	97.50%	94.17%
Simple Tree O2	97.50%	90.00%	75.83%
Support Vector Machine	97.50%	90.83%	76.67%

En la Tabla 6 están los porcentajes del sujeto número 4. En este sujeto la diferencia de porcentajes entre la clasificación con ST de ambos electrodos es más del 25%, por lo cual si se pretende utilizar uno de los 2 electrodos, el O1 es la mejor opción. Las tasas del clasificador SVM son casi igual de bajas que el del ST O2 por lo cual en este caso solo es viable utilizar ST para el electrodo O1.

Tabla 6. Porcentajes de acierto del sujeto 4

Clasificador	Porcentaje de acierto según tamaño de la muestra		
	20 segundos	10 segundos	5 segundos
Simple Tree O1	96.67%	86.67%	75.83%
Simple Tree O2	72.50%	58.33%	41.67%
Support Vector Machine	75.83%	59.17%	45.83%

De acuerdo a los resultados registrados, el porcentaje promedio de acierto del ST para una señal de 10 s fue de 84.58% para el canal O1 y un 78.75% para el O2; mientras que el del SVM fue 78.33%.

3.2 Confusión de clases

Para analizar la forma en que se distribuye el error en la clasificación de las clases, se generaron matrices de confusión para conocer cómo se distribuye el error en la clasificación en cada sujeto. La Figura 8 muestra las matrices de confusión de los 4 sujetos de forma promediada. En las matrices de confusión de *simple tree* los porcentajes de clasificación son iguales o mayores a 74.4%,

mientras que en las matrices de SVM si hay tasas menores a 74.4%, en ambos casos no se llega al 100%.

a)					b)						
Simple Tree con tamaño de muestra de 5 segundos					SVM con tamaño de muestra de 5 segundos						
Clase real	Derecha	26.00 86.7%	1.00 3.3%	1.67 5.6%	1.33 4.4%	Clase real	Derecha	22.67 75.6%	3.33 11.1%	1.00 3.3%	3.00 10%
	Izquierda	2.00 6.7%	22.33 74.4%	2.33 7.8%	3.33 11.1%		Izquierda	2.33 7.8%	19.67 65.6%	1.67 5.6%	6.33 21.1%
	Abajo	2.00 6.7%	1.67 5.6%	25.00 83.3%	1.33 4.4%		Abajo	1.67 5.6%	7.33 24.4%	16.67 55.6%	4.33 14.4%
	Arriba	2.33 7.8%	2.67 8.9%	2.33 7.8%	22.67 75.6%		Arriba	3.00 10.0%	6.67 22.2%	5.00 16.7%	15.33 51.1%
		Derecha	Izquierda	Abajo	Arriba			Derecha	Izquierda	Abajo	Arriba
		Clase obtenida						Clase obtenida			

Simple Tree con tamaño de muestra de 10 segundos					SVM con tamaño de muestra de 10 segundos						
Clase real	Derecha	27.5 91.7%	1.75 5.8%	0.25 0.8%	0.5 1.7%	Clase real	Derecha	26 86.7%	2.75 9.2%	0.25 0.8%	1 3.3%
	Izquierda	1.5 5.0%	25 83.3%	1.75 5.8%	1.75 5.8%		Izquierda	2.5 8.3%	21.75 72.5%	2.5 8.3%	3.25 10.8%
	Abajo	1.5 5.0%	0.25 0.8%	26.25 87.5%	2 6.7%		Abajo	0.5 1.7%	5.5 18.3%	21.25 70.8%	2.75 9.2%
	Arriba	1.5 5.0%	1.5 5.0%	2.5 8.3%	24.5 81.7%		Arriba	1.25 4.2%	2.75 9.2%	3.25 10.8%	22.75 75.8%
		Derecha	Izquierda	Abajo	Arriba			Derecha	Izquierda	Abajo	Arriba
		Clase obtenida						Clase obtenida			

Simple Tree con tamaño de muestra de 20 segundos					SVM con tamaño de muestra de 20 segundos						
Clase real	Derecha	29.25 97.5%	0.25 0.8%	0 0%	0.5 1.7%	Clase real	Derecha	28 93.3%	1 3.3%	0 0%	1 3.3%
	Izquierda	0.25 0.8%	29 96.7%	0 0%	0.75 2.5%		Izquierda	0.5 1.7%	28 93.3%	0 0%	1.5 5.0%
	Abajo	1 3.3%	0 0%	27.5 91.7%	1.5 5.0%		Abajo	0.75 2.5%	2 6.7%	24.75 82.5%	2.5 8.3%
	Arriba	1.5 5.0%	0.25 0.8%	1.25 4.2%	27 90.0%		Arriba	0.75 2.5%	2.75 9.2%	2.25 7.5%	24.25 80.8%
		Derecha	Izquierda	Abajo	Arriba			Derecha	Izquierda	Abajo	Arriba
		Clase obtenida						Clase obtenida			

Figura 8. Promedio de las matrices de confusión de los 4 sujetos a) ST b) SVM.

Para todos los sujetos y clasificadores, la clase *Arriba* obtuvo el mayor error y la clase *Derecha* el mayor acierto. Como era de esperarse, el tamaño de la señal afectó proporcionalmente la tasa de acierto de la clasificación, teniendo los mejores porcentajes en las señales de 20 segundos y los peores a los 5 segundos.

El desempeño entre sujetos fue diferente principalmente por el hecho de que no todos prestan el mismo nivel de atención durante la sesión, o porque el individuo puede encontrarse fatigado e incluso, el manejo de la diadema en cuestión de la posición e impedancia de los electrodos sobre el cráneo puede

afectar el experimento. Por estas razones no se puede esperar un desempeño igual entre todos los sujetos.

4. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados experimentales, los porcentajes de una correcta clasificación son más altos entre más grande sea el tamaño de la muestra ya que la probabilidad de que se genere un SSVEP aumenta. El tamaño de las muestras de 20 segundos tuvo un porcentaje de acierto bastante alto (de más del 90 % para el ST), sin embargo, este tamaño de señal es muy poco práctico para la creación de un sistema BCI porque mirar un estímulo por 20 segundos puede resultar muy lento y agotador para la mayoría de las personas, por lo cual se hicieron clasificadores también para tiempos de 10 y 5 segundos. En los tiempos de 10 segundos sí se tuvo un porcentaje aceptable, pero a los 5 segundos el error ya fue considerable. Un sistema BCI basado en SSVEP debe tener tamaños de muestra de máximo 5 segundos para que sea práctico.

Hablando de los clasificadores, un clasificador SVM tiene tasas de acierto mejores a la clasificación de *Simple Tree* del electrodo con menor desempeño, la ventaja del SVM radica en que no es necesario saber en cual electrodo se está generando un SSVEP con mayor amplitud, pero una vez se conozca este electrodo, es mejor utilizar el clasificador *Simple Tree* porque tiene un porcentaje de clasificación mayor que el SVM, esto se debe a que el SVM combina ambos electrodos por lo que el desempeño combinado de ambos electrodos se ve grandemente influenciado por el electrodo con peor desempeño.

Las muestras que fueron clasificadas erróneamente se debió a que no se generó un SSVEP, o si se generó, fue con una amplitud muy pequeña que no fue posible distinguir dentro de la señal de en el dominio de la frecuencia, por lo que al buscar la amplitud máxima dentro de la función, se escoge otra que no corresponde a una señal de SSVEP.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Tecnológico Nacional de México por el apoyo brindado para la realización de este trabajo bajo el proyecto 5684.16-P

REFERENCIAS

Abbasi, M. A., Gaume, A., Francis, N., Dreyfus, G., & Vialatte, F. B. (2015). Fast calibration of a thirteen-command BCI by simulating SSVEPs from trains of

transient VEPs - Towards time-domain SSVEP BCI paradigms. *Conferencia internacional de ingeniería neural*. Montpellier.

Bondre, C., & Kapgate, D. (2015). Steady State Visually Evoked Potentials Framework in Brain Computer Interface. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 3(1), 167-175.

Cheng, M., Gao, X., Gao, S., & Xu, D. (oct 2002). Design and Implementation of a Brain-Computer Interface With High Transfer Rates. *IEEE Transactions on biomedical engineering*, 49(10), 1181-1186.

Cotrina, A., Benevides, A. B., Castillo-Garcia, J., & Benevides, A. B. (julio 2017). A SSVEP-BCI Setup Based on Depth-of-Field. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 25(7), 1047-1057.

da Cruz, J. N., Wan, F., Wong, C. M., & Cao, T. (2015). Adaptive time-window length based on online performance measurement in SSVEP-based BCIs. *Neurocomputing*, 149, 93-99.

Ding, J., Sperling, G., & Srinivasan, R. (2006). Attentional modulation of SSVEP power depends on the network tagged by the flicker frequency. *Cerebral cortex*, 16(7), 1016-1029.

Friman, O., Volosyak, I., & Gräser, A. (2007). Multiple channel detection of steady-state visual evoked potentials for brain-computer interfaces. *IEEE transactions on bio-medical engineering*, 54.

Funase, A., Wakita, K., Ita, A., & Takumi, I. (2016). SSVEP by checkerboard related to grid size and board size. *Conferencia anual de la asociación del procesamiento de la información y señales*. Hong Kong.

Ji, H., Li, J., Lu, R., Gu, R., Cao, L., & Gong, X. (2016). EEG Classification for Hybrid Brain-Computer Interface Using a Tensor Based Multiclass Multimodal Analysis Scheme. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2016(1), 1-15.

Lee, C.-C., Chuang, C.-C., Yeng, C.-H., Chen, Y.-J., & Lin, B.-S. (Dic 2017). Noise Suppression by Minima Controlled Recursive Averaging for SSVEP-Based BCIs With Single Channel. *IEEE Signal processing letters*, 24(12), 1783-1787.

Lee, Y.-C., Lin, W.-C., Cherng, F.-Y., & Ko, L.-W. (2016). A Visual Attention Monitor Based on Steady-State Visual Evoked Potential. *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 24(3), 399-408.

Lim, J.-H., Lee, J.-H., Hwang, H.-J., Kim, D. H., & Im, C.-H. (2015). Development of a hybrid mental spelling system combining SSVEP-based brain-computer interface and webcam-based eye tracking. *Biomedical Signal Processing and Control*, 21(1), 99-104.

Maye, A., Zhang, D., & Engel, A. K. (julio 2017). Utilizing Retinotopic Mapping for a Multi-Target SSVEP BCI With a Single Flicker Frequency. *IEEE Transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 25(7), 1026-1036.

Mitchell, T. M. (1997). *Machine learning*. WCB/McGraw-Hill.

Nakanishi, M., Y. W., Hsu, S.-H., Wang, Y.-T., & Jung, T.-P. (sep 2017). Independent Component Analysis-Based Spatial Filtering Improves Template-Based SSVEP Detection. *Conferencia internacional anual en ingeniería en medicina y sociedad de biología*. Seogwipo.

Shyam Prasad, P. M., Swarnkar, R., Visnu Prasad, K. V., Radhakrishnan, M., Hashmi, M. F., & Keskar, A. G. (2017). SSVEP signal detection for BCI application. *Proceedings - 7th IEEE International Advanced Computing Conference, IACC 2017*, 590-595.

Tang, Z., Wang, Y., Dong, G., Pei, W., & Chen, H. (2017). Learning to control an SSVEP-based BCI speller in naïve subjects. *Conferencia internacional de ingeniería en medicina y sociedad de biología*. Seogwipo.

Trujillo, J. M., & Borrego, C. J. (1985). Potenciales Evocados Visuales. *Acta Médica Colombiana*, 10(3), 113-124.

Turnip, A., Suhendra, M. A., K, D. E., & Sihombing, P. (2017). Design of Extraction Method of SSVEP Brain Activity with IIR Chebyshev. *Conferencia internacional de instrumentación, control y automatización*. Yogyakarta.

Yin, E., Zhou, Z., Jiang, J., Yu, Y., & Hu, D. (junio 2015). A Dynamically Optimized SSVEP Brain–Computer Interface (BCI) Speller. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 62(6), 1447-1456.

Zhang, N., Yu, Y., Yin, E., & Zhou, Z. (2016). Performance of virtual stimulus motion based on the SSVEP-BCI. *IEEE International Symposium Computer, Consumer and Control*. Xian.

Zhanga, Y., Zhou, G., Jin, J., Wanga, X., & Cichockib, A. (2015). SSVEP recognition using common feature analysis in brain–computer nterface. *Journal of Neuroscience Methods*, 244(1), 8-15.

Zhao, J., Li, W., Mao, X., Hu, H., Niu, L., & Chen, G. (Junio 2017). Behavior-Based SSVEP Hierarchical Architecture for Telepresence Control of Humanoid Robot to Achieve Full-Body Movement. *IEEE Transactions on cognitive and developmental system*, 9(2), 197-209.

Zhao, X., Chu, Y., Han, J., & Zhang, Z. (julio 2016). SSVEP-Based Brain–Computer Interface Controlled Functional Electrical Stimulation System for Upper Extremity Rehabilitation. *IEEE Transactions on systems, man and cybernetics: systems*, 46(7), 947-956.

Notas Biográficas



Alma Delia Corral Sáenz recibió el título de Ingeniera en Sistemas Computacionales en Hardware de la Universidad Autónoma de Chihuahua en 1999 y el de Maestra en Ciencias en Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Chihuahua en 2003. Actualmente es profesora y coordinadora del Doctorado y la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el mismo Instituto, y participa en trabajos de investigación de las áreas de procesamiento de señales y visión por computadora.



Raúl Rangel González recibió el título de Ingeniero en Electrónica en 2017 del Instituto Tecnológico de Chihuahua y actualmente es estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica en el mismo Instituto, donde trabaja en proyectos relacionados al procesamiento y análisis de señales SSVEP en el laboratorio de Percepción Visual. Sus intereses de investigación incluyen procesamiento de señales EEG, visión por computadora, procesamiento de imágenes y video, percepción visual e inteligencia computacional.



Mario Ignacio Chacón Murguía recibió el título de Ingeniero Industrial en Electrónica y el de Maestro en Ciencias en Ingeniería Electrónica en 1982 y 1985 respectivamente del Instituto Tecnológico de Chihuahua, y el grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica de New Mexico State University EEUU en 1998. Actualmente es Profesor – Investigador en el Instituto Tecnológico de Chihuahua y director del laboratorio de Percepción Visual. Ha desarrollado 44 proyectos para varias compañías e instituciones. Cuenta con más de 175 publicaciones en revistas y congresos nacionales e internacionales, así como tres libros publicados. Ha dirigido 72 tesis de ingeniería, maestría y doctorado. Su investigación actual es sobre visión por computadora, y procesamiento de imágenes y señales utilizando inteligencia computacional. El Dr. Chacón es miembro Senior de la IEEE y miembro de las sociedades IEEE Computational Intelligence, IEEE Digital Signal Processing y miembro del SNI.



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

*Recibido 17 Sep 2018
Aceptado 27 Oct 2018*

ReCIBE, Año 8 No. 1, Mayo 2019

Los hexapuertos y la reflectometría, fundamentos y aplicaciones

The six port and reflectometry, fundamentals and applications

Gerardo Hernández Veliz¹
gera592hv@hotmail.com

Marco Antonio Gurrola Navarro¹
marco.gurrola@cucei.udg.mx

Carlos Alberto Bonilla Barragán¹
carlos.bonilla@red.cucei.udg.mx

José Martín Villegas González¹
jose.villegas@red.cucei.udg.mx

Agustín Santiago Medina Vázquez¹
agustin.medina@cucei.udg.mx

¹ Universidad de Guadalajara

Resumen: En este artículo se presenta el modelo matemático base de la reflectometría hexaportal. Con una intención didáctica, se explica brevemente la historia de la reflectometría hexaportal y enseguida se detallan a cabalidad todas sus ecuaciones fundamentales. Posteriormente se presentan algunas estructuras hexaportales muy utilizadas, se elige una y se analizan sus características. Se presentan algunas aplicaciones de las redes hexaportales y sus diversas aplicaciones actuales. Con base en el material investigado se confirma que la reflectometría es un área con gran potencial en múltiples aplicaciones actuales, incluyendo su aportación en la docencia de las microondas.

Palabras clave: Reflectometría hexaportal, redes hexaportales, medición de alta frecuencia.

Abstract: This paper presents the basic mathematical model of the hexaportal reflectometry. With a didactic intention, the history of the hexaportal reflectometry is briefly explained and then all its fundamental equations are fully detailed. Subsequently, some commonly used hexaportal structures are presented, one is chosen and its characteristics are analyzed. Some applications of the hexaportal networks and their diverse current applications are presented. Based on the material investigated, it is confirmed that reflectometry is an area with great potential in many current applications, including its contribution in the teaching of microwaves.

Keywords: Six-port reflectometer, *six-port networks*, high frequency measurement.

1. Introducción

Los requerimientos tecnológicos actuales para cubrir la gran demanda de comunicaciones electrónicas en el mundo han traído notorios cambios en los últimos años, y con ello, las frecuencias de transmisión requeridas cada día son más altas, dado que, a más mayor frecuencia, se obtiene un mayor ancho de banda en el canal de información. Desafortunadamente, al incrementar la frecuencia, por encima de los 300 MHz, se comienzan a presentar algunos fenómenos electromagnéticos que obligan a los circuitos a cumplir requisitos muy demandantes, tanto para el diseño como para la fabricación de sus componentes, lo que obliga a utilizar una teoría circuital diferente, en la cual no se puede realizar las simplificaciones de la teoría de circuitos clásica. A esta teoría se le conoce como teoría de circuitos de microondas.

La teoría de circuitos de microondas a diferencia de la teoría de circuitos convencional considera a las señales ya no como un nivel de voltaje o corriente, sino como, lo que realmente son, ondas viajeras que cambian sus valores con el tiempo y la distancia. Por lo cual, ahora las dimensiones físicas de los componentes deben ser consideradas, pues dentro del mismo componente se presentan cambios en la señal por el solo hecho de su dimensión, sin considerar el efecto ideal que se espera del elemento en cuestión.

Por lo antes mencionado, surge la necesidad de conocer las respuestas que presentarán elementos y circuitos al trabajar en altas frecuencias, a esto se le conoce como caracterización de parámetros de microondas. Por ello, surgen y se van desarrollando varias técnicas de medición, cada una con sus ventajas y desventajas, y entre ellas, la reflectometría hexaportal. Siendo ésta una técnica alternativa a la utilizada por la mayoría de equipos comerciales actuales (heterodinos).

La reflectometría hexaportal ideal para laboratorios universitarios de medición debido a que permite obtener una muy buena exactitud en las lecturas, posibilita el diseño y la construcción de los equipos de medición con base a los requerimientos del grupo de una investigación porque se dispone de los modelos matemáticos para su desarrollo, a diferencia de los equipos comerciales, que ocultan sus procedimientos. Otra ventaja de los equipos hexaportales es su menor costo que los vuelve asequibles a instituciones educativas y laboratorios de investigación con bajos recursos.

2. Historia y desarrollo de la reflectometría

Las técnicas de medición para circuitos de microondas tuvieron su inicio en los años cuarentas durante la segunda guerra mundial, principalmente en el laboratorio de radiación del Instituto Tecnológico de *Massachusetts* (M.I.T. Por sus siglas en inglés) [1]. Las mediciones que se realizaban en un principio, fueron análogas a aquellas que se hacían con puentes de impedancia para mediciones en baja frecuencia, incluyendo algunas modificaciones a esos mismos equipos, para la medición de parámetros como la impedancia, las ondas estacionarias y la atenuación [2], [3]. No solo fueron pioneros en el desarrollo de éstas técnicas, también lo fueron en el desarrollo de las guías de onda, las líneas ranuradas y las líneas de transmisión de cable coaxial.

Los parámetros de impedancia Z y admitancia Y , empleadas en bajas frecuencias utilizan niveles de voltajes y de corrientes, pero la obtención de estos valores a frecuencias de microondas se complica mucho, por ello, se desarrolló un nuevo tipo de parámetros conocidos como de dispersión o parámetros S . Estos parámetros emplean ondas de voltajes o de potencia para su obtención. En 1939, Phillip H. Smith un ingeniero que trabajaba en los laboratorios Bell introdujo una herramienta gráfica para la representación de estos parámetros en las líneas de transmisión, conocida como la carta de Smith [4]. Esta carta fue tan relevante en su época que durante la segunda guerra mundial, las mediciones de impedancia de redes de microondas se graficaban en carta de Smith. Incluso, años después, el mismo laboratorio de radiación publicó artículos de alta trascendencia acerca de la carta de Smith, como por ejemplo la monografía NBS #151 en 1976, escrita por el Dr. R. W. Beatty, un artículo con mucha información [5].

De entre las varias técnicas que existen para obtener los parámetros s en elementos de alta frecuencia se encuentra la técnica de línea ranurada, una técnica que se implementó antes de la segunda guerra mundial y en 1948 Allen escribió un documento describiendo un sistema automático con esta técnica [6]. Para los años cincuenta se desarrolló la técnica de medición con barrido de frecuencia, obteniendo mejoras en el ancho de banda por medio de osciladores de barrido contruidos con un Klystron que por medio de un motor que variaba la dimensión de la cavidad [7]. Fue en esa época el apogeo de la generación de sistemas automáticos de medición de fase, un sistema que trasladaba las características de la señal a frecuencias bajas [8]. Este sistema fue rápidamente adoptado por los investigadores y la industria, fue objeto de mucho estudio, como por ejemplo por Cohn y Weinhouse en 1964 [9]. Años después, la técnica fue mejorando hasta convertirse en los conocidos como analizadores de redes vectoriales heterodinos, al final de la década de los sesenta ya se podía realizar mediciones cercanas a los 40 GHz [10][11].

Actualmente estos equipos logran medir dispositivos activos y pasivos en frecuencias superiores a los 100 GHz.

Por otra parte, la técnica de reflectometría comenzó desde los años cuarenta, cuando Montgomery pudo obtener el coeficiente de reflexión por medio de la separación de las ondas incidentes y reflejadas en las líneas de transmisión, y para 1944 Julian presentaba el primer reflectómetro utilizando dos acopladores direccionales [12]. Unos años después, las técnicas de reflectometría se fueron formalizando, en específico, con las publicaciones de Engen y Beatty a finales de los años cincuenta [13]. Engen continuó su trabajo y logró aportaciones importantes en el área, en 1977 y en conjunto con los trabajos de Hoer, formalizaron las bases de la reflectometría, tanto con sus técnicas, experimentaciones y bases matemáticas [14].

En 1977 Engen demostró en una publicación [15], el porqué de no utilizar reflectómetros de menos de seis puertos, de ahí, que la reflectometría para el análisis de microondas adquiriera el nombre de reflectometría hexaportal. En ese mismo año, Hoer presentaba la teoría para el diseño de analizadores de redes empleando dos reflectómetros hexaportales [16]. Ambos, presentaron varias técnicas de calibración para estos reflectómetros [17] [18]. Las investigaciones y aportaciones de Engen y Hoer fueron presentadas en el congreso de la Sociedad de Microondas (*MTT Society*), de la *IEEE* en Junio de 1977, y sus aportes, actualmente son considerados pilares fundamentales de la reflectometría hexaportal.

En los ochenta no hubo grandes actualizaciones en el tema, no obstante, se realizaron publicaciones relacionadas con el análisis de la técnica, simplificaciones matemáticas y nuevos diseños de las estructuras hexaportales, como por ejemplo, lo descrito en los trabajos de Riblet en 1981 [19], Dobrowolsky 1982 [20] y El-Deeb en 1983 [21]. Los años siguientes, durante y después de la década de los noventa, los trabajos se centraban principalmente en optimizar las técnicas de automatización con equipos digitales [22], la implementación de las redes hexaportales en otras aplicaciones fuera de las mediciones de parámetros de microondas [23] y en la difusión de la reflectometría hexaportal para la enseñanza y la Investigación [24].

3. Descripción de la reflectometría hexaportal: Modelo matemático

Un reflectómetro hexaportal es un equipo capaz de obtener el coeficiente de reflexión de un elemento conectado a uno de sus puertos. Se le llama hexaportal porque en su totalidad dispone de seis puertos, un puerto es

utilizado para inyectar la señal producida por un generador, cuatro puertos más se emplean en conjunto para obtener relaciones de potencias de la red y uno último para conectar al dispositivo bajo prueba o DBP, del que se interesa conocer su respuesta en alta frecuencia. Todos estos puertos forman la red hexaportal, que está formada por una serie de dispositivos exclusivamente diseñados para operar correctamente a la frecuencia a la que se desea medir. Las relaciones de potencia obtenidas en los puertos de lectura están directamente relacionadas con las señales incidente y reflejada en el puerto de medición. De la manera en que interaccionan sus dispositivos componentes y del tipo de éstos, dependerá el modelo matemático a obtener.

El modelo matemático que describe a un reflectómetro hexaportal parte de un modelo generalizado de n puertos, que se desarrolla para seis puertos. Ya que, con menos de seis puertos no se puede conseguir una medición vectorial directa, es decir, el coeficiente de reflexión con magnitud y ángulo, tal como lo demostró Engen en su publicación "*The Six-Port Reflectometer: An Alternative Network Analyzer*" en 1977 [15]. El siguiente desarrollo está basado en un documento que describe de manera más amplia la reflectometría en general [24].

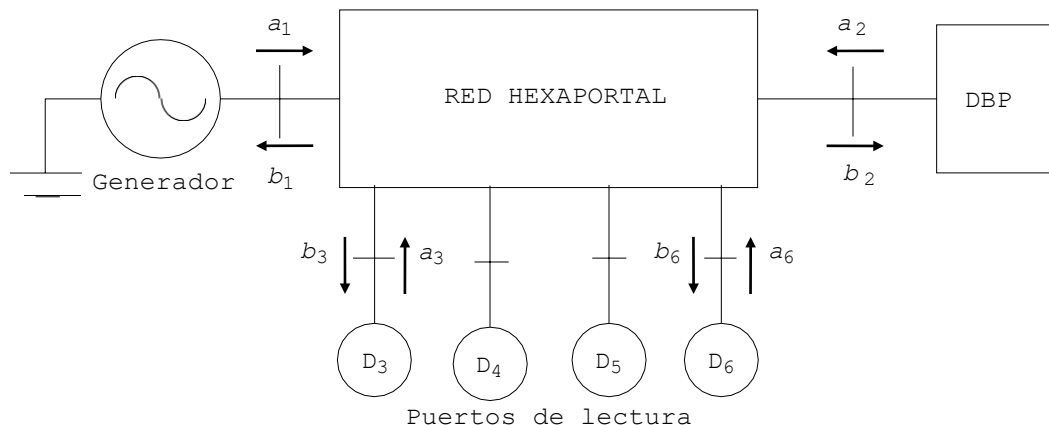


Figura 1. Presenta el arreglo básico de un reflectómetro hexaportal, donde se aprecian los seis puertos de la red hexaportal, un puerto conectado al generador, un segundo al dispositivo bajo prueba y los cuatro restantes conectados a los diodos detectores de potencia.

En la Fig. 1 se muestra la estructura de un reflectómetro hexaportal, donde se aprecian el generador, los cuatro detectores de potencia D_j ; ($j = 3, 4, 5$ y 6) y el dispositivo bajo prueba DBP, todos ellos conectados a la red hexaportal que se toma como referencia del sistema. Se asigna como a_i ($i = 1, \dots, 6$), a las señales de potencia incidentes a los puertos de la red hexaportal, y

$b_i (i = 1, \dots, 6)$, para las señales de potencia reflejadas. Por lo tanto, la matriz de dispersión de la red queda de la siguiente manera:

$$\mathbf{b} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{a}, \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Donde s es la matriz de dispersión de la red hexaportal de tamaño 6x6, al desarrollar el producto matricial de (2) se obtienen unas ecuaciones de la forma:

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}a_3 + S_{14}a_4 + S_{15}a_5 + S_{16}a_6 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}a_3 + S_{24}a_4 + S_{25}a_5 + S_{26}a_6 \\ &\vdots \\ b_6 &= S_{61}a_1 + S_{62}a_2 + S_{63}a_3 + S_{64}a_4 + S_{65}a_5 + S_{66}a_6. \end{aligned} \quad (3)$$

Como en la red solo se puede sensar potencia en los puertos 3, 4, 5 y 6, correspondientes a los diodos detectores de potencia, el coeficiente de reflexión del Γ_{DBP} se obtiene de las relaciones de las potencias entre estos puertos. El coeficiente de reflexión en los diodos está dado por la expresión $\Gamma_j = a_j / b_j$; ($j = 3, 4, 5$ y 6), que se despeja para la señal incidente $a_j = \Gamma_j b_j$, que a su vez se utiliza para sustituirla en (3). Como los puertos donde se conectan los detectores de potencia son del 3 al 6, el sistema de ecuaciones resultante se divide en dos secciones, la primera es conformada por b_1 y b_2 (4a), y la segunda por b_3, b_4, b_5 y b_6 . En la segunda sección (4b), donde se encuentran los puertos de lectura, se despejan las cuatro ecuaciones para igualarlas a cero.

$$\begin{aligned} b_1 &= S_{11}a_1 + S_{12}a_2 + S_{13}\Gamma_3 b_3 + S_{14}\Gamma_4 b_4 + S_{15}\Gamma_5 b_5 + S_{16}\Gamma_6 b_6 \\ b_2 &= S_{21}a_1 + S_{22}a_2 + S_{23}\Gamma_3 b_3 + S_{24}\Gamma_4 b_4 + S_{25}\Gamma_5 b_5 + S_{26}\Gamma_6 b_6, \end{aligned} \quad (4a)$$

$$\begin{aligned} 0 &= S_{31}a_1 + S_{32}a_2 + (S_{33}\Gamma_3 - 1)b_3 + S_{34}\Gamma_4 b_4 + S_{35}\Gamma_5 b_5 + S_{36}\Gamma_6 b_6 \\ 0 &= S_{41}a_1 + S_{42}a_2 + S_{43}\Gamma_3 b_3 + (S_{44}\Gamma_4 - 1)b_4 + S_{45}\Gamma_5 b_5 + S_{46}\Gamma_6 b_6 \\ 0 &= S_{51}a_1 + S_{52}a_2 + S_{53}\Gamma_3 b_3 + S_{54}\Gamma_4 b_4 + (S_{55}\Gamma_5 - 1)b_5 + S_{56}\Gamma_6 b_6 \\ 0 &= S_{61}a_1 + S_{62}a_2 + S_{63}\Gamma_3 b_3 + S_{64}\Gamma_4 b_4 + S_{65}\Gamma_5 b_5 + (S_{66}\Gamma_6 - 1)b_6. \end{aligned} \quad (4b)$$

Las primeras dos ecuaciones se expresan mediante la ecuación (5):

$$b_i = S_{i1}a_1 + S_{i2}a_2 + \sum_{j=3}^6 S_{ij}\Gamma_j b_j, \quad \text{para } i = 1, 2 \text{ y } j = 3, 4, 5 \text{ y } 6. \quad (5)$$

Y las cuatro ecuaciones restantes están representadas por la ecuación (6):

$$0 = S_{i1}a_1 + S_{i2}a_2 + \sum_{\substack{j=3 \\ i \neq 0}}^6 S_{ij}\Gamma_j b_j + (S_{ii}\Gamma_i - 1)b_i, \text{ para } j = 3, 4, 5 \text{ y } 6. \quad (6)$$

El sistema (4) representa un sistema de 10 ecuaciones con 12 variables, cuya solución puede ser encontrada para cualesquiera 10 variables en función de las dos restantes, y se puede expresar de forma matricial, como

$$\mathbf{b}' = \mathbf{S}' \cdot \mathbf{a}', \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13}\Gamma_3 & S_{14}\Gamma_4 & S_{15}\Gamma_5 & S_{16}\Gamma_6 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23}\Gamma_3 & S_{24}\Gamma_4 & S_{25}\Gamma_5 & S_{26}\Gamma_6 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33}\Gamma_3 - 1 & S_{34}\Gamma_4 & S_{35}\Gamma_5 & S_{36}\Gamma_6 \\ S_{41} & S_{42} & S_{43}\Gamma_3 & S_{44}\Gamma_4 & S_{45}\Gamma_5 & S_{46}\Gamma_6 \\ S_{51} & S_{52} & S_{53}\Gamma_3 & S_{54}\Gamma_4 & S_{55}\Gamma_5 - 1 & S_{56}\Gamma_6 \\ S_{61} & S_{62} & S_{63}\Gamma_3 & S_{64}\Gamma_4 & S_{65}\Gamma_5 & S_{66}\Gamma_6 - 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Dado que la matriz $\mathbf{S}'$ es no singular, porque las ecuaciones son independientes, puede ser invertida y con esa inversión $\mathbf{V} = (\mathbf{S}')^{-1}$, entonces $\mathbf{a}' = \mathbf{V} \cdot \mathbf{b}'$. Como $\mathbf{b}'$ tiene cuatro de sus seis elementos con valor de cero, al realizar el producto matricial de $\mathbf{V} \cdot \mathbf{b}'$, una buena parte de sus resultados se hacen cero, simplificando el sistema de ecuaciones

$$\mathbf{a}' = \mathbf{V} \cdot \mathbf{b}', \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} & V_{14} & V_{15} & V_{16} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} & V_{24} & V_{25} & V_{26} \\ V_{31} & V_{32} & V_{33} & V_{34} & V_{35} & V_{36} \\ V_{41} & V_{42} & V_{43} & V_{44} & V_{45} & V_{46} \\ V_{51} & V_{52} & V_{53} & V_{54} & V_{55} & V_{56} \\ V_{61} & V_{62} & V_{63} & V_{64} & V_{65} & V_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

resultando:

$$a_i = V_{i1}b_1 + V_{i2}b_2, \text{ para } i = 1 \text{ y } 2, \quad (11)$$

$$b_i = V_{i1}b_1 + V_{i2}b_2; \text{ para } i = 3, 4, 5 \text{ y } 6. \quad (12)$$

Ahora, los valores de $\mathbf{a}'$ también se encuentran divididos en dos secciones, los primeros dos términos corresponden a $a_i = V_{i1}b_1 + V_{i2}b_2$; ($i = 1, 2$), y la segunda sección está dada por $b_i = V_{i1}b_1 + V_{i2}b_2$; ($i = 3, 4, 5 \text{ y } 6$). Debido a que el DBP se encuentra conectado al puerto 2, se requiere referenciar la lecturas de los

puertos de los diodos con respecto a este puerto, por ello, se despeja b_1 de a_2 y se sustituye en las demás ecuaciones. Con esto se consigue que las señales incidentes a los diodos b_j ; ($j = 3, 4, 5$ y 6), queden en función únicamente de las señales incidente y reflejada del puerto 2. Lo que nos permitirá posteriormente obtener el coeficiente de reflexión Γ_{DBP} .

$$a_2 = V_{21}b_1 + V_{22}b_2, \quad b_1 = \frac{a_2 - V_{22}b_2}{V_{21}}, \quad b_i = \frac{V_{i1}}{V_{21}}a_2 + \left(V_{i2} - \frac{V_{22}V_{i1}}{V_{21}}\right)b_2.$$

Para simplificar: $I_i = \frac{V_{i1}}{V_{21}}$ y $J_i = V_{i2} - \frac{V_{22}V_{i1}}{V_{21}}$, entonces:

$$b_i = I_i a_2 + J_i b_2, \text{ para } i = 3, 4, 5 \text{ y } 6. \quad (13)$$

Habiendo obtenido la expresión matemática para las señales que salen de la red hexaportal y entran en los diodos detectores, $b_i = I_i a_2 + J_i b_2$; ($i = 3, 4, 5$ y 6), en función de las señales incidente y reflejada en el DBP (b_2 y a_2), se renombran algunas variables y se realiza la sustitución de la onda incidente a_2 por su equivalencia de $\Gamma_2 b_2$. Esto con la finalidad de poder obtener el coeficiente de reflexión del DBP, utilizando la nomenclatura empleada por Engen [15], estos desarrollos se presentan a continuación.

$$b_3 = I_3 a_2 + J_3 b_2 = A a_2 + B b_2 = A b_2 \left(\Gamma_2 + \frac{B}{A} \right), \quad (14)$$

$$b_5 = I_5 a_2 + J_5 b_2 = E a_2 + F b_2 = E b_2 \left(\Gamma_2 + \frac{F}{E} \right), \quad (15)$$

$$b_6 = I_6 a_2 + J_6 b_2 = G a_2 + H b_2 = G b_2 \left(\Gamma_2 + \frac{H}{G} \right), \quad (16)$$

$$b_4 = I_4 a_2 + J_4 b_2 = C a_2 + D b_2 = C b_2 \left(\Gamma_2 + \frac{D}{C} \right). \quad (17)$$

Las ecuaciones presentadas en (14-17) permiten obtener las relaciones funcionales entre los parámetros de potencia P leídos en los puertos de los diodos, y el coeficiente de reflexión Γ_{DBP} que es igual a Γ_2 , en el puerto de medición [25] [26] [27]. Asimismo, para la medición de impedancia en tiempo real [28] y para la calibración con un número diferente de parámetros intermedios [29]. Estas relaciones funcionales entre P y Γ para la síntesis de las estructuras hexaportales y para la medición del coeficiente de reflexión son:

$$\bar{P}_k = \left| \frac{I_k a_2 + J_k b_2}{C a_2 + D b_2} \right| = \left| \frac{I_k \Gamma_2 + J_k}{C \Gamma_2 + D} \right|, \text{ para } k = 3, 4, 5 \text{ y } 6. \quad (18)$$

La expresión (18) resulta de combinar los valores absolutos de (13) y (17), la relación entre las diferentes lecturas de potencia y Γ_2 se expresa mediante transformación bilineal. Las señales a y b son raíces cuadradas de potencia de la forma $\bar{P}_K = (P_K/P_4)^{1/2} = \sqrt{P_K/P_4}$; ($k = 3, 5$ y 6) y se dividen sobre P_4 que es la referencia. Asimismo, de (14-17), las respuestas de potencia en los puertos 3, 5 y 6 forman el sistema de ecuaciones siguiente

$$P_3 = |b_3|^2 = |Aa_2 + Bb_2|^2 = |A|^2 |b_2|^2 |\Gamma_2 - q_3|^2, \quad (19)$$

$$P_5 = |b_5|^2 = |Ea_2 + Fb_2|^2 = |E|^2 |b_2|^2 |\Gamma_2 - q_5|^2, \quad (20)$$

$$P_6 = |b_6|^2 = |Ga_2 + Hb_2|^2 = |G|^2 |b_2|^2 |\Gamma_2 - q_6|^2 \quad (21)$$

La solución de este sistema para Γ_2 , representa un problema de geometría tridimensional que puede ser resuelto en forma más conveniente en dos dimensiones. Así, si en la ecuación de la potencia en el puerto 4 dada por

$$P_4 = |b_4|^2 = |Ca_2 + Db_2|^2 \quad (22)$$

Se introduce una aproximación considerando a la constante c igual a cero y luego se dividen (19-21) entre ésta, se obtiene en términos de mediciones de potencia relativa, el sistema en dos dimensiones (plano complejo) de tres ecuaciones dado por

$$\frac{P_3}{P_4} = \frac{|b_3|^2}{|b_4|^2} = \frac{|Aa_2 + Bb_2|^2}{|Db_2|^2} = \frac{|A|^2}{|D|^2} |\Gamma_2 - q_3|^2, \quad (23)$$

$$\frac{P_5}{P_4} = \frac{|b_5|^2}{|b_4|^2} = \frac{|Ea_2 + Fb_2|^2}{|Db_2|^2} = \frac{|E|^2}{|D|^2} |\Gamma_2 - q_5|^2, \quad (24)$$

$$\frac{P_6}{P_4} = \frac{|b_6|^2}{|b_4|^2} = \frac{|Ga_2 + Hb_2|^2}{|Db_2|^2} = \frac{|G|^2}{|D|^2} |\Gamma_2 - q_6|^2. \quad (25)$$

Las ecuaciones (23-25) describen tres circunferencias en el plano complejo, cuyos centros están dados por q_3 , q_5 y q_6 . Los radios dependen de las constantes A, D, E y G . Siendo D la constante de proporcionalidad y P_3, P_4, P_5 y P_6 las lecturas de potencia leídas por los diodos. En su forma explícita las ecuaciones se escriben de la siguiente manera

$$|\Gamma_2 - q_3|^2 = \left| \frac{D}{A} \right|^2 \frac{P_3}{P_4}, \quad (26)$$

$$|\Gamma_2 - q_5|^2 = \left| \frac{D}{E} \right|^2 \frac{P_5}{P_4}, \quad (27)$$

$$|\Gamma_2 - q_6|^2 = \left| \frac{D}{G} \right|^2 \frac{P_6}{P_4}. \quad (28)$$

La solución de las tres ecuaciones es la intersección de las tres circunferencias, y se obtiene como resultado el coeficiente de reflexión del dispositivo bajo prueba $\Gamma_2 = \Gamma_{DBP}$. En la Fig. 2 se muestra la localización de Γ_{DBP} en el círculo unitario.

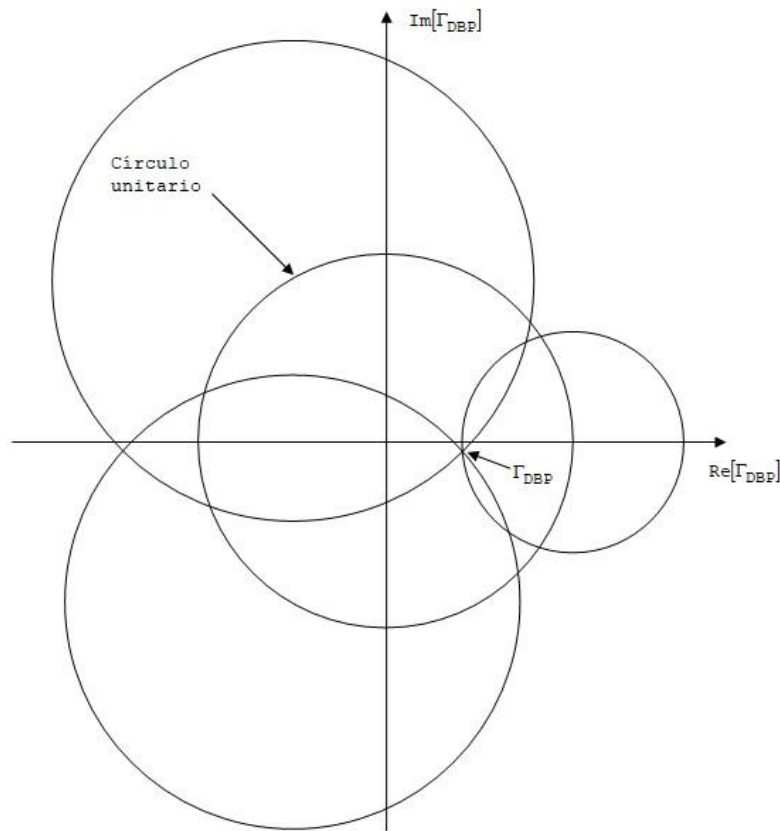


Figura 2. Grafico que presenta la localización de Γ_{DBP} en el círculo unitario, mediante la intersección de los tres círculos previamente obtenidos con el desarrollo matemático.

El proceso de medición implica entonces conocer las constantes del sistema ($A - H$ con $C = 0$), medir la potencia en los puertos 3, 4, 5 y 6, y determinar Γ_{DBP} por medio de la intersección de las circunferencias expresadas por (26-28).

4. Algunas estructuras hexaportales

Así como se fue desarrollando el concepto y las técnicas de la reflectometría hexaportal, a lo largo de los años, también, algunas juntas hexaportales simples y compuestas han sido propuestas. El diseño de la red hexaportal es muy importante, ya que de éste dependen los parámetros del reflectómetro, como por ejemplo, su ancho de banda y la distribución de los centros de los círculos en el plano. Las Figs. 3, 4 y 5 muestran algunas de estas estructuras [30].

La simbología empleada en las Figs. 3 a 4, y en la Tabla 1 es como sigue:

Q = HÍBRIDO DE CUADRATURA (90°)

Ø = DESFASADOR

H = HÍBRIDO DE 180°(DIVISOR DE POTENCIA)

D = DIVISOR DE POTENCIA EN FASE

C = ACOPLADOR DIRECCIONAL

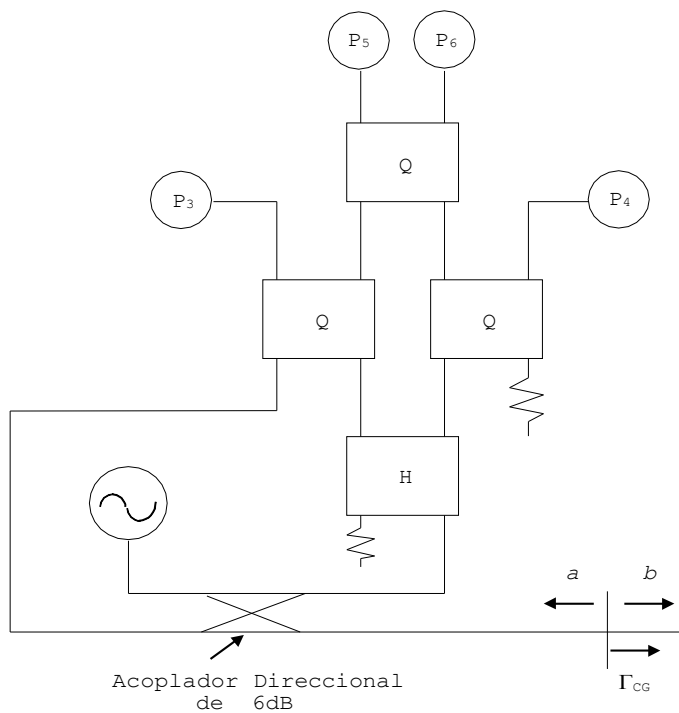


Figura 3. Red de una de las redes hexaportales propuesta por Engen, con tres acopladores híbridos de cuadratura y un acoplador de 180°.

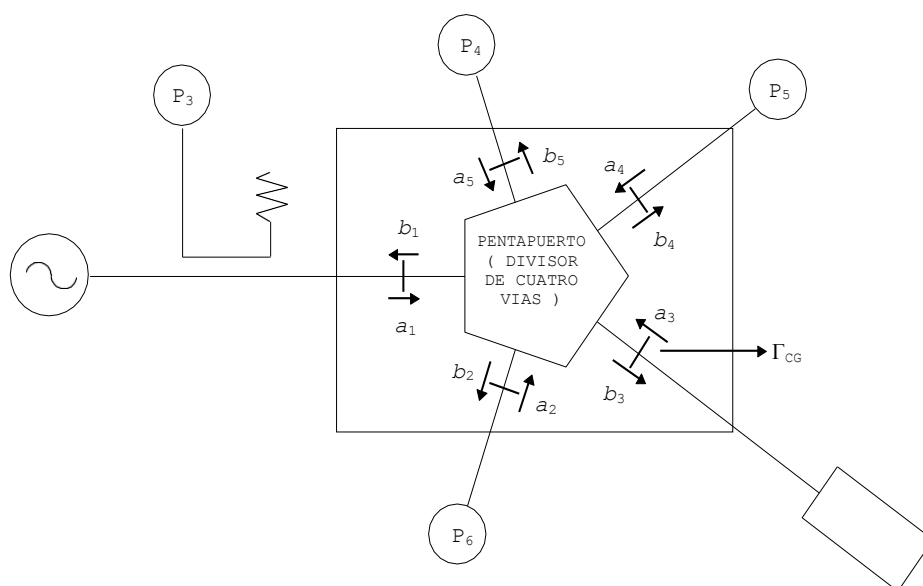


Figura 4. Otra red hexaportal propuesta por Riblet y Hansson, implementada con un pentapuerto de cuatro vías.

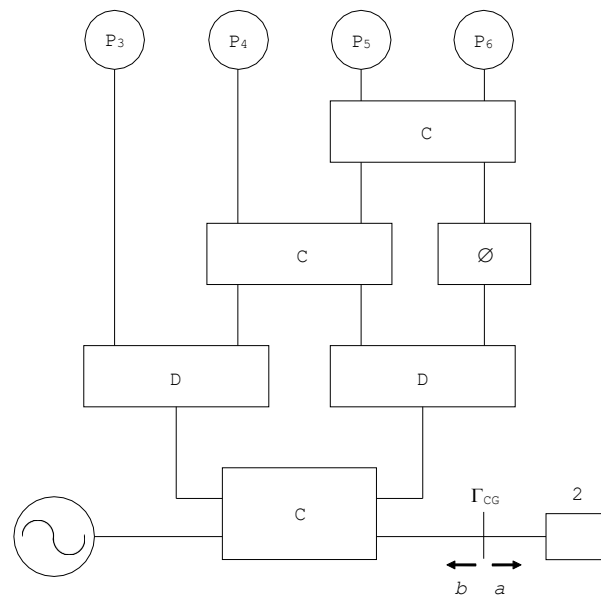


Figura 5. Red hexaportal propuesta por Li y Bosio, la cuál es constituida por tres acopladores direccionales, dos divisores de potencia en fase y un desfaseador.

La Tabla 1 proporciona los datos referentes a la distribución de los centros q en el plano $\Gamma_{CG} = \Gamma_2 = \Gamma_{DBP}$ y el ancho de banda útil de cada estructura.

Tabla 1. Comparativa de las estructuras hexaportales presentadas.

Figura	Distribución de los centros q en el plano Γ_{CG}	Ancho de banda útil	Referencias
3	No ideal	2-18 GHz	Engen [31] Chung [32]
4	Ideal	< a una octava	Riblet [19] Colef [33]
5	Ideal	2-8 GHz	Li [34]

Al momento de elegir una estructura hexaportal es importante tener en cuenta algunos aspectos, como por ejemplo, el número de componentes que ésta posee. Debido a que a más elementos en la red aumentan las pérdidas por inserción, aumenta la probabilidad de falla, su síntesis y construcción se complican. También, es importante cuidar la buena distribución de los centros q (preferentemente una distribución ideal) ya que de esto depende la exactitud del resultado de la medición.

Considerando lo descrito, la estructura de la Fig. 4 es la más apropiada para satisfacer todas estas necesidades. Esta estructura fue propuesta por Riblett y

Hansson [35] y consta de un cuatripuerto y un pentapuerto conectados como se muestra en la Fig. 6. Debido a que tiene pocos componentes, y a pesar de su poco ancho de banda, tiene una distribución de centros q equidistantes (ideal), lo que resulta muy bueno para disponer de una mejor medición.

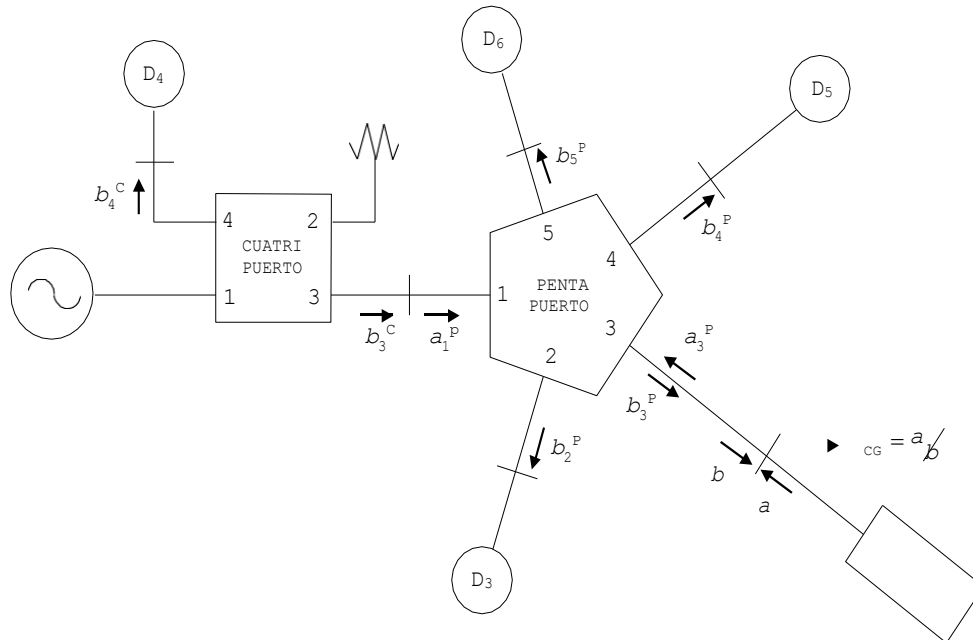


Figura 6. Red hexaportal elegida para su análisis, la cual está constituida por un cuatripuerto (acoplador híbrido de cuadratura de 90°) y un pentapuerto (separador de señal de cuatro vías).

El cuatripuerto es un acoplador direccional de 3 dB que realiza la función de separador de señal de dos vías. Divide la señal de potencia proveniente de la fuente en dos señales de magnitud igual, con una fase relativa de 90° entre sí [36]. En la Fig. 6 el cuatripuerto transfiere la señal hacia el puerto 1 del pentapuerto y hacia uno de los diodos detectores D_4 , conectado al puerto 4 del cuatripuerto.

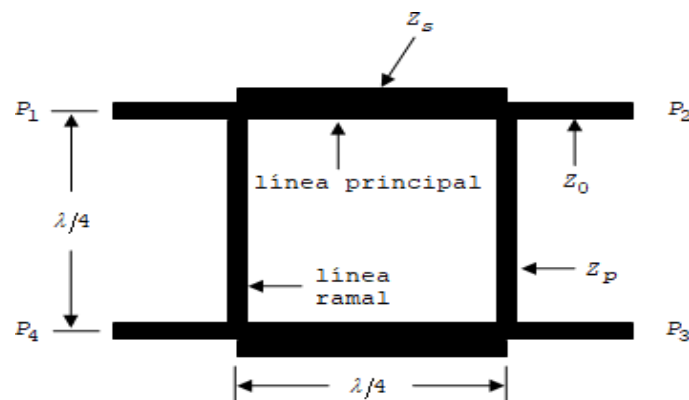


Figura 7. Aspecto físico de un cuatripuerto, la parte oscura corresponde a la forma física generalizada que presenta un cuatripuerto con estas características implementado en un circuito de microcinta.

Por su parte, el pentapuerto es un separador de señal de cuatro vías que divide la señal de la fuente en cuatro de igual magnitud y fases relativas de 0° y 120° , distribuyéndola hacia la carga DBP y los diodos detectores D_3 , D_5 y D_6 .

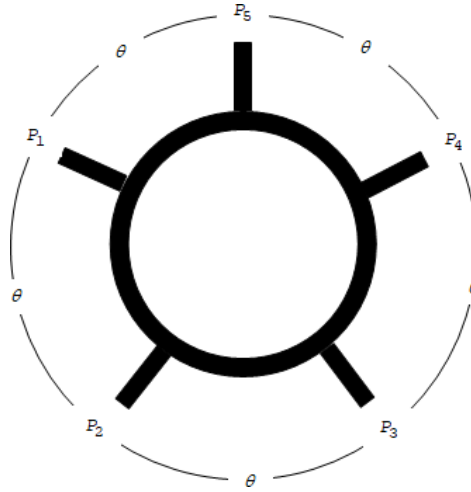


Figura 8. Aspecto físico de un pentapuerto, la parte oscura corresponde a la forma física generalizada que presenta un pentapuerto con las características de divisor de señal, implementado en un circuito de microcinta.

Si se suponen condiciones ideales para la red hexaportal descrita (Fig. 6), es decir, un acoplamiento perfecto en los puertos, del generador, de los diodos de potencia, de la terminación de 50Ω y de la intersección entre el cuatripuerto y el pentapuerto; los valores de las constantes complejas y por tanto, de sus centros q , se pueden encontrar de la siguiente manera. Considerando las matrices de dispersión del cuatripuerto (29) y del pentapuerto (30) [37]:

$$\begin{bmatrix} b_1^C \\ b_2^C \\ b_3^C \\ b_4^C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \delta & \varepsilon \\ 0 & 0 & \varepsilon & \delta \\ \delta & \varepsilon & 0 & 0 \\ \varepsilon & \delta & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^C \\ a_2^C \\ a_3^C \\ a_4^C \end{bmatrix}, \quad (29)$$

$$\begin{bmatrix} b_1^P \\ b_2^P \\ b_3^P \\ b_4^P \\ b_5^P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \tau & \mu & \mu & \tau \\ \tau & 0 & \tau & \mu & \mu \\ \mu & \tau & 0 & \tau & \mu \\ \mu & \mu & \tau & 0 & \tau \\ \tau & \mu & \mu & \tau & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1^P \\ a_2^P \\ a_3^P \\ a_4^P \\ a_5^P \end{bmatrix}, \quad (30)$$

Donde

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2}} D 180^\circ, \quad (31)$$

$$\varepsilon = \frac{1}{\sqrt{2}} D 270^\circ, \quad (32)$$

$$\mu = \frac{1}{2} D - 120^\circ, \quad (33)$$

$$\tau = \frac{1}{2} D 120^\circ. \quad (34)$$

Como se considera que los diodos detectores están perfectamente acoplados, entonces

$$a_4^C = a_2^P = a_4^P = a_5^P = 0 \quad (35)$$

Además, dado que se considera que la carga de 50Ω está perfectamente acoplada con el puerto número 2 del cuatripuerto, entonces

$$a_2^C = 0 \quad (36)$$

y asimismo por el acoplamiento perfecto (ideal) entre las dos estructuras, se tiene que

$$a_3^C = 0 \quad (37)$$

Se realizan despejes y sustituciones hasta obtener los valores de las constantes $A - H$.

$$A = \tau, \quad B = \frac{\tau}{\mu}, \quad C = 0, \quad D = \frac{\varepsilon}{\delta\mu},$$

$$E = \tau, \quad F = 1, \quad G = \mu, \quad H = \frac{\tau}{\mu}.$$

Finalmente, los valores para los centros q , finalmente los centros q se definen como

$$q_3 = -\frac{B}{A} = -\frac{1}{\mu} = \frac{1 \angle 180^\circ}{0.5 \angle -120^\circ} = 2 \angle 300^\circ, \quad (38)$$

$$q_5 = -\frac{F}{E} = -\frac{1}{\tau} = \frac{1 \angle 180^\circ}{0.5 \angle 120^\circ} = 2 \angle 60^\circ, \quad (39)$$

$$q_6 = -\frac{H}{G} = -\frac{\tau}{\mu^2} = \frac{0.5 \angle 300^\circ}{0.25 \angle -240^\circ} = 2 \angle 540^\circ = 2 \angle 180^\circ. \quad (40)$$

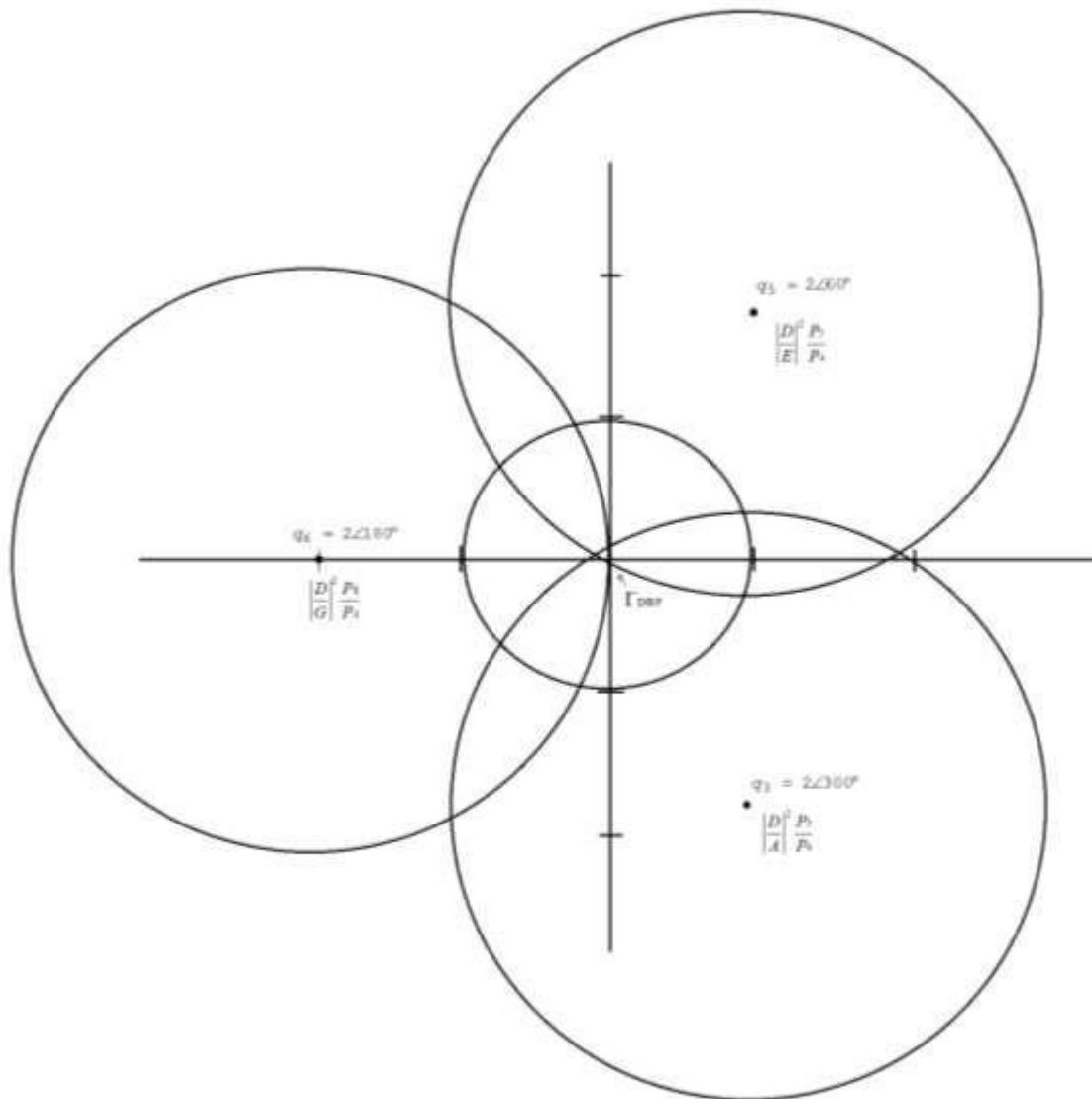


Figura 9. Ubicación de los centros q de la estructura hexaportal analizada, simulando una carga acoplada en el puerto de medición, lo que localiza al Γ_{DBP} en el centro del círculo unitario.

5. Aplicaciones de los hexapuertos y la reflectometría

Actualmente las estructuras hexaportales y el empleo de la reflectometría han crecido significativamente sus áreas de aplicación, se pueden encontrar aplicaciones de ellos en muy diversos campos tecnológicos. Se han propuesto mejoras a los elementos constitutivos de una red hexaportal, principalmente

buscando que estos elementos operen con un mayor ancho de banda, como los acopladores direccionales en cuadratura de 3 dB formados por un arreglo tándem de dos acopladores simétricos de -8.34 dB, como por ejemplo [38], en donde se diseña un híbrido de cuadratura de 3dB que opera desde 0.5-18 GHz. Estos acopladores direccionales de -8.34 dB se formaron con 41 secciones de acoplamiento.

Con el modelo matemático empleado para diseñar estos nuevos elementos se puede construir un reflectómetro basado en ellos, que puede operar a anchos de banda muy amplios, como es el caso [39], en donde se utilizan cinco acopladores direccionales en cuadratura para formar una red hexaportal basada en la propuesta por Engen, ver Fig. 3. En la cual el ancho de banda obtenido por este reflectómetro fue de 2-20 GHz. Una diferencia importante a resaltar es que los acopladores direccionales de -8.34 dB de este reflectómetro están constituidos por 400 secciones de acoplamiento. Este reflectómetro se utilizó para sustituir un VNA convencional (heterodino) empleado en un microscopio de microondas de campo cercano (*near-field microwave microscope*, NFMM, por sus siglas en inglés).

Otra aplicación muy útil de las redes hexaportales son las aplicaciones de radar, utilizando técnicas de interferometría para mejorar la medición de distancia, que se ha implementado en todo tipo de vehículos, como por ejemplo el utilizado en los emergentes sistemas de conducción autónoma a las frecuencias de (76-81 GHz). El reflectómetro permite una alta exactitud en la distancia medida mediante un equipo con un circuito sencillo y económico [40], [41].

También una área de gran crecimiento para las redes hexaportales es su utilización en sistemas transmisores y receptores de telefonía celular. Debido a que el modulador hexaportal demodula la información de la señal de microondas tanto en potencia como en fase con un bajo consumo de potencia y baja complejidad [42], [43], [44].

6. Conclusiones

Las últimas publicaciones acerca de los hexapuestos y sus componentes, nos demuestran que aún hay mucho por desarrollar en el área, tanto como en las nuevas técnicas de diseño de los componentes de la red hexaportal, como de las nuevas implementaciones en otras tecnologías. Cabe resaltar, que, así como los analizadores de redes hexaportales fueron una alternativa económica a los analizadores de redes heterodinios, actualmente siguen siendo una opción similar para las nuevas aplicaciones, como se ha presentado en algunos casos mediante el uso de las redes hexaportales empleadas en las técnicas de

interferometría, transceptores de microondas etc. Aunque se llegó a creer que obstáculos como el ancho de banda limitarían el desarrollo de los hexapuertos, las recientes publicaciones han demostrado que el ancho de banda se puede superar, en parte, con ayuda de sofisticados programas de simulación. Aunado a esto, no hay que olvidar el control total que se tiene sobre el diseño de las características de los hexapuertos, que permiten adecuar las características de las estructuras a las necesidades particulares del grupo de investigación, lo cual aportar un componente didáctico para el aprendizaje de las microondas. Con todo esto, se puede pensar que aún hay mucho por innovar en el área de las estructuras hexaportales y la reflectometría hexaportal.

Referencias

- [1] Montgomery, C. G. (1947) Technique of Microwave Measurement. *MIT Radiation Lab. Series*, vol. II. New York: McGraw-Hill.
- [2] Smith, P. H. (1939) Transmission-line calculator. *Electronics*, vol. 12, pp. 29-31, Jan.
- [3] Smith, P. H. (1944) An improved transmission-line calculator. *Electronics*, vol. 17-1, pp. 130-133, Jan.
- [4] Smith, P. H. (1939) Transmission-line calculator. *Electronics*, pp. 29-31, Jan.
- [5] Beatty, R. W. (1976) Automatic measurement of network parameters Asurvey. *NBS. Nomograph #151*, pp.44.
- [6] Allen, P. J. (1967) An automatic standing-wave indicator. *AZEE Trans.*, pp. 1299-1302.
- [7] Hunton, J. K. y Pappas, N. L. (1954) The H-P microwave reflectometers. *Hewlett-Packard J.*, vol. 6, Sept.-Oct.
- [8] Finnela, C. A., Roberts, L. A. y Susskind, C. (1960) Measurement of relative-phase shift at microwave frequencies. *IRE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-8, pp. 143-147, Mar.
- [9] Cohn, S. B. y Weinhouse, N. P. (1964) An automatic microwave phase-measurement system. *Microwave J.*, vol. 7, no. 2, pp. 49- 56, Feb.
- [10] Anderson, R. W. y Dennison, O. T. (1967) An advanced new network analyzer for sweep-measuring amplitude and phase from 0.1 to 12.4 GHz," *Hewlett-Packard J.*, vol. 18, no. 6, Feb.
- [11] Anderson, R. W. (1967) S-parameter techniques for faster, more accurate network design. *Hewlett-Packard J.*, vol. 18, no. 6, Feb.

- [12] Julian, R. S. (1944) A precision impedance comparator. *BTL MM-44-170-18*, Mar.
- [13] Engen, G. F. y Beatty, R. W. (1959) Microwave reflectometer techniques *IRE Trans. Microwave Theory Tech.* Vol. *MTT-7*, pp. 351-355, July
- [14] Engen, G.F. y C.A. Hoer. (1979) Thru-Reflect-Line, An improved technique for calibrating the dual six-port automatic network analyzer. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.* vol. *MTT-27*, no.12 pp. 987-993, Dec.
- [15] Engen, G.F. (1977) The six-port reflectometer : An alternative-network analyzer. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest IEEE Cat. 77CH1219-5MTT*, pp.44-45, 53-55, June.
- [16] Hoer, C.A. (1977) A network analyzer incorporating two six-port reflectometers. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. *MTT-25*, no.12 pp. 1070-1074, Dec.
- [17] Engen, G.F. (1978) Calibrating the six-port reflectometer by means of sliding terminations. *IEEE Trans.*, *MTT-26 no. 12* pp.951-957, Dec.
- [18] Engen, G.F. (1978) Calibration Theory for the six-port reflectometer. *NBS Tech. Note 1006*.
- [19] Riblet, G.P. y Hansson, E.R.B. The use of a matched symmetrical five-port junction to make six-port measurements. *MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, pp. 151-153 June.
- [20] Dobrowolsky, J.A. (1982) Improved six-port circuit for complex reflection coefficient measurements. *Electron. Lett.*, vol. 18 pp. 748-750, Aug.
- [21] El-Deeb, N.A. (1983) The calibration and performance of a microstrip six-port reflectometer *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. *MTT-31* pp. 509-514, July.
- [22] Hernández, S. (1998) Diseño e Implementación de una técnica de automatización para un reflectómetro hexaportal. *Tesis de Maestría. Maestría en Electrónica, Universidad de Guadalajara*.
- [23] Montreuil, J. y Nachman, M. (1991) Multiangle Method for Temperature Measurement of Biological Tissues by Microwave Radiometry. *IEEE*.
- [24] Dueñas, A., Ramos, J.L., Vega, G.A., Martínez, M.J., y Bonilla, C.A. (1996) Estudio Teórico-Conceptual del Proyecto de Investigación: Integración de un Analizador de Reflexión para la Enseñanza y la Investigación de la Electrónica en Altas Frecuencias. *Instituto Mexicano de Comunicaciones (IMC)*.

- [25] Riblet, G.P. (1976) The notion of an equivalent admittance for symmetrical non-reciprocal 3 port networks. *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems*, pp. 555-557.
- [26] Dueñas, A., Serrano, A. y Mendieta, F.J. (1992) On the synthesis of some ring junctions for six-port measurement applications. *Microwave and Optical Tech. Lett.*, vol. 5 pp. 559-563, Oct.
- [27] Kaliouby, L. y Bosisio, R.G. (1987) A new transformed Smith chart for real-time impedance measurement using the six-port concept. *IEEE Trans. on Instr. and Meas.*, vol. IM-36, pp. 493-495, June.
- [28] Engen, G. F. (1987) On-line accuracy assessment for the dual six-port ANA: Background and Theory. *IEEE Trans. Instr. And Meas.*, vol. IM-36, no. 2 pp. 501-506, June.
- [29] Yeo, S.P. y Ang, A.L. (1988) Alternative approach to the calibration of six-port reflectometers using four standards Technical memorandum. *IEE Proceedings*, vol. 135, Pt. H, no. 5 pp. 353-355, Oct.
- [30] Dueñas, A. (1992) La reflectometría de 6 puertos: Una opción para la enseñanza e investigación en hiper frecuencias. *IEEE MEXICON Int. Symp. Dig.*, pp. 3.37-3.44.
- [31] Engen, G.F. (1977) An improved circuit for implementing the six-port technique of microwave measurements. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-25, pp. 1080-1083, Dec.
- [32] Chung, N.S., Kim, J.H. y Shin, J. (1984) A dual six-port automatic network analyzer and its performance. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-32, pp.1683-1686, Dec.
- [33] Colef, B., Ettenberg, M. y Karmel, P.R. (1990) Performance of an integrated six-port reflectometer operated with pulsed signals. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 39 pp. 189-194, Feb.
- [34] Li, S.H. y Bosisio, R.G. (1983) Analysis and optimized circuit design of six-port reflectometers *Acta Electron. Sinica*, vol. 11, Mar.
- [35] Riblet, G.P. y Hansson, E.R.B. (1983) An ideal six-port network consisting of a matched reciprocal lossless five-port and a perfect direccional coupler. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. MTT-31, pp. 284-288, Mar.
- [36] Pozar, D. (2012) *Microwave Engineering*. Hoboken, NJ :Wiley.

- [37] Dueñas, A. (1997) A. Lumped and distributed element equivalent circuits for some symmetrical multiport signal separation structures. *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol.45, No.9, pp. 1537-1544., Sep.
- [38] Anselmi, M. (2014) *Design and Realization of 3 dB hybrid stripline coupler in 0.5 - 18.0 GHz. European Microwave Conference.*
- [39] Lin, T. (2017) *2-20 GHz Non-uniform Coupler For Six-port Reflectometer. IEEE, Univ. Lille, CNRS.*
- [40] Arab, H., Akyel, C. y Tatu, S. (2017) *Wide-band Milimetre Wave Down-converter Base don Six-port Circuit for Radar and Sensing Applications.*
- [41] Arab, H., Akyel, C. y Tatu, S. (2018) *Accurate FMCW Frequency Synthesis Using Six-port Interferometry". IEEE.*
- [42] Choi, I. (2017) *A Six Port Modulator based RF Transmission System: Application in an OFDM Enviromnment. IEEE ICC. Wireless Communications Symposiumk.*
- [43] Song, X. y Fan, Y. (2017) *Six-Port Direct Modulator With Carrier Suppression Technology for High-Speed High-Frequency Wireless Communications. IEEE, Microwave and Wireless Components Letters.*
- [44] Das, J. (2018) *Five Points Method of Calibration for Six-Port Receivers. 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP 2018), 9-11 Feb.*

Notas biográficas



Ing. Gerardo Hernández Veliz, obtuvo el grado de Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica en la Universidad de Guadalajara en el año 2016, actualmente cursa sus estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica y Computación en la Universidad de Guadalajara, sus áreas de interés son el diseño de dispositivos en microcinta en altas frecuencias y sistemas de comunicaciones.



Dr. Marco Antonio Gurrola Navarro, es Ingeniero en Comunicaciones y Electrónica por la Universidad de Guadalajara, en México en 1997, Maestro en Ciencias de la Tierra por la Universidad de Guadalajara en 2003, y Doctor en Ciencias en la especialidad de Electrónica por el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica, en México en 2009. Desde 2009, trabaja en

el Departamento de Electrónica del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara y sus intereses de investigación actuales son el diseño de circuitos aritméticos en VLSI, diseño de microprocesadores de aplicación específica, y diseño de módulos de IP para VLSI.



Dr. Carlos Alberto Bonilla Barragán, recibió su título de licenciatura en ingeniería en electrónica y comunicaciones en la Universidad de Guadalajara, (UdeG), Jalisco, México, en 1992, su título de maestría en ciencias en ingeniería electrónica en el 2005 en la misma Universidad y cursó sus estudios doctorales en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), obteniendo el grado en el año 2013. Desde 1994 se desarrolla como profesor en el departamento de electrónica de la Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México. Sus áreas de interés profesional incluyen el análisis y síntesis de redes de microondas, la instrumentación y medición en altas frecuencias y el modelado matemático en microondas con aplicación a la enseñanza.



Dr. José Martín Villegas González recibió el grado de Doctor en Ciencias en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Baja California (UABC), México. Ha estado en el Departamento de Ingeniería Electrónica y Computación en la Universidad de Guadalajara, México, desde 1994, donde es actualmente Profesor Titular. Sus áreas de interés incluyen la docencia en Ingeniería y el procesamiento de señales con aplicaciones en la caracterización de circuitos pasivos de microcinta.



Dr. Agustín Santiago Medina Vázquez, recibió la Licenciatura en Ingeniería de Comunicaciones y Electrónica de la Universidad de Campeche, México en 1999, la Maestría en Telecomunicaciones en 2003 en CINVESTAV Guadalajara y el Doctorado en Ciencias, con especialidad en Diseño de Circuitos Integrados en CINVESTAV Zacatenco en 2009. Desde 2009 trabaja en la Universidad de Guadalajara y sus intereses de investigación actuales son el diseño de circuitos integrados de señal mixta. Hoy en día, su proyecto principal se basa en el modelado y la implementación de circuitos integrados de muy baja potencia basados en el transistor de puerta flotante.



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

Diseño de una prótesis de mano para uso en teclados con interfaz sEMG.

Design of a hand prosthesis for use of keyboards with sEMG interface

Ernesto-Eduardo López-López

Facultad de Medicina

Universidad Autónoma del Estado de México, México

ernesto.lopez.lbm@outlook.com

Rigoberto Martínez-Méndez

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma del Estado de México, México

rigo@ieee.org

Adriana H. Vilchis González

Facultad de Ingeniería

Universidad Autónoma del Estado de México, México

avilchisg@uaemex.mx

Resumen:

Objetivos: En la actualidad existen diversas opciones de prótesis de mano, sin embargo, ninguna de ellas es adecuada para la utilización de teclados, debido a la lentitud o falta de movimientos adecuados. En este trabajo se plantea una prótesis de mano de bajo costo, controlada por señales electromiográficas, con diseño específico para el uso de teclados de computadora.

Metodología: Se analizaron los datos antropométricos de la población mexicana, los requerimientos de fuerza y las diferentes opciones de materiales, transmisión de movimientos y adquisición y análisis de señales EMG, para proponer una prótesis capaz de interactuar con teclados.

Resultados: Se presenta el diseño de una prótesis de mano para fabricarse por medio de impresión 3D, que cumple con las características de fuerza y velocidad necesarias como para mejorar la interfaz entre usuario y teclados de computadora.

Relevancia: Existen muchas prótesis, pero la mayoría son costosas y diseñadas para trabajos pesados o complejos que hacen a las prótesis lentas, pesadas y costosas. Aquí se presenta una opción para prótesis de mano de uso específico para el uso de teclados.

Palabras clave: Prótesis de mano, interfaz mioeléctrica, robótica.

Abstract:

Objectives: Nowadays there are several options of hand prostheses, however none of them is adequate for its use in keyboards, mainly due to their slow response and lack of necessary movements. This work describes the conceptual design of a low-cost hand prosthesis, controlled by electromyography signals and specialized for the use of keyboards.

Methodology: Anthropometric data of the Mexican and Latin-American population were analyzed as well as force requirements, materials available, movement transmission techniques, acquisition and analysis of electromyography signals, in order to propose a prosthesis design capable to interface with keyboards.

Results: Is presented a proposal of a hand prosthesis specialized for the use of keyboards. This prosthesis was designed to be developed using 3D printing technology. According with the design methodology, the prosthesis will be capable to comply with the force and speed necessary to improve the interface between amputee users and keyboards.

Relevance: There exists many hand prosthesis, but most of them are designed for complex or heavy tasks, making the prosthesis slow, heavy and expensive. In this work is presented the mechanical and electronic design of an alternative prosthesis specialized for use of keyboards. This prosthesis could improve the quality of life of people which need to use keyboards during their daily life activities.

Keywords: hand prosthesis, myoelectric interface, robotics.

1. Introducción

Se estima que a nivel mundial existen al menos 10 millones de personas amputadas de las cuales el 30 % son amputaciones de brazo y mano (3 millones) y 2.4 millones son personas viviendo en países en vías de desarrollo (Amputee Coalition, 2016; ISHN, 2014; LeBlanc, 2011). En México se realizan anualmente alrededor de 2300 amputaciones a nivel de muñeca y mano, de las cuales, el 85% son sufridas por hombres. Especialmente adultos entre 20 y 39 años (Secretaría del Trabajo y Previsión Social, 2010; Vazquez-Vela, 2015).

Por otro lado, si bien es cierto que existen opciones de prótesis para los pacientes amputados, éstas no son suficientes. Se estima que a nivel nacional, sólo se producen 1500 prótesis (incluyendo prótesis de piernas y brazos), esto solo alcanza a cubrir el 5.5% de los amputados anuales nacionales (Vazquez-Vela, 2015) y no existen datos sobre cuántas de estas prótesis son de mano.

La otra opción que tienen los pacientes amputados son las prótesis comerciales fabricadas por empresas privadas. Sin embargo éstas son demasiado costosas para el mexicano promedio. Una búsqueda del estado del arte, limitado sólo a prótesis de mano, con control mioeléctrico, ya que es la propuesta de este trabajo, arrojó los datos que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de prótesis de mano con control mioeléctrico.

Prótesis	Características	Costo MXN/ Disponibilidad
 I-Limb quantum (Touch Bionics, 2015)	- Rotación de muñeca de 360°. - Fuerza por actuador: 5 Kg. - Alimentación: 7.4 V - 36 movimientos. - Peso:1,590 g - 15 DOF - Diseño para gesto de pinza. Es capaz de interactuar con un <i>mouse</i>. - Solo responde a movimientos preprogramados	\$1,482,531 a \$2,965,062 (Importación)

 Michelangelo prosthetic hand (Ottobock, 2019)	- Flexión y rotación de muñeca en 360° - Cada actuador ejerce una fuerza de 5 Kg. - Alimentado con 11 V - 7 movimientos. - Peso: 668 g. - 16 DOF - Velocidad: 32.5 mm/s - Diseñado para realizar movimientos de apoyo para manipulación de objetos. - <i>Solo responde a movimientos preprogramados</i>	\$988,426 a \$2,965,062 (Importación)
 Bebionic 3 (Bebionic, 2012)	- Rotación de muñeca en 360° - Capaz de soportar 90 Kg. - 14 movimientos - Alimentado con 7.4 V - Peso: 628 g -14 DOF - Tiempo de apertura/cierre: 0.5 s - Diseño para gesto de pinza, es capaz de ser utilizado para interactuar con un <i>mouse</i>. - <i>Control mioeléctrico con movimientos programados.</i>	\$473,840 a \$671,776 (Importación)
 Luke Arm (Mobius Bionics, 2018)	- Cuenta con 10 movimientos programables, retroalimentación táctil. - Peso: 1,400 g - 14 DOF - Diseño para gesto de pinza fino, y control a través de sensores externos. - Control mioeléctrico y sensores de presión y movimiento.	\$1,919,310 (No disponible)
 Probionics (Probionics, 2015)	- Prótesis eléctricas, que utilizan el gesto de pinza. - Alimentado a 12 V. - 2 DOF - Diseño para gesto de pinza. - <i>Control mioeléctrico con movimientos programados.</i>	\$60,000 a \$180,000 (México)
 Youbionic arm (Youbionic, 2014)	- Brazo y mano impreso en 3D. - Se vende con actuadores que ejercen hasta 5 kg de fuerza. - Sin uso específico. - Control y tiempo de respuesta depende de la construcción.	\$2,445.65 (Importación)

 Azzurra Hand (Prensilia s.r.l, 2017)	- 10 articulaciones - Al ser diseñado para proyectos, la cantidad de movimientos, control, fuerza y peso total, dependen del desarrollador. - Peso: 640 g - Sin uso específico. - Control y tiempo de respuesta depende de la construcción.	No disponible.
 Hero Arm (Open bionics, 2018)	- En venta la prótesis como armazón. - Al ser diseñado para proyectos, la cantidad de movimientos, control, fuerza y peso total, dependen del desarrollador. - Peso: 150 g - Sin un uso específico, capaz de realizar gesto de pinza. - Control y tiempo de respuesta depende de la construcción.	\$2,942.70 (Importación)
 MyoArm (Perez-Rodriguez, 2017)	- Prótesis desarrollada mediante brazalete Myo, sin movimiento de muñeca. - Con actuadores que ejercen hasta 5 kg de fuerza. - Sin un uso específico, capaz de realizar gesto de pinza. - Control por redes neuronales. - Tiempo de respuesta 4-7 segundos. - <i>Control mioeléctrico con movimientos programados.</i>	\$10,000 No disponible
 CIMAV-CONACYT (CONACyT, 2018)	- Prótesis desarrollada mediante brazalete Myo, sin movimiento de muñeca. - Con actuadores que ejercen hasta 5 kg de fuerza. - Sin un uso específico, capaz de realizar gesto de pinza. - Control por redes neuronales. - Tiempo de respuesta 2-4 segundos. - <i>Control mioeléctrico</i>	\$10,000 No disponible

En la Tabla 1 se puede observar que la mayoría de las prótesis de mano disponibles tienen un alto costo, comparado con el ingreso promedio de los mexicanos, el cual ronda los 6 mil pesos mensuales (Vanguardia, 2018). Esto implicaría el salario íntegro de casi 10 meses para poder adquirir la prótesis comercial más económica (Probionics, 2015) y hasta 20 años para la prótesis

más avanzada. Otras prótesis que se han reportado en la literatura, son prototipos, que no se encuentran a la venta y la mayoría están en fase de desarrollo aún. Un análisis más completo de prótesis de brazo y mano con control, no necesariamente por EMG, enfocado en prótesis con fabricación usando impresión 3D, reporta costos de prótesis de 500 USD (Kate, Smit, & Breedveld, 2017).

Otra grave limitante es la lenta respuesta que la mayoría de las prótesis presentan en sus movimientos, especialmente aquellas que cuentan con muchos sensores o algoritmos complicados para la detección e interpretación de intención de movimiento. Por ejemplo, el prototipo diseñado por el Centro de Investigación en Materiales Avanzados, (CONACyT, 2018), utiliza 8 sensores de EMG y tarda casi medio segundo en reaccionar a los comandos y aún con algunos errores en la activación, como se puede observar en los videos publicados por los autores (https://www.youtube.com/watch?v=Euol7l_YRmU).

Otras prótesis, como la Bebionic (Bebionic, 2012), tarda hasta 0.5 s en cerrar o abrir la mano, lo que implica que son demasiado lentas como para activar las teclas si se deseara escribir en una computadora o jugar algún videojuego. En 2017 surgió la propuesta de una mano para tocar piano usando ultrasonido en lugar de EMG (Jason, 2017). Sí bien esta propuesta promete una mayor rapidez en la activación de los dedos protésicos, depende de un sistema de ultrasonido y equipo de cómputo externo para realizar el procesamiento de las señales. Lo anterior elimina toda portabilidad del sistema y aumenta su costo y complejidad impidiendo que se convierta en una alternativa viable a corto plazo para los usuarios comunes.

A la fecha no se ha reportado ninguna prótesis, ni comercial ni en fase de prototipo que esté diseñada para la interacción con teclados como la planteada en este documento. Los autores de este trabajo han considerado relevante diseñar y posteriormente desarrollar una prótesis de bajo costo para interactuar con teclados debido a que, ésta proporcionaría un mayor grado de autonomía al amputado. De esta manera el amputado podría, no solo realizar trabajos de oficina que requirieran el uso de computadoras, sino que también podría reducir su estrés jugando videojuegos o tocando instrumentos de teclas, como un piano, por ejemplo. En este trabajo se presenta el diseño de una prótesis de mano, por ahora limitada a pacientes con amputación de tipo desarticulación, lo que les permitiría conservar la funcionalidad de los músculos del antebrazo.

2. Metodología

A. Antropometría de la mano y parámetros de diseño

1. Antropometría de la mano

Con el fin de garantizar el tamaño adecuado de la prótesis y sus componentes para una población mexicana, se estudiaron las medidas antropométricas de la población (Chaurand, León, & Muñoz, 2007). Este estudio está basado en una población de 18 a 67 años de edad con datos de personas de la Ciudad de México y Guadalajara, todos ellos masculinos. La Tabla 2 muestra los valores promedio reportados y que servirán como base para el diseño de la prótesis.

Tabla 2. Medidas promedio de la población mexicana.
Realizada con datos de (Chaurand et al., 2007)

Parámetros	Valores reportados
Largo de la mano	181.41 mm
Longitud de la palma de mano*	103.51 mm
Anchura de la mano sin pulgar	82.55 mm
Anchura de la mano con pulgar	97.62 mm

Las dimensiones de las falanges se obtuvieron del trabajo publicado por investigadores de la UNAM (Hernández & Alvarez, 2017) y de (Binvignat, Almagià, Lizana, & Olave, 2012) quienes reportan las medidas de falanges obtenidas para mujeres y hombres de diferentes edades. Los valores reportados para hombres de entre 44 y 49 años de edad, mano izquierda, se presentan en la Tabla 3. Se eligieron estos valores ya que la prótesis, se plantea construir en primera instancia para un individuo de 48 años, masculino, de ocupación profesor de computación.

Tabla 3. Valores promedio y desviación estándar de longitudes de falanges de la mano adulta, con datos de (Binvignat et al., 2012).

	Longitudes de falanges [mm]		
	Falange Proximal	Falange Medial	Falange Distal
Meñique	37±10	23±5	20±3
Anular	45±11	30±6	23±3
Medio	57±13	37±8	26±2
Índice	50±11	32±7	25±3
pulgar	43±6	NA	32±4

2. Criterios de diseño

Considerando que la prótesis debe cumplir con las dimensiones adecuadas para poder activar las teclas de un teclado de computadora ordinario, se investigó la distancia entre teclas. Se consideraron los teclados de computadoras portátiles de 17" y 15" que son las más comunes. Se consideraron especialmente aquellas computadoras con capacidades para ejecutar juegos de video, por ejemplo la MSI dominator G, Lenovo Y700 o Dell Alienware R5, etc. También se consideraron teclados de computadoras de escritorio, para ello se tomaron en cuenta las medidas de teclados estándar avalados por CherryMX, una de las empresas más importantes a nivel mundial en la manufactura de teclados.



Figura 1. Dimensiones de separación entre teclas de ordenadores.

- a) distancia entre línea de teclas ASD y línea QWERTY, b) separación entre teclas A-D en su punto central, c) separación entre línea CVB y tecla Space, d) separación entre línea ASD y CVB.

Tomando en cuenta lo anterior, se determinó que se debe considerar una separación entre el centro de cada tecla con respecto a la tecla más cercana de 20 ± 1 mm tanto horizontal como verticalmente (ver Figura 1). Por lo tanto, el diámetro y longitud de los dedos podría ajustarse un poco considerando estas dimensiones y las tareas principales de la prótesis, jugar o escribir.

B. Diseño mecánico

La mano humana se puede modelar mecánicamente como un sistema de 20 a 26 grados de libertad (DOF, por sus siglas en inglés), (Jaworski & Karpiński, 2017), donde cada grado de libertad representa un tipo de movimiento de la articulación. Partiendo del trabajo realizado por (Cobos, Ferre, Sanchez Uran, Ortego, & Pena, 2008) y considerando el diseño más simple posible para la interfaz con el teclado, se consideraron articulaciones rotacionales de 1 DOF

para cada una de las falanges y toda la zona metacarpiana se consideró fija. Con base en lo anterior se determinó un modelo mecánico de 15 DOF, ver Figura 2. Donde L1, L2 y L3 representan las longitudes de las falanges de cada dedo, el resto de las medidas se fijaron como sigue: L4 = 103.51 mm, L5 = 93.51 mm, L6 = 83.51 mm, L7 = 43.50 mm, L8 = 32.75 mm, L9 = 24.66 mm, L10 = 31.94 mm, L11= 11.91 mm, L12= 9.34 mm, L13 =21.25 mm.

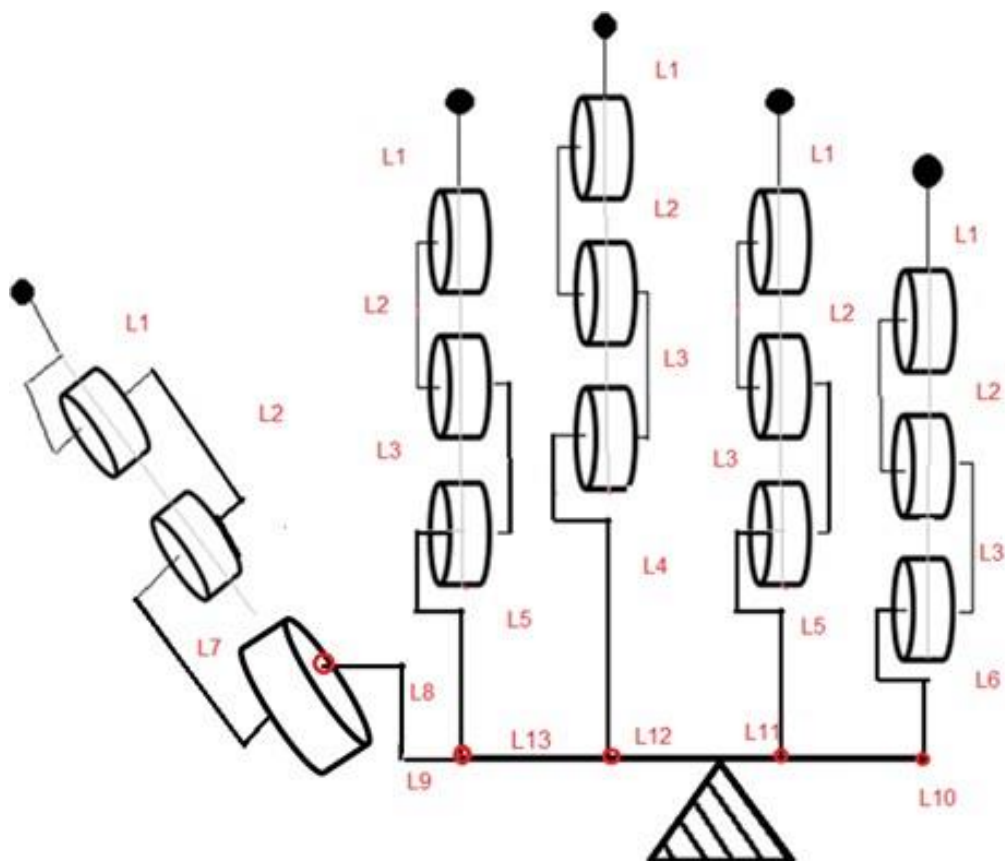


Figura 2. Diagrama de articulaciones de la prótesis de mano propuesta.

El ángulo de inclinación de la articulación CMC (carpometacarpiana) del pulgar se propuso en 45° ya que es el ángulo promedio del dedo pulgar en reposo (Taboadela, 2007). Considerando que los metacarpianos se tomarían como un elemento único, sin movimiento, se diseñó la estructura de la palma de la mano como una pieza sólida. Las dimensiones de largo y ancho de la palma se basaron en los datos descritos en la sección de antropología de la mano, largo (103.51 mm) y ancho (82.55 mm). Para las falanges de los dedos se realizaron dos variantes en los diseños, una para las falanges del dedo meñique y otra variante para las falanges del dedo índice, medio y anular. Estas falanges cumplen con las medidas presentadas en la Tabla 3.

Todas las falanges distales constan de dos piezas, una pieza que es la estructura de la falange y una que sirve como tapa o punta de los dedos que podría ser eventualmente reemplazada por un material compatible con pantallas touch o trackpads. Las falanges media y distal fueron diseñadas para presentar flexión únicamente en un sentido, por lo que no hay riesgo de que la pieza se flexione en dirección opuesta, mientras que, la falange proximal, al considerarse la dirección del sistema de transmisión de movimiento, no requirió esta medida, por lo que es la única pieza que puede ser ensamblada en cualquier sentido.

Todos los componentes se diseñaron utilizando el Software SolidWorks® 2018. En la Figura 3 se pueden observar cada una de las piezas diseñadas.

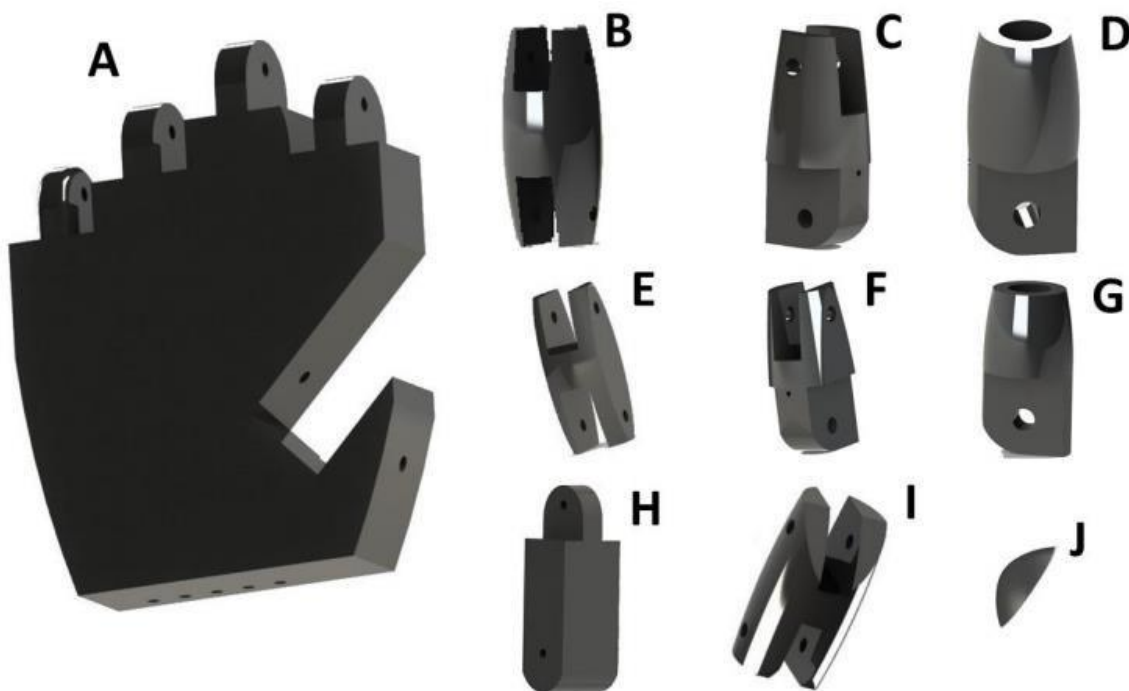


Figura 3. Piezas modeladas en 3D para cada segmento de la prótesis de mano. A) Palma de la mano, B) Falange proximal, C) Falange Medial, D) Falange distal, E) Falange proximal meñique, F) Falange medial meñique, G) Falange distal meñique, H) Metarcarpiano de pulgar, I) Falange pulgar, J) Punta de dedos.

En la Figura 4 se puede observar la renderización del modelo conceptual de la prótesis ya ensamblado.



Figura 4. Diseño conceptual 3D de la mano protésica.

1. Selección de materiales

Considerando que la prótesis está diseñada para ser fabricada por medio de impresión 3D, se evaluaron los diferentes materiales de impresión, disponibles actualmente. Se consideraron los datos publicados por Ultimaker, una empresa de venta de equipo de impresoras 3D y suministros, y se evaluaron los termoplásticos que tienen en su catálogo tales como ácido poliláctico (PLA), polietileno clorado (CPE) y acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Así mismo, se compararon sus propiedades con las del titanio, material con el que construyen gran parte de las prótesis comerciales. En la Tabla 4 se muestran las principales propiedades de dichos materiales.

Tabla 4. Propiedades de los principales materiales de impresión 3D y de titanio. ND=Información no disponible.

Característica	ABS	PLA	CPE	Titanio
Densidad (g/cm ³)	1.04	1.24	1.27	4.50
Esfuerzo de tracción a la ruptura	33.9 MPa	45.6 MPa	37.7 MPa	220 MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	39.0 MPa	49.5 MPa	41.1 MPa	140 MPa
Alargamiento a la deformación	3.5%	3.3%	4.7%	ND
Alargamiento a la rotura	4.8%	5.2%	5.1%	54%
Resistencia a la flexión	70.5 MPa	103 MPa	79.5 MPa	ND
Resistencia a la prueba de impacto Izod	10.5 kJ/m ²	5.1 kJ/m ²	4.0 kJ/m ²	55.4 μΩ/cm
Temperatura de fusión	225° C	145° C	70° C	1650° C
Módulo de elasticidad	1681.5 MPa	2345.5 MPa	1537.5 MPa	116 MPa

Con base en el análisis de las propiedades de los distintos materiales, se determinó que el PLA resulta una mejor elección considerando sólo la resistencia a la flexión, comparado con el ABS y el CPE. Sin embargo, considerando que uno de los problemas de las prótesis actuales es su elevado peso, se debe elegir un material con la menor gravedad específica. Por lo que el ABS pudiera resultar la mejor opción.

2. Transmisión de movimiento

En la mano, los músculos que generan la flexión o extensión de los dedos, no forman parte del dedo, sino que se encuentran en el antebrazo y es por medio de tendones que se transmite el movimiento a los dedos. En el estado del arte, los métodos de transmisión de movimiento más comunes, así como sus principales ventajas y desventajas son:

- **Transmisión de movimiento lineal por barras:** Son precisos, económicos, control de velocidad de desplazamiento con respecto al punto de entrada. Sin embargo el diseño del mecanismo es complejo, el torque se reduce en el punto final, la resistencia de eslabones se compromete debido a la longitud del mismo.
- **Actuadores en cada articulación:** Se puede lograr un control preciso, capacidad de mimetizar los movimientos de la mano y se puede lograr una gran velocidad, sin embargo, añaden peso, incrementan costos, aumentan la complejidad del control, mayor consumo de energía.
- **Transmisión de movimiento lineal por poleas fijas:** Requieren un único actuador, reducen costos, peso, complejidad, aumento de torque en el elemento terminal con respecto al inicial, fáciles de controlar, sin embargo, reducen rango de movimiento, el sistema de transmisión se puede romper fácilmente y son poco precisos.

Considerando el objetivo de la prótesis propuesta, se considera como mejor opción la transmisión por poleas. Principalmente por su bajo costo, facilidad de control, reducción de peso y simplicidad de diseño. Se elige un sistema de guía por medio de canales dentro de la estructura de la prótesis, como se muestra en la Figura 5.

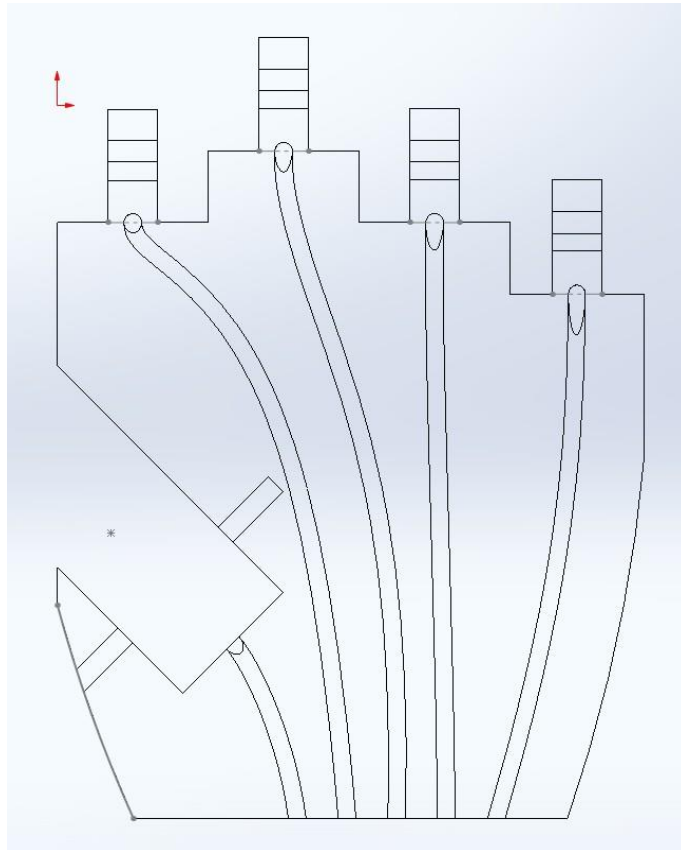


Figura 5. Canales guía de poleas de transmisión de movimiento.

Se plantea que cada polea tenga un actuador. El elemento transmisor se plantea que sea hilo de poliéster de 2.2 mm de grosor, el cual cuenta con una duración garantizada de 10 años y capaz de resistir tensiones de hasta 133 kg (Projar, 2018).

3. Selección de actuadores

La mayoría de teclados requieren de una fuerza de 0.58 N para activar una tecla, con un desplazamiento vertical de la tecla de 4 mm (Deskthority, 2014). Los teclados de membrana requieren entre 0.28 a 0.83 N (Shin, 2005). Considerando esto y que la transmisión por poleas no reduce demasiado el torque de entrada, se eligen servomotores que sean capaces de suministrar ese torque al menos, que sean lo suficientemente pequeños como para acoplarse a la estructura de la mano sin incrementar demasiado el peso y que sean de bajo costo y bajo consumo de energía.

Después de revisar diversos servomotores fácilmente disponibles, se eligen los servomotores MG90s, los cuales pueden generar un torque de 1.8 N, pesan 13.4 g, miden 22.2 x 11.8 x 3.1 mm, con una velocidad de 600 grados/s y voltaje de alimentación de 4.8 a 5 V. Cada uno de estos actuadores será activado por las señales de control derivadas de las señales EMG de los músculos en el antebrazo.

C. Diseño del sistema de adquisición y procesamiento de las señales EMG

1. Determinación de número y colocación de electrodos.

Con el fin de determinar el número y localización óptima de los electrodos para activar los actuadores, se ubicaron los músculos flexores de los dedos. Mediante el sistema de adquisición de EMG Trigno (Delsys. Inc, USA), se realizó la adquisición de la señal EMG en cada uno de los músculos, en diferentes posiciones, mientras se movían cada uno de los dedos, simulando el uso de un teclado. En la Figura 6 se muestra la colocación propuesta para cada par de electrodos.

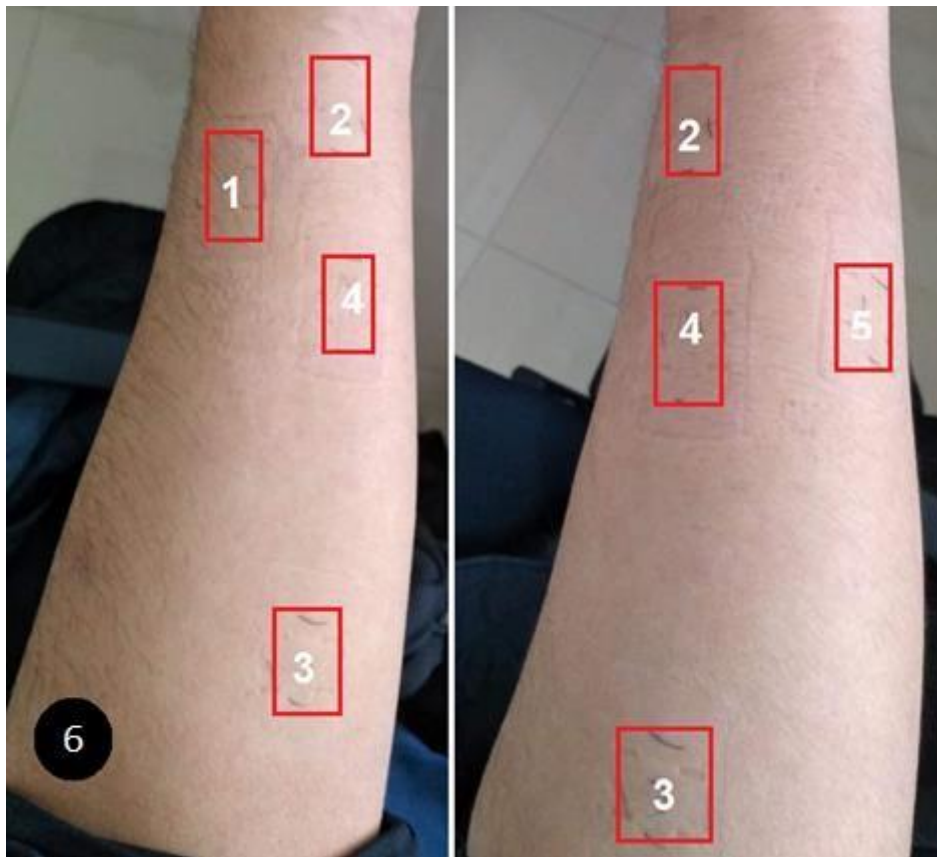


Figura 6. Localización de los electrodos en una vista anteroposterior del brazo izquierdo donde: 1 es el arreglo de electrodos para el pulgar; 2 el arreglo para el dedo índice; 3 el arreglo para el dedo medio; 4 el arreglo para el dedo anular; 5 el arreglo para el dedo meñique; 6 el electrodo de referencia.

Se propone un par de electrodos para cada punto, con una separación entre electrodos de 1.5 a 2 cm y un electrodo de referencia para todos ellos. Los electrodos a utilizar podrían ser desechables de tipo Ag-AgCl. En general, la colocación de todos los electrodos proporciona una señal claramente relacionada con el dedo que se busca activar. Solamente la activación del dedo medio es el que pudiera ser difícil de discernir debido a que, por su posición, el resto de señales también presentan una amplitud apreciable. Sin embargo, aun

así la señal rectificada y filtrada presenta una amplitud mayor al resto de las señales como se puede observar en la Figura 7. En dicha figura se muestran las señales de EMG captadas por los cinco sensores Trigno, colocados como se mostró en la Figura 6. Dichas señales se generaron cuando el sujeto de prueba realizó el movimiento únicamente del dedo medio únicamente. Se puede observar que las señales generadas por los músculos adyacentes tienen una amplitud menor a la señal captada para el dedo medio.

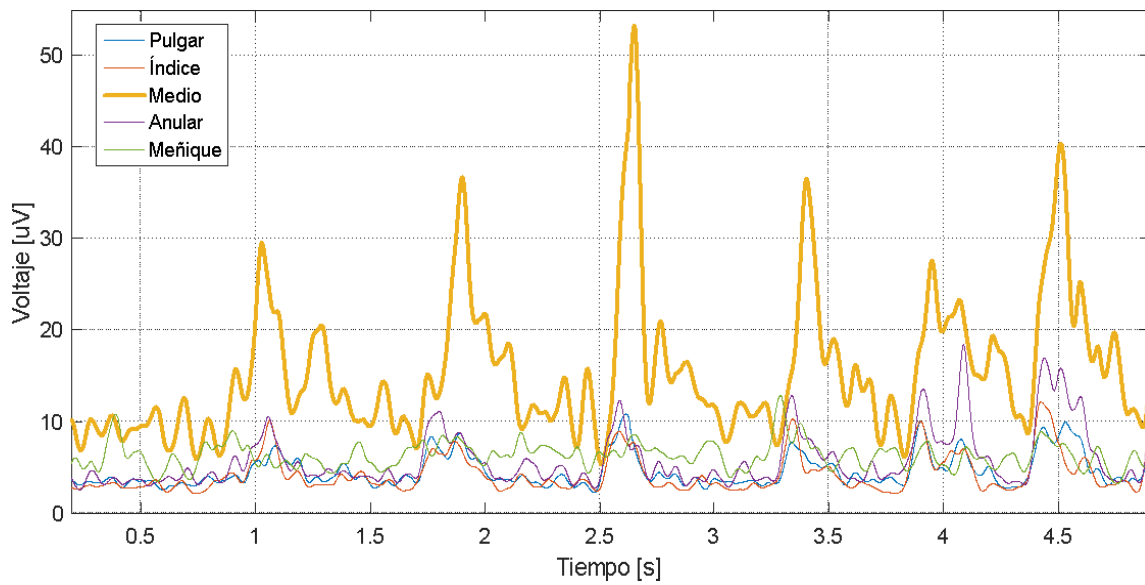


Figura 7. Señales de EMG durante la activación solamente del dedo medio.

El resto de señales, para la activación de cada uno de los otros dedos, presentan una amplitud mucho mayor, comparadas con el resto de señales por lo que, por medio de umbrales de activación, se puede determinar de manera simple, cual dedo se desea activar y enviar esa señal al controlador de los actuadores.

2. Acondicionamiento y procesamiento de señal

En el estado del arte existen un sinnúmero de circuitos electrónicos para la adquisición de señales electromiográficas. En este trabajo se propone un circuito de adquisición y acondicionamiento de señales muy simple pero, que cumple con las características necesarias para obtener las señales de EMG para la activación de los servomotores.

En la Figura 8 se muestra el diagrama del circuito electrónico. Este consta de un amplificador de instrumentación INA128 (Texas Instruments, USA), para adquirir la señal diferencial de los electrodos. Un OPA2604 para retroalimentar la señal al usuario, reduciendo así el nivel de ruido. Cuenta con un filtro

pasabanda compuesto de un filtro pasa altas (20 Hz) y otro pasa bajas (452 Hz) de segundo orden, implementados ambos con topologías Sallen-Key, con respuesta Butterworth.

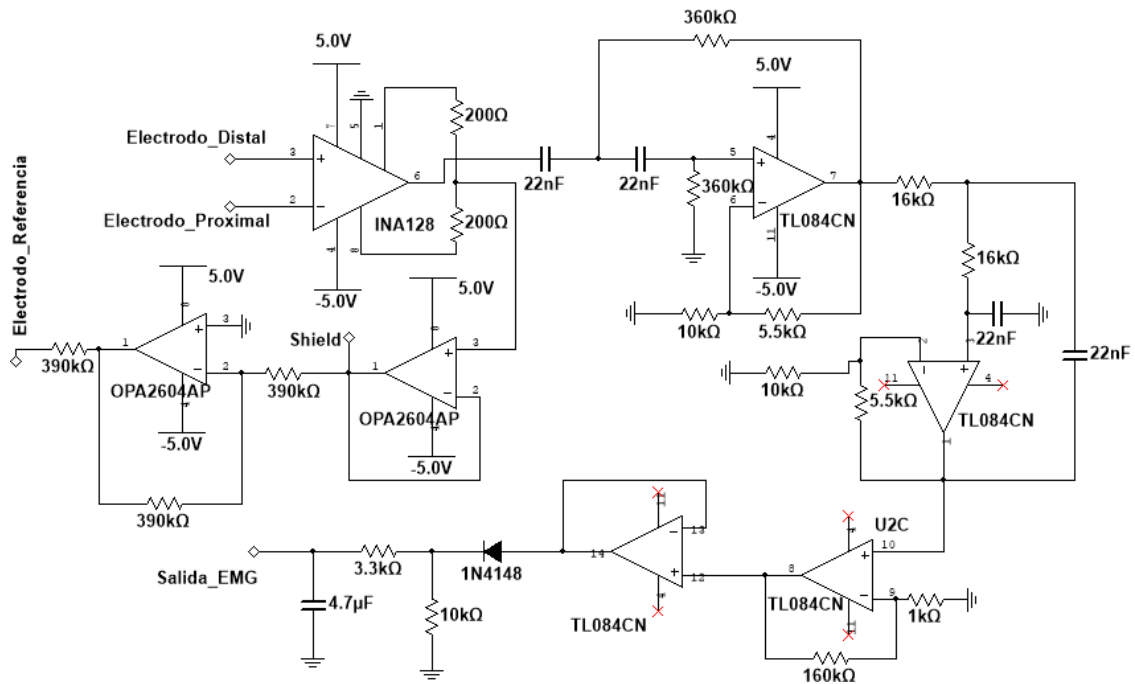


Figura 8. Circuito electrónico para la adquisición y acondicionamiento de señal EMG por canal.

El filtro pasabanda (formado por el filtro pasabaja y pasa altas), además de limitar el ancho de banda de la señal, proporciona una amplificación de 2.4 veces la señal de entrada. Después de este filtro se conecta un amplificador no inversor, realizado con el OPAM TL084. Este amplificador proporciona una ganancia de 160 veces la entrada. Por lo que la ganancia total del circuito hasta este punto sería de 386.8 veces. Considerando ganancia dada por el amplificador de instrumentación (126 veces), la ganancia total es de 48,737 veces. Suficiente para incrementar los valores del orden de 50 μV a 2.5 V aproximadamente. A esta señal amplificada y filtrada, se le aplica una rectificación implementada con un OPAM TL084 y un diodo 1N4148, el cual tienen un tiempo de recuperación de 4 ns y es apropiado para rectificar las señales del EMG. Finalmente, la señal rectificada es filtrada mediante un filtro pasivo pasabajos de primer orden, con el fin de suavizar la señal. El filtro está diseñado para cortar a una frecuencia cercana a 10 Hz.

La señal acondicionada se digitaliza por medio de una tarjeta Arduino Mega®, el cual será el sistema que se encargará de activar los actuadores dependiendo de las señales de EMG. La Figura 9 muestra una propuesta de la conexión del sistema de control electrónico de la mano protésica. Se puede observar que la

tarjeta Arduino se encargará de muestrear las señales acondicionadas de EMG y activar los actuadores cuando detecte una señal de EMG propia de la activación de cada dedo.

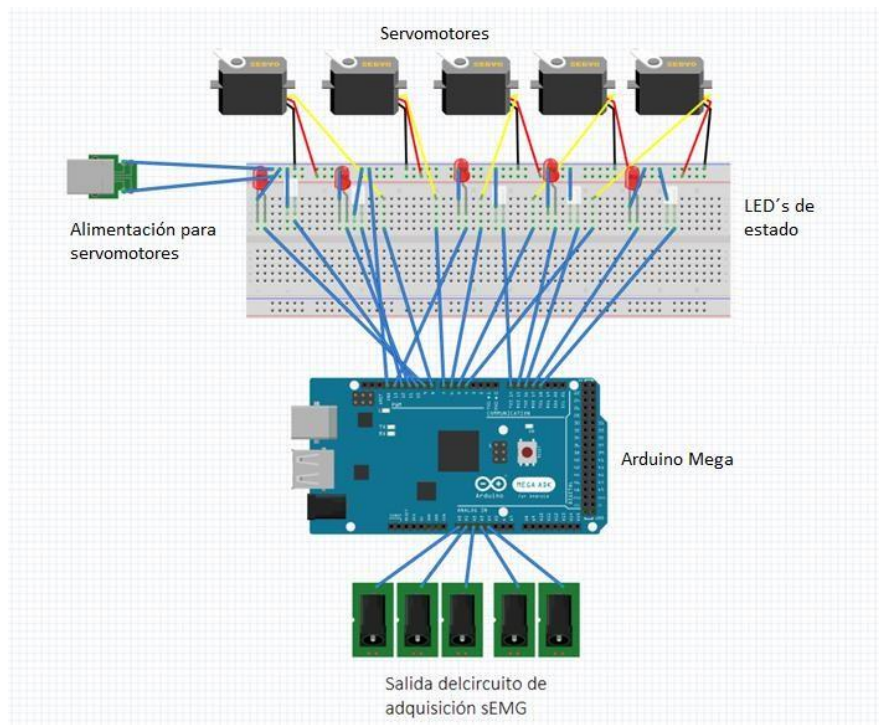


Figura 9. Conexión de servomotores, circuitos de adquisición de EMG y Arduino Mega.

En la Figura 10 se muestra el diagrama de flujo del firmware que podría controlar la activación de los dedos de la mano protésica propuesta. El funcionamiento de este se basa en la lectura de canales de EMG, detección por umbrales y activación de servomotores para poder presionar las teclas.

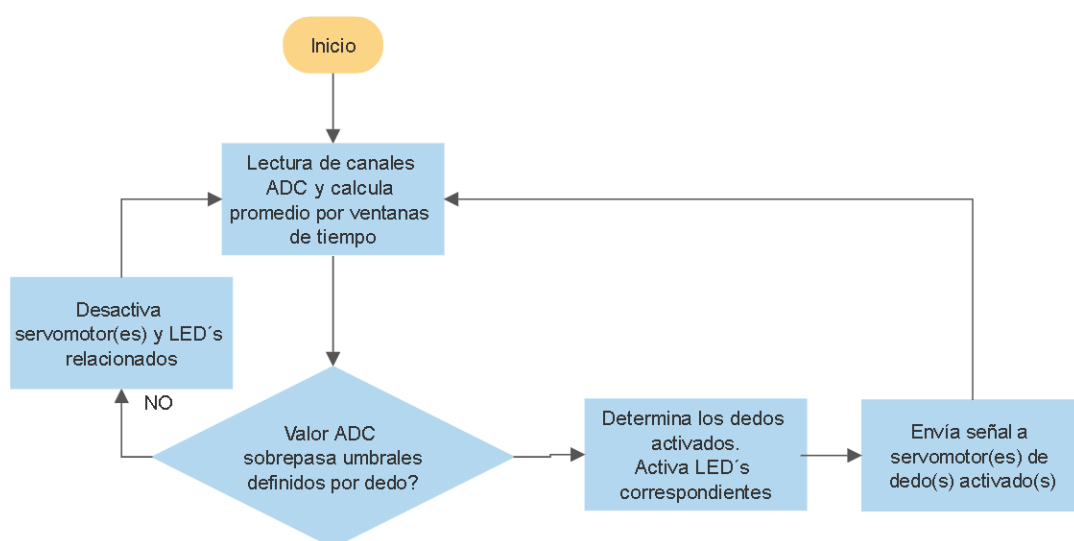


Figura 10. Diagrama de flujo de firmware en el microcontrolador del Arduino para activar la mano protésica.

3. Resultados

C. Sobre el diseño mecánico y selección de materiales

Se propuso el diseño de una prótesis de mano de 15 DOF, que se considera como la configuración más simple que permitiría la activación de cada uno de los cinco dedos de una manera similar a una mano biológica. La prótesis propuesta consta de 14 piezas diseñadas en SolidWorks, las cuales pueden ser fácilmente imprimibles usando impresoras 3D de bajo costo. El material seleccionado podría ser cualquiera de los más comunes, PLA o ABS. Ambos tienen la capacidad de soportar las fuerzas requeridas para presionar una tecla (0.58 N). Se propone el uso de ABS debido a su menor densidad, lo que implicaría un menor peso. Un cálculo en el software SolidWorks, arroja una estimación 191 gramos de material para la impresión de la prótesis. Agregando los cinco servomotores (13.4 g/cu), se obtendría una mano con un peso aproximado de 258 g. Considerando el peso de la tarjeta Arduino Mega (36 g) y baterías recargables y las tarjetas de acondicionamiento de señal, se estima que la mano pesaría menos de 500 g. Esto es 3 veces menos que la prótesis comercial i-limb de quantum, por mencionar alguna.

Por otro lado, dado que el diseño considera que con una rotación de 90° se obtendrá el recorrido total del dedo y, tomando en cuenta la velocidad de 600°/s del servomotor elegido, se consigue una velocidad de 150 ms para el recorrido total del dedo. Considerando que el dedo regrese a su posición original en lapso similar de tiempo, se podría realizar un ciclo de pulsación en 300 ms aproximadamente. Esto significa poco más de 3 PPS (pulsaciones por segundo) o 180 PPM (pulsaciones por minuto), siempre y cuando se pulsara la misma tecla. Se estima que un mecanógrafo experto puede realizar entre 42 y 54 PPM (Testdemecanografía, 2018). Por lo tanto, la prótesis podría ser capaz de alcanzar esa velocidad si el usuario practica lo suficiente. La precisión de pulsación dependerá de la destreza del usuario para posicionar la mano moviendo el antebrazo y su control de músculos para la activación de los servomotores.

E. Sobre la adquisición y acondicionamiento de señal

Se realizó el diseño del circuito electrónico para la adquisición de las señales electromiográficas. El diseño está basado en el propuesto por el fabricante del amplificador de instrumentación INA128 (Texas Instruments) y en circuitos de filtrado y rectificación de uso común (Wang, Tang, & E Bronlund, 2013). Se calculó una ganancia del circuito lo suficientemente alta como para llevar las señales de entrada de los electrodos a un rango entre 2 y 3 V como máximo para evitar saturar el ADC de la tarjeta Arduino. Se consideraron las magnitudes de la señal obtenidas de los experimentos usando el sistema

Trigno (Delsys.inc) descrito en la sección C de este documento. Una simulación solamente de la sección de filtrado y amplificación secundaria se puede observar en la Figura 11. Las amplitudes de la señal EMG observadas en las posiciones elegidas estuvieron alrededor de 50 μV pico, ya filtradas y rectificadas. La ganancia total del circuito electrónico, considerando la ganancia del INA128, es de alrededor de 48,737 veces la señal de entrada.

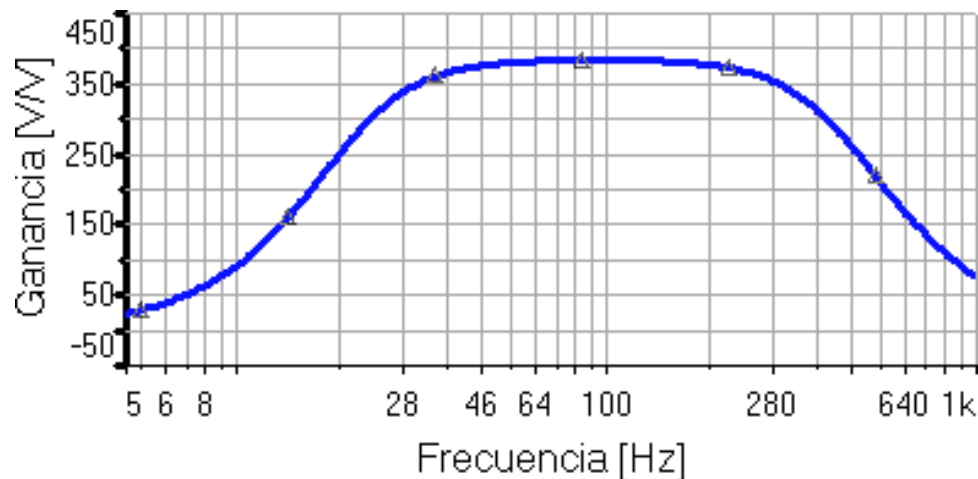


Figura 11. Diagrama de Bode de la respuesta del sistema de filtrado y amplificación propuesto para el circuito de adquisición de señales EMG.

Con respecto al procesamiento de señales de EMG para determinar la intención de movimiento, existen muchas técnicas para el análisis, procesamiento y clasificación de las señales de EMG. Se pueden citar por ejemplo, técnicas usando inteligencia artificial basadas en redes neuronales, lógica difusa, modelos autoregresivos, wavelets y otras técnicas basadas en análisis de tiempo-frecuencia, como la distribución de Weiner-Ville (WVD) o la distribución de Choi-Williams, etc. Una descripción más completa de estas y otras técnicas se puede encontrar en (Chowdhury et al., 2013; Reaz, Hussain, & Mohd-Yasin, 2006). Sin embargo, todas éstas técnicas tienen la desventaja de requerir análisis u operaciones complejas que difícilmente se pueden llevar a cabo en un microcontrolador o un sistema embebido de bajo costo. Debido a lo anterior se propuso el uso de un método simple basado en umbrales de las señales rectificadas. Los estudios preliminares de análisis de la señales EMG adquiridas usando el sistema Trigno (Delsys.inc), ver sección C, permiten indicar que ésta solución podría dar buenos resultados, sin embargo estos resultados dependerán del usuario de la prótesis y la calidad de las señales que se puedan adquirir de él.

4. Conclusiones

En este trabajo se presenta el diseño de una mano protésica para facilitar el uso de teclados a usuarios con amputación de la mano izquierda, aunque este diseño puede ser fácilmente modificado para alguien con amputación en la mano derecha. La prótesis propuesta está diseñada para fabricarse por medio de impresión 3D y controlarse por medio de señales EMG. Se estima que la prótesis no pesará más de 500 g, con un costo (incluyendo material y construcción a nivel artesanal o prototipo) inferior a los 300 USD.

Se propuso un sistema de adquisición y procesamiento de la señal de EMG lo más sencillo posible con la premisa de que éste pueda ser implementado en un sistema embebido de bajo costo, como lo es una tarjeta Arduino. La selección de componentes y materiales se llevó a cabo considerando los datos encontrados en el estado del arte y en las características de diseño fijadas inicialmente. Lo anterior permite inferir que el diseño es funcional, sin embargo, hasta que el sistema no se construya e implemente, no se tiene la certeza del funcionamiento y es probable que se tengan que hacer adecuaciones dependiendo del usuario para el cual se diseñe la prótesis.

La principal aportación del diseño propuesto, además de su bajo costo, es el hecho de que está diseñado para cubrir un problema específico que hasta ahora, ninguna de las prótesis comerciales o reportadas en prototipos ha solucionado. La interfaz entre el usuario amputado y un teclado, debe ser lo suficientemente rápida y ligera como para garantizar un uso más natural del teclado. Esta aportación es especialmente interesante para personas que han sufrido amputaciones y que debido a ello buscan cambiar de empleo a alguno relacionado con las computadoras. O simplemente para disminuir su estrés por medio del uso de juegos de video.

REFERENCIAS

- Amputee Coalition (2016). Limb Loss Statistics. Recuperado el 10 de mayo de 2019, de Amputee Coalition website: <https://www.amputee-coalition.org/resources/limb-loss-statistics/>
- Bebionic. (2012). Technical Information - bebionic. Recuperado el 23 de abril de 2019, de http://bebionic.com/the_hand/technical_information/
- Binvignat, O., Almagià, A., Lizana, P., & Olave, E. (2012). Aspectos Biométricos de la Mano de Individuos Chilenos. *International Journal of Morphology*, 30(2), 599–606. <https://doi.org/10.4067/S0717-95022012000200040>
- Chaurand, R. Á., León, L. R. P., & Muñoz, E. L. G. (2007). *Dimensiones antropométricas de población latinoamericana*. 283.

- Chowdhury, R., Reaz, M., Ali, M., Bakar, A., Chellappan, K., & Chang, T. (2013). Surface Electromyography Signal Processing and Classification Techniques. *Sensors*, 13(9), 12431–12466. <https://doi.org/10.3390/s130912431>
- CONACyT. (2018). El CIMAV diseña prótesis robótica. Recuperado el 23 de abril de 2019, de <https://centrosconacyt.mx/objeto/el-cimav-disena-protesis-robotica/>
- Deskthority. (2014). Force. Recuperado el 3 de mayo de 2019, de <https://deskthority.net/wiki/Force>
- Hernández, A. G., & Alvarez, M. del P. M. (2017). Arte y Ciencia: Proporción de los dedos de la mano. *Latin-American Journal of Physics Education*, 11(2), 28.
- ISHN. (2014). Statistics on hand and arm loss. Recuperado el 10 de mayo de 2019, de Industrial Safety & Hygiene News website: <https://www.ishn.com/articles/97844-statistics-on-hand-and-arm-loss>
- Jason, M. (2017). Amputee Controls Individual Prosthetic Fingers. Recuperado el 11 de mayo de 2019, de Georgia Tech, Science and Technology website: <https://music.gatech.edu/news/force-strong-amputee-controls-individual-prosthetic-fingers>
- Jaworski, Ł., & Karpiński, R. (2017). *Biomechanics of the human hand*. 3(1), 6.
- Kate, J. ten, Smit, G., & Breedveld, P. (2017). 3D-printed upper limb prostheses: a review. *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology*, 12(3), 300–314. <https://doi.org/10.1080/17483107.2016.1253117>
- LeBlanc, M. (2011). “Give Hope - Give a Hand” - The LN-4 Prosthetic Hand. Recuperado de <https://web.stanford.edu/class/engr110/2011/LeBlanc-03a.pdf>
- Mobius Bionics. (2018). LUKE Arm. Recuperado el 23 de abril de 2019, de Mobius Bionics website: <http://www.mobiusbionics.com/luke-arm/>
- Open bionics. (2018). Hero Arm - an affordable, advanced and intuitive bionic arm. Recuperado el 11 de mayo de 2019, de <https://openbionics.com/hero-arm/>
- Ottobock. (2019). Michelangelo Hand. Recuperado el 23 de abril de 2019, de <https://shop.ottobock.us/Prosthetics/Upper-Limb-Prosthetics/Michelangelo-Axon-Bus-System/Michelangelo-Hand-AxonHook/Michelangelo-Hand-Transcarpal/p/8E550~5R-M>
- Perez-Rodriguez, A. (2017). *Proyecto MyoArm: Prótesis robótica con sensado EMG y entrenamiento de redes neuronales*. Universidad de Sevilla, Sevilla, España.

- Prensilia s.r.l. (2017). IH2 Azzurra. Recuperado el 11 de mayo de 2019, de Prensilia. grasping innovation website: <https://www.prensilia.com/portfolio/ih2-azzurra/>
- Probionics. (2015). Probionics. Recuperado el 1 de septiembre de 2018, de <http://www.probionics.com.mx>
- Projar. (2018). Hilo de Poliéster. Recuperado el 3 de mayo de 2019, de PROJAR website: <https://www.projar.es/productos/productos-hortofruticultura-jardineria/vina-y-cultivos-agricolas/hilo-de-poliester/>
- Reaz, M. B. I., Hussain, M. S., & Mohd-Yasin, F. (2006). Techniques of EMG signal analysis: detection, processing, classification and applications. *Biological Procedures Online*, 8(1), 11–35. <https://doi.org/10.1251/bpo115>
- Secretaría del Trabajo y Previsión Social. (2010). *Información sobre accidentes y enfermedades de trabajo*. Recuperado de <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/estadisticas/nacional%202001-2010.pdf>
- Shin, D. (2005). *Performance and Usability of Flexible Membrane Keyboards*.
- Taboadela, C. H. (2007). *Goniometría : una herramienta para la evaluación de las incapacidades laborales* (1a ed., Vol. 1). Recuperado de http://bibliomedicinadigital.fmed.uba.ar/medicina/cgi-bin/library.cgi?a=d&c=catalogo&d=CatalogoGral_00259
- Testdemecanografía. (2018). Promedio de Palabras por Minuto y cómo mejorarlo. Recuperado el 11 de mayo de 2019, de Testsdemecanografía website: <http://www.testdemecanografia.com/promedio-ppm/>
- Touch Bionics. (2015). i-limb quantum. Recuperado el 23 de abril de 2019, de <http://touchbionics.com/products/active-prostheses/i-limb-quantum>
- Vanguardia. (2018). El salario promedio en México. Recuperado el 23 de abril de 2019, de <https://vanguardia.com.mx/articulo/6-mil-117-pesos-al-mes-el-salario-promedio-en-mexico>
- Vazquez-Vela, E. (2015, marzo 4). *Los amputados, un reto para el estado*. Recuperado de http://www.anmm.org.mx/actas2015/Acta_SO04032015.pdf
- Wang, J., Tang, L., & E Bronlund, J. (2013). Surface EMG Signal Amplification and Filtering. *International Journal of Computer Applications*, 82(1), 15–22. <https://doi.org/10.5120/14079-2073>
- Youbionic. (2014). Youbionic. Recuperado el 23 de abril de 2019, de Youbionic website: <https://www.youbionic.com/>

Notas biográficas



Ernesto-Eduardo López-López graduado de la Facultad de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de México como Bioingeniero Médico en 2019. Sus intereses de investigación están relacionados con el desarrollo de prótesis para rehabilitación y la robótica médica. Actualmente se desempeña como ingeniero de servicio biomédico.



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.



Adriana H. Vilchis González Obtuvo el grado de doctor en Imagen, Visión y Robótica en el Instituto Nacional Politécnico de Grenoble, Francia. Actualmente es profesor investigador en las Facultades de Ingeniería y de Medicina de la Universidad Autónoma del Estado de México. Sus intereses científicos incluyen Robótica Médica y Sistemas Mecatrónicos. Tiene 2 patentes internacionales en el área de Robótica Médica así como varios diseños industriales otorgados y patentes solicitadas ante el IMPI.



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