

# LÁMPSAKOS

No. 10

## Presentación

**Editorial, El Significado de la Línea Editorial en la Revista Lámpsakos**  
*Gabriel Jaime Correa-Henao*

**El Alto Magdalena- Colombia de la mano con energías alternativas**  
*Ancízar Barragán-Alturo*

**Iniciativas para el cambio**  
*César Alfonso Defrancisco-Larrañaga*  
*Christian Camilo Ortiz-López*

**Seguridad en activos de información humanos**  
*Jorge Mario Cadavid-Aguirre*

**Una mirada al análisis de redes de transporte en Cuba, desde el punto de vista de los datos**  
*Eduardo Sánchez-Ansola*  
*Laura Sánchez-Jiménez*  
*Carlos José de Armas-García*

**Adaptación del Algoritmo Genético para la creación de árboles de enrutamiento en una Red de Sensores Inalámbrica**  
*Ángela María Rodríguez-Vivas*  
*Juan Carlos Corrales-Muñoz*

**Degradación de suelos ante tensión de corte cíclica**  
*Rubén Ángel Galindo-Aires*

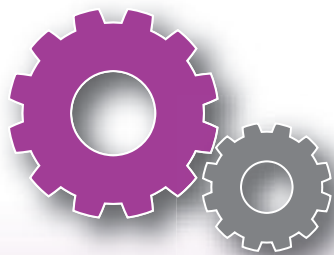
**Una propuesta de T-Learning: usando Planificación, Inteligencia Artificial y Razonamiento Ontológico**  
*Ingrid-Durley Torres-Pardo*  
*Jaime Alberto Guzmán-Luna*  
*Miguel A. Becerra*

**Interfaz Cerebro Computador, basado en señales EEG para el control de movimiento de una prótesis de mano usando ANFIS**  
*Alexandra Bedoya-Rojas*  
*Jessica Giraldo-Leiva*  
*Ingrid-Durley Torres-Pardo*  
*Miguel A. Becerra*

**Construcción de un aplicativo para el control de activos tecnológicos al interior de una organización: beneficios y experiencias**  
*Adrián Alberto Jaramillo-Arango*  
*Gabriel Jaime Correa-Henao*

**Enseñanza en la ingeniería de software: aproximación a un estado del arte**  
*Lina María Montoya-Suárez*  
*Elizabeth Pulgarín-Mejía*

**Seguridad energética y protección de infraestructuras críticas**  
*Gabriel Jaime Correa-Henao*  
*José María Yusta-Loyo*



FUNDACIÓN  
UNIVERSITARIA



Facultad de  
Ingenierías



©Fundación Universitaria Luis Amigó

**Lámpsakos**

Nº.10, julio-diciembre de 2013

ISSN: 2145-4086

**Rector**

Pbro. José Wilmar Sánchez Duque

**Vicerrectora de Investigaciones**

Isabel Cristina Puerta Lopera

**Director de Programa Ingeniería de Sistemas**

Ramiro Antonio Giraldo Escobar

**Jefe Departamento de Fondo Editorial**

Carolina Orrego Moscoso

**Diagramación**

Arbey David Zuluaga Yarce

**Terminación**

Arbey David Zuluaga Yarce

**Corrector de estilo**

Carlos Alberto Calderón Gallego

**Contacto editorial**

Fundación Universitaria Luis Amigó. Transversal 51A #67 B 90. Medellín, Antioquia, Colombia. Tel: (574) 448 76 66 (Ext. 9711. Departamento de Fondo Editorial). [www.funlam.edu.co](http://www.funlam.edu.co) - [fondoeditorial@funlam.edu.co](mailto:fondoeditorial@funlam.edu.co)

Órgano de divulgación de la Facultad de Ingenierías de la Fundación Universitaria Luis Amigó. Hecho en Colombia.

Financiación realizada por la Fundación Universitaria Luis Amigó.



Licencia Creative Commons Atribución- No Comercial – Compartir Igual 4.0 Internacional.

# LÁMPSAKOS

## Director de la revista

Gabriel Jaime Correa Henao, Ph.D. Fundación Universitaria Luis Amigó. Medellín, Colombia

## Comité científico

Daniel Borrajo Millán, Ph.D. Universidad Carlos III. Madrid, España.

Amit Chaudhry, Ph.D. Panjab University. Chandigarh, India.

Óscar Sapena Vercher, Ph.D. Universidad Politécnica de Valencia, España.

Giner Alor Hernández, Ph.D. Instituto Tecnológico de Orizaba. Veracruz, México.

Rubén Ángel Galindo Aires, Ph.D. Universidad Politécnica de Madrid, España.

Julián Alberto Patiño Murillo, Ph.D(c). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Néstor Raúl Londoño, MSc. DEC Consultoría. Medellín, Colombia.

Denis Derivet Thureaux, MSc. Universidad de Ciencias Informáticas. La Habana, Cuba.

Darío Ernesto Jaén Navarro, Esp. Universidad de San Buenaventura. Medellín, Colombia.

Valerio Adrián Anacleto, Lic. Epidata Consulting. Buenos Aires, Argentina.

## Comité editorial

Marcelo Becker, Ph.D. Universidade de São Paulo, Brasil.

Ulises Juárez Martínez, Ph.D. Instituto Técnico de Orizaba. Veracruz, México.

Alexander García Castro, Ph.D. Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Aldo Pardo García, Ph.D. Universidad de Pamplona, Colombia.

Francisco Javier Aguirre, MSc. Fundación Universitaria Luis Amigó. Medellín, Colombia.

Mauricio López Bonilla, MSc. Fundación Universitaria Luis Amigó. Medellín, Colombia.

## Comité de árbitros de la edición

Bizuayehu Abebe Worke, Ph.D. Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal.

Rubén Ángel Galindo Aires, Ph.D. Universidad Politécnica de Madrid, España.

José María Yusta Loyo, Ph.D. Universidad de Zaragoza, España.

Henry Alonso Colorado Lopera, Ph.D. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.

Jorge Alberto Hernández Cerón, Ph.D. Universidad de Ibagué, Colombia.

Carmen Patricia Delgado, Ph.D. Universidad de Chihuahua, México.

Julián Alberto Patiño Murillo, Ph.D(c). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Luis Eduardo Vahos Hernández, Ph.D(c). Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia.

Jorge Mario Gaviria Hincapié, MSc. Fundación Universitaria Luis Amigó. Medellín, Colombia.

Álvaro Andrés Ramírez Piñero, MSc. ISAGEN ESP. Medellín, Colombia.

Darío Enrique Soto, MSc. Tecnológico de Antioquia. Medellín, Colombia.

Éder Acevedo, MSc. Fundación Universitaria Luis Amigó. Medellín, Colombia.

## Edición

Fundación Universitaria Luis Amigó.

## Solicitud de canje

Biblioteca Vicente Serer Vicens. Fundación Universitaria Luis Amigó. Medellín, Antioquia, Colombia.

## Para sus contribuciones

[lampsakos@funlam.edu.co](mailto:lampsakos@funlam.edu.co)

<http://www.funlam.edu.co/lampsakos>

Facultad de Ingenierías. Fundación Universitaria Luis Amigó. Transversal 51A # 67B - 90. Medellín, Antioquia, Colombia.

ISSN: 2145-4086

No. 10, julio-diciembre de 2013

## Fundada en 2009

*Lámpsakos* es una publicación adscrita a la Facultad de Ingenierías de la Fundación Universitaria Luis Amigó, Medellín, Colombia. Tiene por objetivo divulgar artículos originales e inéditos como resultados de investigación científica o tecnológica de las áreas de las ingenierías. Su periodicidad es semestral con alcance nacional e internacional. Está destinada a estudiantes, investigadores, profesionales y personas interesadas en estos temas.

Los autores son moral y legalmente responsables del contenido de sus artículos, así como del respeto a los derechos de autor. Por lo tanto, éstos no comprometen en ningún sentido a la Fundación Universitaria Luis Amigó.

La reproducción de los artículos se regirá conforme a lo descrito en <http://creativecommons.org/>

## CONTENIDO

### Presentación

- Editorial. El significado de la línea editorial en la Revista Lámpsakos** ..... 8  
*Gabriel Jaime Correa-Henao*

### Cartas al editor

- El Alto Magdalena- Colombia de la mano con energías alternativas** ..... 11  
*Ancízar Barragán-Alturo*

- Iniciativas para el cambio** ..... 14  
*César Alfonso Defrancisco-Larrañaga*  
*Christian Camilo Ortiz-López*

- Seguridad en activos de información humanos** ..... 17  
*Jorge Mario Cadavid-Aguirre*

### Artículos de investigación

- Una mirada al análisis de redes de transporte en Cuba, desde el punto de vista de los datos** ..... 21  
*Eduardo Sánchez-Ansola*  
*Laura Sánchez-Jiménez*  
*Carlos José de Armas-García*

- Adaptación del algoritmo genético para la creación de árboles de enrutamiento en una red de sensores inalámbrica** ..... 34  
*Ángela María Rodríguez-Vivas*  
*Juan Carlos Corrales-Muñoz*

- Degradación de suelos ante tensión de corte cíclica** ..... 43  
*Rubén Ángel Galindo-Aires*

## CONTENTS

### Presentation

- Editorial. The meaning of the editorial profile in Journal Lámpsakos** ..... 8  
*Gabriel Jaime Correa-Henao*

### Cartas al editor

- Upper Magdalena-Colombia handling renewable energies** ..... 11  
*Ancízar Barragán-Alturo*

- Changing initiatives** ..... 14  
*César Alfonso Defrancisco-Larrañaga*  
*Christian Camilo Ortiz-López*

- Security in human information assets** ..... 17  
*Jorge Mario Cadavid-Aguirre*

### Artículos de investigación

- A glance at the transportation network Analysis in Cuba from the data point of view** ..... 21  
*Eduardo Sánchez-Ansola*  
*Laura Sánchez-Jiménez*  
*Carlos José de Armas-García*

- Genetic algorithm adaptation for the creation of routing trees into a wireless sensor network** ..... 34  
*Ángela María Rodríguez-Vivas*  
*Juan Carlos Corrales-Muñoz*

- Soil degradation under cyclic shear stress** ..... 43  
*Rubén Ángel Galindo-Aires*

<b>Una propuesta de T-Learning: usando planificación, Inteligencia artificial y razonamiento ontológico .....</b>	<b>52</b>
<i>Ingrid-Durley Torres-Pardo</i>	
<i>Jaime Alberto Guzmán-Luna</i>	
<i>Miguel A. Becerra</i>	
<b>Interfaz Cerebro Computador, basado en señales EEG para el control de movimiento de una prótesis de mano usando ANFIS .....</b>	<b>59</b>
<i>Alexandra Bedoya-Rojas</i>	
<i>Jessica Giraldo-Leiva</i>	
<i>Ingrid-Durley Torres-Pardo</i>	
<i>Miguel A. Becerra</i>	
<b>Construcción de un aplicativo para el control de activos tecnológicos al interior de una organización: beneficios y experiencias .....</b>	<b>65</b>
<i>Adrián Alberto Jaramillo-Arango</i>	
<i>Gabriel Jaime Correa-Henao</i>	
<b>Enseñanza en la ingeniería de software: aproximación a un estado del arte .....</b>	<b>76</b>
<i>Lina María Montoya-Suárez</i>	
<i>Elizabeth Pulgarín-Mejía</i>	
<b>Seguridad energética y protección de infraestructuras críticas .....</b>	<b>92</b>
<i>Gabriel Jaime Correa-Henao</i>	
<i>José María Yusta-Loyo</i>	

<b>A proposal of T-Learning: using artificial intelligence planning and ontological reasoning .....</b>	<b>52</b>
<i>Ingrid-Durley Torres-Pardo</i>	
<i>Jaime Alberto Guzmán-Luna</i>	
<i>Miguel A. Becerra</i>	
<b>Brain Computer Interface based on EEG signals for motion control of hand prosthesis using ANFIS .....</b>	<b>59</b>
<i>Alexandra Bedoya-Rojas</i>	
<i>Jessica Giraldo-Leiva</i>	
<i>Ingrid-Durley Torres-Pardo</i>	
<i>Miguel A. Becerra</i>	
<b>Construction of a software application for management and control of technology assets within a firm organization: benefits and experiences .....</b>	<b>65</b>
<i>Adrián Alberto Jaramillo-Arango</i>	
<i>Gabriel Jaime Correa-Henao</i>	
<b>Software engineering teaching: a state-of-art approach .....</b>	<b>76</b>
<i>Lina María Montoya-Suárez</i>	
<i>Elizabeth Pulgarín-Mejía</i>	
<b>Energy Security and Critical Infrastructure Protection .....</b>	<b>92</b>
<i>Gabriel Jaime Correa-Henao</i>	
<i>José María Yusta-Loyo</i>	

## PRESENTACIÓN

La revista Lámpsakos es una publicación adscrita a la Facultad de Ingenierías de la Fundación Universitaria Luis Amigó, Medellín, Colombia. Tiene por objetivo divulgar artículos originales e inéditos como resultados de investigación científica y tecnológica de las áreas de ingenierías. Fundada en 2009, la revista tiene una periodicidad semestral (se publica en junio y diciembre) con alcance nacional e internacional, y una circulación online de libre acceso, bajo estándares de rigor científico y de calidad editorial.

Los temas tratados en la Revista se dirigen a todas las personas de los espacios académicos, investigadores, científicos y profesionales de los diferentes sectores educativos y productivos y empresariales que desarrollan sus actividades en torno a la Inge-

nería. Los trabajos que publica corresponden a aspectos de desarrollo científico, profesional y tecnológico en áreas como ingeniería informática, sistemas de información, ingeniería de requerimientos, ingeniería electrónica, ingeniería eléctrica, sistemas inteligentes, control, automatización y robótica, ciberseguridad, ingeniería ambiental, gestión de recursos hidráulicos, gestión del agua, eficiencia energética, simulación de sistemas, investigación de operaciones, gestión del conocimiento en ingeniería, educación en ingeniería, gerencia de proyectos, control de procesos, química, desarrollo de materiales, termodinámica, mercados de la energía, física, nanotecnología, estrategias de mantenimiento industrial y modelos computacionales.

## PRESENTATION

*Lámpsakos* journal is a publication ascribed to the Faculty of Engineering of Fundación Universitaria Luis Amigó, in the city of Medellín, Colombia. It aims to divulge original and unpublished articles as a result of scientific and technological research in the areas of engineering. It is published twice a year (published in June and December) with national and international coverage. The journal is a free access online circulation magazine, published under standards of scientific rigor and editorial quality.

Topics covered in the journal are addressed to all persons in academic, researching, scientific and professional areas from different educational and productive sectors and firms whose activities are performed

around engineering. The journal publishes papers of scientific, professional and technological fields such as Computer Science, Information Systems, Requirements Engineering, Electronics Engineering, Electrical Engineering, Intelligent Systems, Control, Automation and Robotics, Cyber Security, Environmental Engineering, Water Resources Management, Water Management, Energy Efficiency, System Simulation, Operations Research, Engineering Knowledge Management, Education, Engineering, Project Management, Process Control, Chemistry, Materials Development, Thermodynamics, Energy Markets, Physics, Nanotechnology, Industrial Maintenance Strategies and Computational Models.

# EDITORIAL

## EL SIGNIFICADO DE LA LÍNEA EDITORIAL EN LA REVISTA LÁMPSAKOS

**Gabriel Jaime Correa-Henao**

*Facultad de Ingenierías  
Fundación Universitaria Luis Amigó  
Medellín, Colombia  
gabriel.correahe@amigo.edu.co*

Tengo el gusto de presentar la Edición 10 de la revista Lámpsakos, la cual está constituida por artículos originales con rigor científico. Los artículos seleccionados que se divulgan a través de la publicación cumplen con la línea editorial expuesta en el portal de la revista:

“La revista Lámpsakos es una publicación adscrita a la Facultad de Ingenierías de la Fundación Universitaria Luis Amigó, Medellín, Colombia. Tiene por objetivo divulgar artículos originales e inéditos como resultados de investigación científica y tecnológica de las áreas de ingenierías. Fundada en 2009, la revista tiene una periodicidad semestral (se publica en junio y diciembre) con alcance nacional e internacional, tiene circulación online de libre acceso, bajo estándares de rigor científico y de calidad editorial”.

Quiero aclarar que la línea editorial es explícita en mencionar que la evaluación de los artículos enviados por autores en diferentes ramas de la ingeniería, debe cumplir con requisitos de originalidad. Lo anterior implica que en la revista sólo se aceptan aquellos artículos que no se hayan divulgado anteriormente.

Algunas excepciones podrán aplicarse en el caso de manuscritos extraídos de trabajos de grado y tesis universitarias, así como resúmenes de trabajos que se hayan promocionado anteriormente como ponencias presentadas en eventos especializados dentro de la comunidad académica. En ese sentido, la revista Lámpsakos procura consolidarse como revista científica, siguiendo los mismos lineamientos que se aplican a otras publicaciones especializadas en la rama de la ingeniería, incluyendo las exigencias de los directorios de indexación en los cuales se encuentra inscrita la revista.

Los diferentes comités que asesoran a la revista (comité científico, comité editorial y comité arbitral) coinciden en la necesidad de garantizar la originalidad de los manuscritos; es decir, que aunque estén fundamentados en trabajos previamente publicados, pero sin contribuciones propias ni sustanciales, deberán ser rechazados directamente por el Editor. Esto puede ocurrir cuando se envía un manuscrito reescrito con las mismas conclusiones de trabajos previos o cuando simplemente se le cambian los datos en los casos de estudio.



Los estándares de rigor científico, mencionados en la línea editorial, implican que las conclusiones de los trabajos aquí presentados, deben describir contribuciones importantes e interesantes que sean de utilidad para los lectores de la revista en su futura vida profesional o para apoyar la realización de futuras investigaciones. Por tal razón, la originalidad, aunque es una condición necesaria, quizá resulte insuficiente para aceptar la publicación de un artículo, por motivaciones de utilidad o relevancia en el área de la Ingeniería.

Quiero recordar a los lectores y autores de nuestra publicación que la revista Lámpsakos se enfoca en la divulgación de aquellos manuscritos considerados como artículos de investigación científica y tecnológica, los cuales se definen como aquellos documentos que presentan los resultados originales de proyectos terminados de investigación. También son de alta incumbencia los artículos de reflexión, los cuales presentan resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.

Los artículos de revisión también se aceptan en la revista Lámpsakos, bajo la premisa de que estos presentan el análisis, sistematización e integración de resultados de investigaciones publicadas, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de

desarrollo. Lo anterior, a partir de la presentación cuidadosa de una revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias de calidad científica en temas específicos.

En esta edición de la revista Lámpsakos también se incluyen algunas cartas al editor, las cuales se entienden como unos artículos cortos que reflejan la línea de pensamiento propia de los autores, alrededor de un tema específico. En ese sentido, aunque el rigor científico asociado a dichos artículos es mínimo, suelen ser de interés para los lectores en la concepción de sus temas de investigación.

Extiendo la invitación a la comunidad académica para que se vincule a nuestra publicación, mediante el envío de sus artículos originales, con rigor científico. Sus trabajos pueden tener trascendencia dentro de las ramas de la Ingeniería, en la medida que proporcionen conclusiones para mejorar las actuales prácticas. Desde los comités científico y editorial manifestamos el interés de que los autores envíen discusiones relevantes en sus manuscritos, en el marco de los apartes más importantes para estas publicaciones: introducción, metodología, resultados y conclusiones. Un artículo interesante y bien estructurado facilitará la labor del editor y del comité arbitral en el proceso de evaluación y posible aceptación de los artículos.

## CARTAS AL EDITOR

## EL ALTO MAGDALENA- COLOMBIA DE LA MANO CON ENERGÍAS ALTERNATIVAS

### UPPER MAGDALENA-COLOMBIA HANDLING RENEWABLE ENERGIES

**Ancízar Barragán-Alturo, Ing.**

*Programa de Ingeniería Civil*

*Universidad Piloto de Colombia - Seccional Alto Magdalena*

*Girardot, Colombia*

*Aba19623@gmail.com*

[Recibido el 19-05-2013. Aprobado el 10-06-2013]

La trascendencia de las energías alternativas en el desarrollo sostenible, de cara a los procesos del siglo XXI, exige de la ingeniería investigaciones que enriquezcan la sustentabilidad en el contexto para las futuras generaciones, en el marco de la infraestructura y desarrollo de la ciudad región: línea de investigación del programa en la **UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA, SECCIONAL ALTO MAGDALENA-COLOMBIA**, no como una obligación oficial, sino como un requerimiento moral y ético de todo ciudadano, que ame la convivencia con los demás y con el medio ambiente sin dejar de lado el punto de equilibrio económico que redunde en lo social. Con este preámbulo, cifrado en lo más noble del espíritu humano, se propende por llamar la atención de los profesionales requeridos por las políticas del Gobierno Nacional, en Girardot-Colombia y la región: los ingenieros, para que en sus proyectos de vida referencien lo ambiental como una categoría de civilidad en el siglo XXI y no como una carga económica que les enreda el desarrollo de sus trabajos. Desde esta perspectiva es inminente cambiar la cultura del ingeniero, del cliente del ingeniero, de los gobernantes actuales, de la clase política, de los contratistas, del pueblo en general, respecto de lo ambiental y, por ende, del uso de las energías alternativas.

CUNDINAMARCA-COLOMBIA DE LA MANO CON ENERGÍAS ALTERNATIVAS, es un proyecto encaminado a romper paradigmas en los procesos de construcción de vivienda de interés social en la ciudad región, pues innova los planos arquitectónicos, la infraestructura, el impacto visual, el ambiente y los costos de ejecución del proyecto, ofreciendo un beneficio, a largo plazo, de forma integral; involucra disminuir la cuota de gas carbónico que se emana a la atmósfera por el uso de la energía convencional y permite solidarizarnos con el medio ambiente, en pro de adecuar la vivienda a las necesidades actuales, evitando al máximo incurrir en un impacto ambiental negativo, utilizando los tradicionales elementos para la construcción, pero montando una fuente de energía inagotable y limpia, autosostenible en las cubiertas de las viviendas y de los edificios [1]. Este artículo parte de una pregunta central que se articula con las ideas principales y con tres preguntas generadoras, tomadas del trabajo de grado GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA EN GIRARDOT Y LA REGIÓN: UNA OPCIÓN PARA EL BARRIO CORAZÓN DE CUNDINAMARCA [2]

- ¿Cuáles son las alternativas que permiten solucionar el problema del suministro de energía eléctrica en Cundinamarca, en el municipio de Girardot y la región a corto, mediano y largo plazo, con bajo impacto ambiental y bajos costos en la segunda década del tercer milenio?
- ¿Cuáles son los referentes nacionales e internacionales que permiten un análisis exhaustivo, en torno del empleo de la energía solar como alternativa de solución al problema del alumbrado público, en los contextos?
- ¿Cuáles son los factores para realizar un estudio financiero por estratos, de la implementación del alumbrado público en Girardot y la región para la viabilidad de esta propuesta?
- ¿Cómo implementar la utilización de células fotovoltaicas, a través de paneles solares, para la generación de energía eléctrica en Girardot y la región?

El desarrollo de las respuestas circunscribe la intencionalidad de este documento de generar una propuesta, a manera de alternativa de solución, que oriente a los ciudadanos de Girardot y la región en el uso de las energías alternativas sin prejuicios paradigmáticos infundados con doble propósito, los que suelen encadenar las decisiones de los usuarios de las energías convencionales suscritos a las empresas comercializadoras de la energía eléctrica, obligándolos a seguir cautivos de dichas empresas sin ni siquiera intentar, por un momento, averiguar los beneficios que traería a su economía el asumir las energías alternativas como generadoras de energía eléctrica.

**¿Cuáles son los referentes nacionales sobre el uso de la energía solar?** En Colombia, en el siglo XX, durante los años ochentas, las universidades y la empresa pública y privada tuvieron la expectativa de desarrollos sobre energía solar, en relación con los calentadores, placas y paneles, que permitieron a muchos profesionales interesarse por los desarrollos experimentales provenientes de Gaviotas, un proyecto interdisciplinario e interuniversitario que tenía su asiento en Los Llanos Orientales y era dirigido por la Universidad Nacional de Colombia.

Estos desarrollos tuvieron su máxima expresión a mediados de los ochentas en la aplicación masiva de calentadores en urbanizaciones en Medellín (Villa Valle de Aburrá) y Bogotá (Ciudad Tunal, Ciudad Salitre, Palacio de Nariño), en donde fueron instalados miles de calentadores, desarrollados y fabricados por el Centro Las Gaviotas. En esta misma época surgieron varias compañías nacionales en Bogotá, Manizales y Medellín que fabricaron e instalaron miles de calentadores solares de diversas capacidades en esas ciudades [3]. Muchas instituciones religiosas montaron calentadores solares en sus conventos y también alguna cadena hotelera (Hoteles Dann).

**¿Cuáles son las leyes que explican la energía térmica?** Pertenecen al marco de la termodinámica de la radiación e involucran subtemas como calor y temperatura: propagación del calor por radiación, Ley de Stefan Boltzman; Ley de Wien, radiancia, emitancia; leyes de Kirchoff y Planck, de la radiación del cuerpo negro [4]. A finales del siglo XIX una serie de experimentos pusieron de manifiesto que la superficie de un metal emite electrones cuando incide sobre él luz de la frecuencia suficientemente elevada: luz ultravioleta, luz violeta, luz azul. Este fenómeno se conoce con el nombre de efecto fotoeléctrico [5]. La existencia del efecto fotoeléctrico no debe sorprendernos, pues las ondas luminosas transportan energía y parte de la energía se concentra en un electrón de algún orbital del átomo de Bohr, sacándolo de dicho orbital y transfiriéndole energía cinética, aunque el fenómeno se reviste de rigurosidad para su entendimiento, pues exige de los saberes y leyes condensadas en la física cuántica y en la física del estado sólido [6]. Articular todos estos conocimientos de manera sistémica, en pos de conseguir el objetivo de determinar las alternativas de suministro de energía para los habitantes de Girardot y la región del Alto Magdalena, es producto de una rítmica tarea, cuan cadencia de mecánica armonía entre los conceptos teóricos y los tecnicismos propios de la investigación cualitativa que demuestran que los proyectos de producción de energía fotovoltaica son la solución y que no constituyen costos onerosos del servicio, cuya inversión suele ser recuperable en menos de tres años, de acuerdo con el consumo de la vivienda.

## CONCLUSIONES

La instalación de los paneles solares en las cubiertas de las casas no constituiría ningún obstáculo, pues en un 90% la vivienda es de material resistente (paredes en ladrillo, bases en hormigón, techo reforzado con estructuras de hierro, teja metálica y/o plancha de concreto).

La radiancia solar en la zona del Alto Magdalena oscila entre 4,5kwh/m<sup>2</sup> y 6,05kwh/m<sup>2</sup>, cifras que garantizan la generación de energía fotovoltaica en inmejorables condiciones y a muy bajos costos [2]

Los planteamientos paradigmáticos insertados en el inconsciente colectivo de los usuarios de la energía convencional: “la implementación de la energía fotovoltaica es onerosa, debido a los altos costos de los paneles”, se han demostrado erróneos, por razones de los bajos costos de dichos artefactos y considerando que se les cobra un bajo arancel por colaborar con la mitigación del impacto ambiental.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. QUIÑONES, ENERGIAS ALTERNATIVAS, REFINOR : REFINOR S.A , 2006.
- [2] H. Rodríguez, «Desarrollo de la energía solar en Colombia y sus perspectivas,» Revista de Ingeniería de la Universidad de los Andes, pp. 73-90, 2008.
- [3] J. A. GARCIA, «RADIACION DEL CUERPO NEGRO,» REVISTA DE ASTRONOMIA , p. 40, 2008.
- [4] A. BEISER, Conceptos de Física Moderna, Ciudad de Mexico, Mexico : Prensa Tecnica S.A, 1977.
- [5] D. BERMÚDEZ, «GENERACIÓN DE ENERGÍA FOTOVOLTAICA,» Biblioteca UNIPILOTO, Girardot, 2012.
- [6] M. SPIEGEL, ESTADISTICA, Cali: Carvajal y cia., 1970.

## INICIATIVAS PARA EL CAMBIO

### CHANGING INITIATIVES

**César Alfonso Defrancisco-Larrañaga, Ing.**

*Programa de Ingeniería Civil  
Universidad Piloto de Colombia - Seccional Alto Magdalena  
Girardot, Colombia  
cesardefco1@hotmail.com*

**Christian Camilo Ortiz-López, Est.**

*Programa de Ingeniería Civil  
Universidad Piloto de Colombia - Seccional Alto Magdalena  
Girardot, Colombia  
sapiga10@hotmail.com*

[Recibido el 19-05-2013. Aprobado el 10-06-2013]

La garantía de que nuestras futuras generaciones tengan un entorno de vida depende de una reacción urgente en cuanto a medidas para conservar y renovar los recursos naturales, entre ellos los cada vez más disminuidos recursos hídricos. En este sentido Colombia y otros países, debe seguir ejemplos al interior y exterior de su territorio e incorporar, mediante la investigación, sistemas permanentes de reutilización y tratamiento de aguas grises, así como de aprovechamiento de las aguas lluvias. Al contrario de lo que se cree, estos sistemas no implican un alto costo de inversión y es más común encontrar ejemplos de su implementación ingeniosa y con buenos resultados en cuanto al ahorro en el consumo de agua potable, en viviendas, caseríos, ranchos apartados y en contacto con la naturaleza.

Vivimos en un estado ilusorio de bienestar colectivo. Una cosa es entender que el agua es invaluable: saber que en el agua estuvo, está y estará el origen, transcurrir y porvenir de nuestra vida o que el agua es el “componente mayoritario de los seres vivos, pues entre el 65 y el 95% del peso de la mayor parte de las formas vivas es agua” [1], y otra, es actuar en consecuencia. Hay una pérdida del sentido común sobre lo simple; una dificultad para distinguir

ante decisiones trascendentales: ¿qué es renovable y qué no?, ¿qué es vital y qué no lo es? Es momento de saber que a pesar de la constancia del ciclo del agua, y a pesar de nuestra falsa percepción de que ésta es infinita, su disponibilidad disminuye cada día. Vivimos la crónica de una muerte anunciada; sin embargo, aún tenemos oportunidad de darle un giro a la historia.

A través de diferentes prácticas de reutilización y tratamiento de aguas grises, así como de aprovechamiento de las aguas lluvias, es posible generar grandes impactos a nivel ambiental y a la vez económico.

No obstante, a pesar de su importancia, el concepto de aguas grises es generalmente desconocido. De hecho, en Colombia, la reutilización de aguas grises es un campo muy poco explorado y mucho más en edificaciones públicas.

El concepto de aguas grises se entiende en contraste con el de aguas blancas, las cuales son de costo y calidad mayor que no deberían malgastarse en áreas como las cisternas de los baños, el lavado del auto o los regadíos, etc., pues éstos no requieren de agua de esta calidad [2].

A lo largo y ancho del mundo, el gasto promedio de una persona es de 100 a 120 litros de agua potable por día. De esa agua, que es la usualmente empleada para la limpieza corporal y el lavado de ropa, podrían aprovecharse entre 50 y 60 litros provenientes de los desagües que se generan a partir de estas actividades, a los que se les conoce como aguas grises. Aunque no hay unanimidad en cuanto al concepto, que puede variar de nación a nación, hay aspectos generalmente aceptados: "Aguas residuales domésticas sin tratar, que no han entrado en contacto con residuos del inodoro. Incluye: el agua de bañeras, duchas, lavabos, y el agua de las lavadoras. No incluye: las aguas residuales procedentes del fregadero, lavaplatos, o lavandería" [3]. Así mismo se definen como: "Aguas ya utilizadas a excepción de las que tengan grasas o contenidos fecales" [4].

Las aguas grises presentan tres ventajas principales: 1] evitan un mayor tratamiento para el reemplazo del agua potable. 2] Su grado de contaminación es relativamente bajo. 3] La implementación de sistemas de reutilización y tratamiento de aguas grises no corre prácticamente ningún riesgo sanitario.

La Escuela Politécnica Nacional de Ecuador, con sede en Quito, realizó estudios que comprueban la eficacia de las aguas grises tratadas para abastecer inodoros. Dichas pruebas demostraron que estas aguas son totalmente aptas para cumplir el objetivo principal de reúso [5]. Características como color levemente oscuro, cierta viscosidad, olor semejante al de un detergente común, baja cantidad de espuma, ausencia de grasas visibles y ausencia de residuos sólidos, son suficientes para que sean reutilizables.

Hay diversos materiales con los que se puede llevar a cabo el tratamiento de las aguas grises que, sean de origen natural o fabricados industrialmente, representan un bajo costo de adquisición, implementación y mantenimiento. Se suelen emplear el carbón activado, la grava, la arena, la cal, entre otros. Dependiendo del presupuesto de elaboración y de la calidad de agua que se desee obtener, lo indicado es realizar procesos de filtración lenta. Se pueden, incluso, y para mayor eficacia, hacer combinaciones de materiales por capas, complementando adicionalmente el sistema con trampas de grasas o filtros de malla.

Por su parte, las aguas lluvias son las aguas almacenadas en cisternas o recipientes separados del agua potable y destinadas a usos distintos al de consumo humano [6]. Con el empleo de estas aguas en zonas

urbanas se evitaría la extracción de agua de fuentes naturales durante la época de lluvias y los costos de operación y mantenimiento de las redes municipales se reducirían. Los beneficios no son menores en zonas rurales: "El agua lluvia puede ayudar a los hogares a ser autosuficientes en zonas en las que no hay conexión a redes municipales y, así, contribuir al ahorro del vital líquido y disminuir la demanda sobre el suministro público." [7].

Hay varios ejemplos de sistemas de aprovechamiento de aguas grises y aguas lluvias de los que aprender, los cuales evidencian cifras de ahorro crecientes sin aumento de los costos de implementación, y posibilidad de adoptarse de manera complementaria.

A nivel internacional tenemos el caso de Singapur, país de recursos naturales limitados y con una creciente demanda de agua, que ha buscado fuentes alternativas y ha innovado en cuanto a métodos para el aprovechamiento del recurso. Dado que aproximadamente el 86% de su población vive en edificios de apartamentos, los techos de estas edificaciones son utilizados para captar aguas lluvias.

Otro ejemplo sobresaliente es el complejo turístico Hotel Golden Bahía en Tossa de Mar [Gerona]; allí se instalaron dos depósitos de 25 m<sup>3</sup> de capacidad para el almacenamiento de las aguas grises producidas por los mismos habitantes del lugar, reutilizando así 50 m<sup>3</sup> diarios de agua. También está el caso del campo de fútbol en Vilanova i La Geltrú [Barcelona], en donde mediante la instalación de un depósito enterrado de 16 m<sup>3</sup> para la reutilización de las aguas grises procedentes de las duchas y la recolección de las aguas pluviales, el agua depurada alimenta las cisternas de los inodoros y riega el campo de fútbol [8].

A nivel Latinoamérica existe la experiencia de varias instituciones educativas de Chile, con cerca de 800 estudiantes en cada plantel, que hicieron uso de sistemas de tratamiento de aguas grises, reutilizando únicamente las del lavamanos y empleándolas para riego. Con ello alcanzaron una reducción promedio mensual del 35% en el consumo de agua potable [9]. Este logro admirable responde, en gran parte a que el gobierno del país, junto con su departamento de educación ambiental y participación ciudadana y la comisión nacional del medio ambiente, se dieron a la creación de una guía a partir de la sistematización de premisas gestionadas por instituciones educativas en diferentes regiones del territorio chileno. También se conocen iniciativas en Ecuador y México.

En Colombia universidades como la Industrial de Santander, en su facultad de ingenierías físico-químicas, han estudiado y comprobado la seguridad y bondades que ofrece el sistema de recolección y reutilización de aguas grises y aprovechamiento de aguas lluvias, en términos de optimización del uso de los recursos hídricos. De forma similar lo han hecho la Universidad Nacional de Colombia en Bogotá y el Grupo de Investigación de la Gestión del Ambiente para el Bienestar Social de la Escuela de Ingeniería de Antioquia, en cooperación con la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de Medellín. Aplicaciones visibles de estos conocimientos están en la cadena de almacenes Alkosto que en al menos dos de sus sedes, en Villavicencio y Bogotá, aprovecha y trata las aguas lluvias recogidas y con ellas satisface un alto porcentaje de la demanda actual de agua potable que requieren las edificaciones.

Es notable así el grado en que este tipo de sistemas permite la fácil recuperación de los costos de inversión, instalación y mantenimiento [10]. Lo más asombroso es que mientras aumente la tarifa de consumo, mayor resulta ser el ahorro. Latinoamérica podría ahorrar trillones de litros de agua potable pero para lograrlo hace falta emprender una transformación mental, y esta necesidad nos lleva a recordar las palabras del “libertador” Simón Bolívar: “Un pueblo ignorante es un instrumento ciego de su propia destrucción”.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. V. Jorge. *Teoría y práctica de la purificación del agua*. Bogotá: McGraw Hill, 2000, p.15.
- [2] “Reciclaje de aguas grises – Una solución eficaz en ecología y economía.” Dipl., Ing., Tors-ten Lingner.
- [3] CALIFORNIA GRAYWATER STANDARTS, 1995.
- [4] ORDENANZA MUNICIPAL PARA EL AHORRO DEL AGUA, 2005.
- [5] C. R. Marco Vinicio (2009, Sep). *Diseño y construcción de un sistema electromecánico para reciclar aguas grises y conducirlos a los servicios higiénicos en una casa promedio* [online]. Escuela Politécnica Nacional de Ecuador con sede en Quito. Disponible en: <http://eelal-nx01.epn.edu.ec/bitstream/15000/1716/1/CD-2754.pdf>
- [6] B. S. José Alejandro, G. G. Miguel Ángel y O. M. Rafael Orlando. “Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia.” in *VI SERRA - Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua*, João Pessoa [Brasil], junio 2006, pp. 1-12.
- [7] H. A. Gustavo, J. T. Eduardo David y P. R. Zeus Enrique (2011, Jun). *Sistema automático recuperador de agua pluvial y aguas grises* [online]. Disponible en: <http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/10562/1/72.pdf>
- [8] R. V. Julio *Reutilizar el agua, Ecología de la vida cotidiana*. Centro Nacional de Educación Ambiental, CENEAM [online]. Disponible en: [http://www.magrama.gob.es/es/ceneam/recursos/documentos/agua02reutilizar\\_tcm7-13506.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/ceneam/recursos/documentos/agua02reutilizar_tcm7-13506.pdf)
- [9] L. T. Camilo (2009). *Guía para la reutilización de aguas grises de lavamanos en instituciones educativas, Ing. Med. Amb., Duoc uC - Sede Valparaíso, Santiago, Chile*, 2009.
- [10] Sociedad Colombiana de Ingenieros. *Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología*, [online]. Disponible en: [fluidos.eia.edu.co](http://fluidos.eia.edu.co)



## SEGURIDAD EN ACTIVOS DE INFORMACIÓN HUMANOS

### SECURITY IN HUMAN INFORMATION ASSETS

**Jorge Mario Cadavid-Aguirre, Ing.**

*Fundación Universitaria Luis Amigó  
Medellín, Colombia  
jmariocadavid@gmail.com*

[Recibido el 10-05-2013. Aprobado el 10-06-2013]

A partir del año 2010 América Latina ha sido el nuevo objetivo en la mira para los ciberdelincuentes, ya que el crimen cibernético marcó una subida de hasta un 40% en 2012 [1]. Si se hace un análisis más detallado mes a mes se tiene que en febrero, mediante el uso de novedosas técnicas de Ingeniería Social —MSIL/Agent.NKY, mejor conocido como Poker Agent y el falso video sobre Justin Bieber con Selena Gómez—, se hicieron significativos estragos en las redes sociales [2]. En marzo, ESET Latinoamérica detectó un correo electrónico que simulaba provenir de Mercado Libre, en donde se informaba que el destinatario “ha sido suspendido para operar”; se trataba pues de un caso de ingeniería social y *phishing* o suplantación de identidad. [3] Finalmente el mes pasado, nuevamente el protagonismo fue para los ataques de ingeniería social y *phishing*; las amenazas más destacadas fueron suplantación a la Banca en Panamá y el famoso ataque a la agencia de prensa The Associated Press (AP) [4], hecho que repercutió incluso en Wall Street.

El éxito de este tipo de técnicas, es la explotación de vulnerabilidades no en la parte técnica ni tecnológica de la organización, sino en el factor humano. Se aprovecha el conocimiento de la parte psicoso-

cial del individuo y de metodologías de manipulación para explotar sentimientos como la confianza, la curiosidad, la inocencia, la desinformación, la atracción física y la sexualidad, la reciprocidad, las ganas de ayudar, la lástima y la aprobación social entre otros muchos.

Teniendo en cuenta el contexto latinoamericano descrito anteriormente, se realizó la ponencia orientada a concientizar al usuario final en materia de seguridad de la información.

#### **INGENIERÍA SOCIAL; EXPLOTANDO A LOS HUMANOS.**

“Hecha la ley, hecha la trampa”. Conforme avanza la tecnología y se mejoran y reestructuran los sistemas de seguridad, así también, a la par con esta, los atacantes avanzan rápidamente en el desarrollo de estrategias y formas de evadir los perímetros de seguridad de las empresas, apoyados en nuevos vectores de ataque o mejorando los ya existentes; por ejemplo el caso de las APT (*Advanced Persistent Threat*) que son amenazas persistentes como la in-

geniería social. Esta modalidad de fraude no es algo nuevo, recordemos la famosa estafa nigeriana, timo 419 o timo nigeriano, donde por medio del correo estafaban a las personas inocentes. Las sumas solicitadas son bastante elevadas, pero insignificantes comparadas con la suma de dinero o el gran premio que las víctimas esperan recibir. Pues bien, este tipo de engaños ahora usan las TICS para lograr su cometido.

## PERO ENTONCES, ¿QUÉ ES LA INGENIERÍA SOCIAL?

Podría definirse como la explotación de la seguridad de un sistema, orientada al factor humano, no a la parte técnica ni tecnológica de la organización, mediante el uso de técnicas de manipulación y engaños para obtener información sensible. La información sensible no es más que datos “intransferibles” que identifican a una persona en la red o en la vida real. Según laboratorios ESET “La Ingeniería Social puede definirse como una acción o conducta social destinada a conseguir información de las personas cercanas a un sistema. Es el arte de conseguir de un tercero aquellos datos de interés para el atacante, por medio de habilidades sociales. Estas prácticas están relacionadas con la comunicación entre seres humanos”. [5].

## ¿CUÁL ES LA RELACIÓN ENTRE LA INGENIERÍA SOCIAL Y LA SEGURIDAD INFORMÁTICA?

La seguridad de la información busca mantener la integridad, confidencialidad y disponibilidad de la información mediante estrategias y tecnologías que protejan los activos de la misma. Hay que entender que las personas deben ser consideradas como dichos activos, puesto que conocen procesos críticos y almacenan datos e información sensible. Cuando se realiza un ataque dirigido a infraestructura con herramientas y técnicas avanzadas de penetración de sistemas y *hacking*, este demanda mucho tiempo, dinero y esfuerzo.

Mientras que cuando un ataque es dirigido a los activos de información Human O.S. (*Human Operate System*), mediante métodos de ingeniería social, el ciberdelincuente evitará todos los sistemas de control y tecnologías de seguridad haciéndole un *bypass* al sistema de seguridad por completo.

Por lo tanto, las empresas pueden comprar las mejores soluciones, las más costosas del mercado –software o hardware– y tener los mejores controles de seguridad para proteger sus activos, pero no será de gran utilidad si los empleados no son conscientes del valor de la información con la que trabajan. “la seguridad de una compañía es tan fuerte como el eslabón más débil de la cadena”. De nada sirve tener el mejor Firewall, IDS, HoneyPOT, Antivirus, HIPS, Endpoint Protection, ni conexiones cifradas, si un usuario inocente da clic a cualquier link e instala software de sitios de dudosa confianza. Esas malas prácticas arrojan por la ventana la seguridad de miles de dólares de la empresa.

## CONCLUSIONES

Es muy importante tener en cuenta, dentro de las estrategias de seguridad de la empresa, la concienciación, capacitación y educación del usuario final. Hay que enseñarles a identificar el valor de la información con la que trabajan diariamente, la importancia de sus acciones y hábitos para mantener un nivel adecuado de seguridad.

El éxito de los desarrolladores de malware, virus y spammers depende casi en su totalidad de su capacidad de disfrazar el malware y el spam con ingeniería social. Según Microsoft el 45% del malware necesita interacción con el usuario [5]. La idea es subir un poco el nivel de paranoia, ser muy prudentes, no dar clic a cuanto link aleatorio llega, no dar permisos a cuanto proceso lo solicita, leer muy bien y pensar antes de actuar. La mayoría de usuarios no leen, solo ven colores.

En cuestión de seguridad hay que ser muy proactivos, el subestimar un ataque te hace vulnerable a este, porque no se está preparado. La protección anticipada ahorra tiempo, dinero y esfuerzo al prevenir pérdida de información de manera proactiva, en lugar de los costos generados a partir de las respuestas a un incidente en forma reactiva.

Para asegurar el factor humano contra la ingeniería social es muy necesario fomentar, mediante la educación, comportamientos, conductas y hábitos seguros tanto en el manejo de la información como en el de la navegación a través de Internet. Al final el usuario estará en la capacidad de reconocer y evitar ataques de tipo ingeniería social y *phishing*. En América Latina el 96% de las empresas considera que la importancia de la educación es alta o esencial [6].

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Trend Micro.(2013). “Latin American and Caribbean Cybersecurity Trends and Government Responses” [Online]. Disponible en: <http://www.trendmicro.com/cloud-content/us/pdfs/security-intelligence/white-papers/wp-tendencias-en-la-seguridad-cibernetica-en-america-latina-y-el-caribe-y-respuestas-de-los-gobiernos.pdf>
- [2] ESET Latinoamérica.(2013, Feb). Laboratorio “Blog Archive” Resumen de amenazas. Disponible en: <http://blogs.eset-la.com/laboratorio/2013/02/28/resumen-amenazas-febrero-2013>
- [3] ESET Latinoamérica. (2013, Mar). Laboratorio “Blog Archive” Resumen de amenazas. Disponible en: <http://blogs.eset-la.com/laboratorio/2013/04/04/resumen-amenazas-marzo-2013>
- [4] ESET Latinoamérica. (2013, Ab). Laboratorio “Blog Archive” Resumen de amenazas. Disponible en: <http://blogs.eset-la.com/laboratorio/2013/05/02/resumen-amenazas-abril-2013/>
- [5] Microsoft Security. (2011). Intelligence Report volume 11. Disponible en: <http://www.microsoft.com/en-us/download/details.aspx?id=27605>
- [6] ESET. (2012). Prensa – Security Report Latam. Disponible en: <http://www.eset-la.com/pdf/prensa/informe/eset-report-security-latinoamerica-2012.pdf>

## ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN

## UNA MIRADA AL ANÁLISIS DE REDES DE TRANSPORTE EN CUBA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LOS DATOS

### A GLANCE AT THE TRANSPORTATION NETWORK ANALYSIS IN CUBA FROM THE DATA POINT OF VIEW

**Eduardo Sánchez-Ansola, Ing.**

*Facultad de Ingeniería Informática  
Instituto Superior Politécnico  
José Antonio Echeverría  
La Habana, Cuba  
esancheza@ceis.cujae.edu.cu*

**Laura Sánchez-Jiménez, Ing.**

*Facultad de Ingeniería Informática  
Instituto Superior Politécnico  
José Antonio Echeverría  
La Habana, Cuba  
lsanchez@ceis.cujae.edu.cu*

**Carlos José de  
Armas-García, Ing.**

*Complejo de Investigaciones  
Tecnológicas Integradas  
Instituto Superior Politécnico  
José Antonio Echeverría  
La Habana, Cuba  
cjdearmas59@gmail.com*

(Recibido el 20-04-2013. Aprobado el 16-06-2013)

**Resumen.** En la actualidad, la mayoría de las actividades de la sociedad humana se encuentran en un proceso de informatización. Servicios públicos tales como: hospitales, cuerpos de bomberos, policía, empresas de transporte, entre otros, pueden usar estos procesos para mejorar la calidad de los servicios que brindan. Entre las principales herramientas que soportan la informatización de la sociedad se encuentran los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDE), que apoyan la toma de decisiones en la solución de diversos problemas actuales, a partir de la manipulación de datos espaciales. Países en vías de desarrollo, como Cuba, no están exentos de la informatización de su sociedad. Este artículo presenta un estudio de los datos y herramientas actuales para el uso del análisis de redes viales o de transporte en Cuba. El uso de estos permitiría mejorar los servicios generales de transportación por vía terrestre en las ciudades cubanas, logrando un significativo ahorro de combustible. El resultado más importante obtenido en este trabajo es que el uso de los datos de redes de transporte actuales de Cuba, arroja similares resultados en todas las herramientas analizadas, siendo factible el uso de cualquiera de estas, según el contexto donde se deseen utilizar.

**Palabras clave:** Análisis de redes viales; bases de datos espaciales; camino mínimo; datos espaciales; sistemas información geográfica.

**Abstract.** At present times, most of the activities of human society are in a process of computerization. This means that public services such as hospitals, fire departments, police, transport companies, among others, can use these processes in order to improve the quality of services they provide. Among the main tools that support the computerization of society are Geographic Information Systems (GIS) and Spatial Data Infrastructures (SDI) that support decision making for the solution of several problems using existing spatial data. Developing countries, such as Cuba, are not exempt from the computerization of their society, so this paper presents a study of current data and systems for the use of road or transport network analysis. The use of these data allows improving of general transportation services among Cuban cities, and thus achieving significant fuel savings. Most significant result of this paper is that all analyzed system throws similar result using Cuban transportation network data. Using any of those systems depends on the context of use.

**Keywords:** Network analysis; shortest path; spatial databases; spatial data; geographic information systems

## 1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la humanidad en las últimas décadas, ha ido en ascenso de forma exponencial. Una de las áreas que más rápido evoluciona es la de las Tecnologías de Información y Comunicaciones, extremadamente útil para optimizar procesos, economizar recursos y humanizar el trabajo. Actualmente no se concibe una sociedad o país en la que no exista información digital o datos digitales.

Los datos digitales incluyen todo tipo de información, ya sea de carácter personal, general, privada o pública, por lo que todas las áreas de la sociedad están involucradas en su creación, mantenimiento y uso, y con este último se benefician de disímiles formas. En la actualidad un gran porcentaje de esta información está acompañada por información geográfica o datos espaciales [1] que no son más que un conjunto de elementos que permiten localizar y visualizar, sobre un mapa, cierta información en cualquier lugar del planeta, mediante coordenadas geográficas, eventos, sucesos o fenómenos de interés para una organización, entidad o persona en sentido general [2].

Para la manipulación de los datos espaciales fueron creados los Sistemas de Información Geográfica (SIG), definiéndose estos como: “un potente conjunto de herramientas para recolectar, almacenar, recuperar a voluntad, transformar y presentar datos espaciales procedentes del mundo real” [3]. Sin embargo, una definición más aceptada es la redactada por el NCGIA (*National Centre of Geographic Information and Analysis*): “un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión” [4].

Como puede apreciarse los SIG son herramientas que permiten la creación y manipulación de datos espaciales por cualquier entidad o persona que tenga el conocimiento mínimo necesario para manipularlos, por lo cual se han convertido en instrumentos realmente útiles para apoyar la toma de decisiones en la solución de diferentes problemas de la sociedad. Algunos de estos problemas están relacionados con el transporte y pueden plantearse situaciones como: ¿cuál es la ruta más corta entre la locación A y la locación B?, ¿cuál es el área de servicio de la Estación de Bomberos #1?, ¿cuáles ambulancias pueden responder más rápido a un accidente?, o

¿cómo minimizar el costo de transportación de una flota de vehículos? A cada una de estas situaciones se le puede dar respuesta a través del análisis de redes viales, elemento de mayor impacto de los SIG en la sociedad [1].

Mediante el uso de los diferentes tipos de análisis de redes viales existentes pueden ser resueltas una gran variedad de interrogantes como las vistas anteriormente que, si se plantean del modo adecuado, permiten reducir costos y economizar recursos como el combustible, dedicado a la transportación, o el tiempo de viaje de una persona. Por estas y otras razones el análisis de redes viales se torna una herramienta de gran importancia en muchas ciudades y países del mundo —no excluyendo a países en vías de desarrollo— que serían muy beneficiados a partir de los resultados obtenidos de dicho análisis.

Es importante mencionar que el análisis de las redes de transporte consta de varios elementos fundamentales y que cada uno de estos, puede ser perfeccionado en pos de obtener mejores resultados. Uno de los elementos fundamentales son los datos sobre la red.

Los datos útiles para el análisis de redes de transporte en Cuba son generados por el Grupo Empresarial GEOCUBA, al igual que el resto de los datos espaciales oficiales. Sin embargo, estos datos poseían una estructura que hacía complejo su uso para cualquier tipo de análisis. Actualmente este grupo empresarial se encuentra realizando una reestructuración de los datos geográficos de Cuba, a partir de un modelo de datos que sí incluye todas las características necesarias para realizar distintos análisis espaciales [5].

Además de los datos generados por GEOCUBA, existen otros no oficiales y, por lo tanto, con cierto nivel de incertidumbre sobre su calidad. Este es el caso de los datos distribuidos por el proyecto colaborativo OpenStreetMap (OSM) dedicado a la creación y distribución de datos vectoriales de todo el planeta, incluyendo a Cuba. Estos datos están disponibles en [6].

En los últimos tiempos en Cuba se ha realizado un conjunto de investigaciones y trabajos en la temática del análisis de redes de transporte, haciendo uso de los SIG; sin embargo, en la mayoría de estos trabajos o no se reporta qué datos fueron utilizados o se hace uso de datos no oficiales de Cuba.

Este trabajo está centrado en el análisis de la solución del problema: “¿Cuál es la ruta más corta entre la locación A y la locación B?”; es decir, encontrar el camino mínimo en una red vial a partir de un par de localizaciones geográficas. La solución de este problema no solo brinda una utilidad directa a los usuarios, sino que también puede ser utilizada como datos de entrada o datos iniciales en la solución de otros problemas antes mencionados.

El objetivo de este trabajo consiste en darle respuesta a tres preguntas:

1. ¿Qué características necesitan los datos para poder realizar con ellos un correcto análisis de redes de transporte?
2. ¿Pueden ser utilizados los datos actuales de Cuba para obtener soluciones de calidad?
3. ¿Cuáles herramientas actuales permitirían obtener mejores resultados?

Según la situación descrita anteriormente, el principal aporte de este trabajo es la utilización de los últimos datos espaciales oficiales de Cuba, específicamente de la provincia La Habana, para comprobar su utilidad en la obtención de resultados significativos en el análisis de redes viales, a partir de algunas de las herramientas más utilizadas en la actualidad.

## 2. EL PROBLEMA DEL CAMINO MÍNIMO

En la teoría de grafos, el problema del camino más corto o camino mínimo consiste en encontrar un camino entre dos vértices (o nodos), de tal manera que la suma de los pesos de las aristas que lo constituyen sea mínima [7], [8]. Un ejemplo es encontrar el camino más rápido para ir de una ciudad a otra en un mapa. En este caso, los vértices representan las ciudades y las aristas las carreteras que las unen, cuya ponderación viene dada por el tiempo que se emplea en atravesarlas.

Dado un grafo ponderado (un conjunto  $V$  de vértices, un conjunto  $E$  de aristas y una función de variable real ponderada  $f: E \rightarrow R$ ) y un elemento  $v \in V$ , encuentra un camino  $P$  de  $v$  a  $v' \in V$ , tal que la función (1) es el mínimo entre todos los caminos que conectan  $v$  y  $v'$ :

$$\sum_{p \in P} f(p) \quad (1)$$

Los algoritmos más importantes para resolver este problema son:

Algoritmo de Dijkstra: definido por primera vez por Edsger Dijkstra en 1959 [7]. Este resuelve el problema del camino mínimo entre dos vértices, desde un origen y un único destino [9].

Este algoritmo consiste en ir explorando todos los caminos que parten del vértice origen y que llevan a todos los demás vértices; cuando se obtiene el camino mínimo desde el vértice origen al vértice destino, el algoritmo se detiene. El algoritmo es una especialización de la búsqueda de costo uniforme [10] y, como tal, no funciona en grafos con aristas de coste negativo. En el siguiente pseudocódigo se describen los pasos que sigue el algoritmo de Dijkstra para encontrar la ruta más corta [11]:

1. Procedure *dijkstra* ( $w, a, z, L$ )
2.  $L(a) := 0$
3. for todos los vértices  $x \neq a$  do
4.  $L(x) := \infty$
5.  $T :=$  conjunto de todos los vértices
6. //  $T$  es el conjunto de vértices cuya distancia
7. // más corta a  $a$  no ha sido determinada
8. while  $z \in T$  do
9. begin
10. elegir  $v \in T$  con  $L(v)$  mínimo
11.  $T := T - \{v\}$
12. for cada  $x \in T$  adyacente a  $v$  do
13.  $L(x) := \min \{L(x), L(v) + w(v,x)\}$
14. end
15. end *dijkstra*

Algoritmo de Búsqueda A\*: presentado por primera vez en 1968 por Peter E. Hart, Nils J. Nilsson y Bertram Raphael [12]. Este algoritmo resuelve el problema del camino mínimo entre un par de vértices, usando una heurística para intentar agilizar la búsqueda [9].

También existen otros algoritmos para resolver el problema del camino mínimo, entre los que se encuentran:

Algoritmo de Bellman - Ford, que resuelve el problema del camino mínimo desde un origen, si la ponderación de las aristas es negativa [13].

Algoritmo de Floyd - Warshall, que resuelve el problema del camino mínimo entre todos los vértices[8], [13], [14].

Algoritmo de Johnson, que resuelve el problema del camino mínimo entre todos los vértices y puede ser más rápido que el de Floyd - Warshall en grafos de baja densidad [14].

Una de las aplicaciones de los algoritmos para encontrar el camino mínimo es encontrar direcciones de forma automática entre localizaciones físicas, tales como direcciones en mapas callejeros.

Si un algoritmo representa una máquina abstracta no determinista como un grafo, donde los vértices describen estados y las aristas posibles transiciones, el algoritmo del camino mínimo se usa para encontrar una secuencia óptima de opciones para llegar a un cierto estado final o para establecer límites más bajos en el tiempo necesario para alcanzar un estado dado. Por ejemplo, si los vértices representan los estados de un rompecabezas, como el Cubo de Rubik, cada arista dirigida corresponde a un simple movimiento o giro. Los algoritmos de camino mínimo se usan para encontrar la solución que utiliza el mínimo número posible de movimientos.

Otras aplicaciones incluyen la Investigación de Operaciones (IO), las instalaciones y facilidad de diseño, la robótica, el transporte y los VLSI (*Very Large Scale Integration*) de diseño.

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS PARA EL MODELO

Los datos son la base de todo sistema de información, por tanto los datos espaciales o geo-referenciados son la base de todo Sistema de Información Geográfica y, a su vez, de todos los posibles análisis que puedan ser realizados haciendo uso de estos sistemas. En el caso del análisis de redes de transporte, los datos espaciales son utilizados para conformar un modelo de red vial que debe contener una serie de elementos o atributos imprescindibles para realizar un correcto análisis. Además, un modelo puede ser enriquecido con otros atributos brindando así un mayor valor a cualquier análisis.

#### 3.1 Modelo de red vial

Como se mencionó anteriormente, para realizar un análisis de redes es necesario construir un modelo de red vial en el que a mayor calidad de los datos que lo conforman, mejores sean los resultados obtenidos.

Un modelo de red vial es un grafo que representa la relación de una infraestructura vial a partir de enlaces (segmentos de ejes viales) y nodos (intersecciones entre los ejes) [15]. Por tanto, los elementos fundamentales para la construcción de estos modelos son los datos sobre los ejes viales y sus intersecciones. Sin embargo, normalmente solo se cuenta con la información referente a los segmentos de ejes viales o calles, ya que con ella se puede obtener la información de las intersecciones, a partir de una serie de análisis espaciales.

En la Tabla 1 se muestra un conjunto de datos que representan algunos de los segmentos de ejes viales pertenecientes a la provincia La Habana, con los atributos imprescindibles para la correcta construcción de un modelo de red vial[15], [16]. A partir de estos segmentos, si se construye un modelo de red vial, puede obtenerse una representación como la ilustrada en la Fig. 1.



**Tabla 1. Datos iniciales para la construcción de un modelo de red vial**

Nombre	Sent.	Vel. (km/h)	Tiem. (s)	Dist. (m)	Geometría
Calle 17	Ft	40	12.186	135.4	Poli-línea
Calle 17	Ft	40	8.4186	93.54	Poli-línea
Calle 19	Ft	40	12.105	134.5	Poli-línea
Calle 19	Ft	40	8.5491	94.99	Poli-línea
Calle 21	Ft	40	8.7237	96.93	Poli-línea
Calle 21	Ft	40	12.204	135.6	Poli-línea
Calle C	Ft	40	10.53	117.0	Poli-línea
Calle C	Ft	40	10.548	117.2	Poli-línea
Calle D	Ft	40	10.458	116.2	Poli-línea
Calle D	Ft	40	10.53	117.0	Poli-línea
Calle E	Ft	40	10.413	115.7	Poli-línea
Calle E	Ft	40	10.539	117.1	Poli-línea

A continuación se presenta una breve descripción de los atributos mostrados:

- **Nombre:** identifica al eje vial y luego de realizado un análisis es utilizado para brindar orientaciones de navegación.
- **Sentido (Sent.):** describe el sentido o dirección del eje vial. Sus posibles valores son: ambos sentidos (B), un sentido (Ft) o sin circulación (N). Es un atributo de carácter obligatorio en cualquier modelo de red vial, sin el cual no pudiera realizarse ningún tipo de análisis.
- **Velocidad máxima permitida (Vel.):** este atributo describe la velocidad máxima promedio con la cual se puede circular por el segmento de vía. Los valores de cada eje vial se otorgan a partir del análisis de: estado técnico y categoría de la vía, pero puede ser enriquecido teniendo en cuenta datos como semáforos y señales de tránsito. Usualmente se mide en kilómetros por hora (km/h).
- **Tiempo de recorrido (Tiem.):** este atributo está referido al tiempo que tarda un vehículo en recorrer el segmento de calle a la velocidad máxima promedio. Al ser, en sentido general, longitudes pequeñas, este atributo se mide en segundos (s).
- **Longitud del segmento (Dist.):** describe la longitud del segmento vial y es obtenido a partir de la geometría de los datos. Este atributo puede ser enriquecido agregando a la geometría de los datos, una coordenada "Z"; es decir, un dato de altura con el cual las distancias pudieran tener un carácter más realista y los tiempos, en un sentido y otro, fueran diferentes. Es otro atributo imprescindible para realizar cualquier análisis, conjuntamente con el sentido de circulación. Se mide en metros (m).

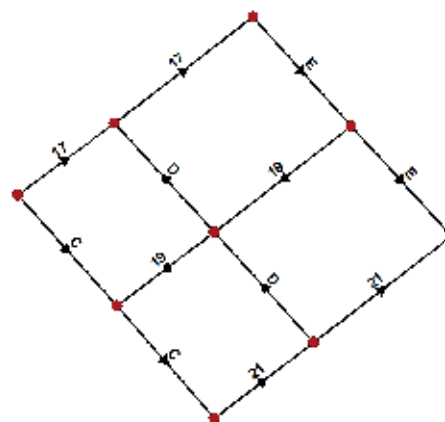


Fig. 1. Representación del modelo correspondiente a los datos de la Tabla 1.

tría de los datos, una coordenada "Z"; es decir, un dato de altura con el cual las distancias pudieran tener un carácter más realista y los tiempos, en un sentido y otro, fueran diferentes. Es otro atributo imprescindible para realizar cualquier análisis, conjuntamente con el sentido de circulación. Se mide en metros (m).

- **Geometría:** es el atributo más importante en cualquier dato espacial, pues define su posición geográfica y su forma. En una red vial la geometría, generalmente, consiste en poli-líneas.

Además de los atributos presentados pueden existir otros como la Jerarquía y la Categoría que permiten enriquecer el modelo final. En [16] y [17] puede apreciarse una posible relación entre estos atributos.

Como ya se mencionó, la Figura 1 muestra una representación del modelo de red vial construido a partir de los datos de la Tabla 1, los puntos rojos representan las intersecciones entre los segmentos (nodos). La información de estos nodos (identificador y geometría) es almacenada en una tabla, según sea el formato utilizado.

#### 4. HERRAMIENTAS PARA ANÁLISIS DE DATOS

Si bien es cierto que los datos están entre los elementos más importantes en los SIG y por tanto para el análisis de redes viales, las herramientas SIG también juegan un papel fundamental. Es por ello que se presenta una breve comparación entre algunas de las herramientas actuales capaces de almacenar in

**Tabla 2. Características de algunas herramientas para almacenar datos y realizar análisis de redes.**

	Oracle	PostgreSQL	SQLite	ArcGIS
Tipo	Base de Datos	Base de Datos	Base de Datos	SIG
Soporte de datos de red	Si	Si	Si	Si
Licencia libre	No	Si	Si	No
Tipos de análisis de redes	Camino mínimo, TSP	Camino mínimo, TSP, etc.	Camino mínimo	Camino mínimo, VRP, etc.
Manejo visual de datos	No	No	Si	Si
Asistente para modelos de red	Si	No	Si	Si
Módulo de redes	Network Analysis API	pgRouting	Virtual-Network	Network Analyst Extention
Algoritmos para camino mínimo	Dijkstra	Dijkstra, A*	Dijkstra, A*	Dijkstra
Servicios de rutas	Si OpenLS	No	No	Si Propio

formación espacial sobre redes viales, construir sus propios modelos de red y realizar algún análisis espacial sobre estos. En [18], [19] y [20] se presentan estudios comparativos entre los Sistemas de Gestión de Bases de Datos con características espaciales más importantes en la actualidad; sin embargo, no se hace referencia a sus características para realizar análisis de redes viales.

De esta forma, en la Tabla 2, se muestra la comparación mencionada. Esta tabla fue construida a partir de la información reflejada en [15], [17], [21, 22], [23], [24], [25], [26], [27], [28] y [29].

## 5. RESULTADOS PUBLICADOS, VINCULADOS AL ANÁLISIS DE REDES VIALES EN CUBA

Como se ha podido observar en las secciones anteriores, el análisis de redes viales ha ido en evolución en los últimos tiempos, tanto desde el punto de vista de los problemas que pueden ser solucionados, como desde el punto de vista de los sistemas informáticos y los algoritmos utilizados para resolverlos. En Cuba también se han venido realizando investi-

gaciones y se han obtenido resultados relacionados con el análisis de redes viales. A continuación se brinda una breve descripción de algunos de estos.

### 5.1 Sistema de análisis de redes viales en la provincia Villa Clara

Este sistema, desarrollado por especialistas de la Unidad de Desarrollo Científico-Tecnológico de GEOCUBA Villa Clara-Sancti Spíritus, se basa en la creación de una herramienta para el cálculo de distancias, en cuanto a ordenar, trazar estrategias de recorridos hacia múltiples destinos, planificar rutas, obtener áreas de servicios y realizar grandes cantidades de cálculos de distancia en poco tiempo [16]. A pesar de que no se menciona con qué herramienta o base de datos se ha creado este sistema, por su descripción se evidencia que ha sido utilizada la aplicación *ArcGIS Desktop*, conjuntamente con su modelo de redes viales *Network DataSet*. Igualmente, no se hace referencia a qué datos son los manejados para la utilización de la herramienta presentada. Según los resultados mostrados en [16], con este sistema se lograron obtener soluciones a problemas del tipo: ¿cuál es la ruta más corta entre la locación A y la locación B?, o ¿cuáles ambulancias pueden responder más rápido a un accidente?, y construir, además, tablas de distancias entre diferentes locaciones de la provincia Villa Clara.

### 5.2 Análisis de redes viales en ArcGIS

Tesis de grado de la Facultad de Ingeniería Informática del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, dedicada a la descripción y construcción de un servicio de análisis de redes viales a partir de la tecnología *ArcGIS*. Además de la creación del servicio que se deseaba implementar, se obtuvo como resultado una aplicación capaz de, a partir del uso del servicio —en interacción con otros servicios geoespaciales (*Geocodificación y Servicio de Objetos Geográficos, WFS*)—, obtener rutas óptimas en la provincia La Habana, teniendo en cuenta la distancia a recorrer o el tiempo requerido para un recorrido. Para la construcción del servicio fue utilizada, como base, la cartografía digital de los ejes viales de la provincia La Habana, suministrada por el Grupo Empresarial GEOCUBA [30]. Esta cartografía constituye una versión inicial de la utilizada en el presente trabajo.

### 5.3 Servicio web de enrutamiento de vehículos

Propuesta realizada por especialistas de la empresa Cartografía y Soluciones Geomáticas de Cuba, para darle solución al Problema de Enrutamiento de Vehículos, conocido comúnmente como VRP (*Vehicle Routing Problem*). El VRP constituye un problema NP-Completo, por lo cual las soluciones encontradas generalmente serán aproximadas y para hallarlas son necesarios algoritmos complejos. Los autores de esta propuesta dividen este problema en tres sub-problemas de menor complejidad, siendo el primero de ellos la estimación del camino más corto entre cualquier par de puntos geográficos conectados a la red de carreteras y caminos de Cuba. Para darle solución a este sub-problema emplean el algoritmo A\* que se encuentra en el módulo *pgRouting* de la base de datos espacial *PostGIS* [31]. Los autores presentan como uno de sus principales resultados la capacidad de obtener el camino de costo mínimo entre cualquier par de puntos geográficos de la red vial cubana, teniendo en cuenta el tiempo de recorrido o la distancia a transitar. Los autores plantean hacer uso de datos ofrecidos por GEOCUBA; sin embargo, no se encuentra ninguna descripción de las características de estos o su calidad para resolver los problemas planteados. Igualmente para las pruebas realizadas, fueron utilizados los datos de una de las instancias encontradas en la literatura (att48 propuesto por Rinaldi y Yarrow/Araque), sin relación alguna con Cuba.

### 5.4 Servicio provincial de rutas para la IDERC

Es un servicio desarrollado por especialistas de la delegación Oriente Sur de la empresa GEOCUBA. Simultáneamente con este servicio se crearon dos aplicaciones SIG para interactuar con el mismo, las cuales se encuentran publicadas en el Geoportal de la provincia Santiago de Cuba, en conjunto con otros servicios espaciales basados en la localización [32]. Los autores plantean que en la creación del servicio fueron utilizadas las variantes del algoritmo de Dijkstra que pueden ser encontradas en el módulo *pgRouting* de la base de datos espacial *PostGIS*. Los autores expresan como una de las ventajas de la creación del servicio y las aplicaciones, la generalización a otras provincias del país, siempre y cuando la cartografía cumpla con las condiciones topológicas necesarias. No se plantea implícitamente qué datos fueron utilizados, sin embargo puede intuirse que fueron utilizados datos generados por GEOCUBA y estos fueron modificados por los autores del trabajo.

Modelo basado en grafos reducidos para la representación y análisis de redes en Sistemas de Información Geoespacial

Tesis de doctorado presentada por un profesor de la Universidad de Ciencias Informáticas (UCI). El objetivo de esta es desarrollar un modelo para la representación y análisis de redes, basado en grafos, que permita entre otras cosas, la búsqueda escalable y eficiente de caminos óptimos [8]. El autor realiza un estudio de las diferentes herramientas, sistemas y algoritmos existentes en la actualidad para encontrar rutas óptimas, haciendo uso de los Sistemas de Información Geográfica. Sin embargo, el trabajo está centrado en el desarrollo de un algoritmo que sea capaz de encontrar una ruta óptima en grafos de gran escala en un tiempo adecuado. El autor demuestra, con los resultados de las pruebas realizadas, la validez del algoritmo desarrollado comparándolo con algunos de los algoritmos más utilizados (Dijkstra y A\*) y, además, describe la aplicación de dicho algoritmo en un complemento creado para la herramienta SIG Quantum GIS (QGIS). Las pruebas descritas son realizadas sobre los datos propuestos en [33], [34], los cuales hacen referencia a ciudades o condados de América del Norte.

### 5.6 Reducción del costo de transportación en las Series Nacionales de Béisbol, empleando metaheurísticas

Solución creada por profesores del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), para lograr la reducción de costos en la transportación en la Serie Nacional de Béisbol (SNB) [35]. Los autores hacen uso de las *metaheurísticas* para darle solución al problema planteado, definido como Problema de la Transportación en un Torneo (en inglés: *Travelling Tournament Problem*, *TTP*) y lograr minimizar la distancia total recorrida por los equipos. Es importante destacar que para darle solución a este problema fue necesario contar con una matriz cuadrada de orden  $n$  con las distancias entre las sedes de los equipos. La obtención de esta matriz puede ser resuelta a partir de un problema del tipo: *¿cuáles ambulancias pueden responder más rápido a un accidente?*, que se soluciona resolviendo un conjunto de problemas para encontrar el camino mínimo. Para obtener la matriz fue usado el sistema *ArcGIS Desktop*, conjuntamente con su modelo de redes viales *Network DataSet*, construido a partir de los datos referentes a las autopistas y carreteras interprovinciales principales del país. Los resultados obtenidos muestran que

Tabla 3. Características de los datos de ejes viales de La Habana.

Sentido de circulación	Cantidad de segmentos	% del total
Ambos sentidos	45979	78.68
Acceso restringido	69	0.11
Un sentido	12383	21.19
Bien definido	6999	11.97
Indefinido	5384	9.21
Todos	58431	100

si se aplica la solución brindada por los autores, es posible lograr un ahorro entre un 15% y un 30% de la distancia total recorrida. Se debe mencionar que los datos utilizados por los autores forman parte de los utilizados en el presente trabajo.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE ENCONTRAR LA RUTA MÁS CORTA CON LOS DATOS ACTUALES DE LA HABANA

En las secciones anteriores se ha brindado una descripción de las características de los datos espaciales que conforman una red vial, así como una tabla comparativa con algunas de las herramientas SIG capaces de almacenar y realizar análisis sobre estos tipos de redes; además, se exponen los últimos avances alcanzados en el análisis de redes viales en Cuba. A continuación se exponen algunos resultados obtenidos luego de resolver el problema del camino mínimo, a partir del uso de algunas de las herramientas presentadas anteriormente. Para realizar estos análisis fueron utilizados, como datos iniciales, los segmentos de la red vial de la provincia La Habana. Las características de estos datos pueden ser apreciadas en la Tabla 3 y la distribución espacial de los mismos puede ser observada en la Fig. 2. Además, el uso de estos datos y no los de otra provincia o ciudad del país, está determinado por la cantidad de ejes viales existentes en La Habana, lo que permitiría inferir que los resultados de las pruebas realizadas en otras provincias o ciudades tuvieran un comportamiento similar.

Es importante mencionar que actualmente la cartografía digital existente sobre los ejes viales de las ciudades cubanas, no cuenta con todas las características necesarias para realizar un análisis de alta

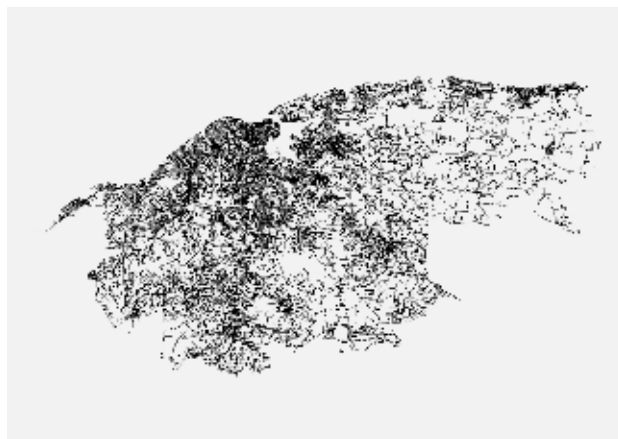


Fig. 2. Representación geográfica de los datos iniciales de la Tabla 3.

calidad. Estos datos son generados por el Grupo Empresarial GEOCUBA, que es la encargada de crear y procesar todos los datos geográficos de Cuba. Actualmente este grupo se encuentra realizando una reestructuración de los datos geográficos de Cuba, a partir de un modelo de datos que sí incluye todas las características necesarias para el análisis de redes viales [5].

Es por este motivo que, como se puede apreciar en la Tabla 3, existe alrededor de un 10% de los segmentos de ejes viales que no tienen bien definido el sentido de circulación, estos datos fueron corregidos por los autores del trabajo.

Para la obtención de los resultados que aquí se presentan se siguieron los siguientes pasos:

1. Construir el modelo de red vial en cada una de las herramientas sobre las que realizar el análisis.
2. Obtener una pequeña muestra de caminos mínimos en cada herramienta a partir de 5 pares de vértices o nodos (Tabla 4).
3. Basado en los resultados obtenidos en el paso 2, realizar un muestreo aleatorio con un tamaño de muestra de 100 pares de nodos y repetir el proceso 10 veces en cada herramienta.
4. Analizar los resultados obtenidos.

En primera instancia, es importante mencionar que luego de la generación de los modelos de red, según las características de cada herramienta, se crearon

**Tabla 4. Resultado inicial del análisis en diferentes herramientas.**

Cantidad de Nodos/Costo (m)				
ArcGIS	ArcGIS		SpatialLite	SpatialLite
Any	End	Oracle	Dijkstra	A*
Vertex	Vertex			
41893	41747	41742	41729	41729
2307.3	2307.3	2307.28	2307.28	2307.28
5561.7	5561.7	5561.61	5561.61	5561.61
13276.3	13276.3	13276.24	13276.24	13276.24
12853.9	12853.9	12853.78	12853.78	12853.78
25482.7	25482.7	25482.5	25482.50	25482.50

diferencias entre cada modelo, principalmente en la cantidad de vértices o nodos de la red, como puede observarse en la fila señalada de la Tabla 4. Esto se debe a que en el modelo de SpatialLite no se soportan ejes viales cerrados, es decir, que presenten el mismo nodo inicial y final y en el caso de ArcGIS, cada modelo depende del tipo de conexión que se le dé a los ejes, existiendo mayor cantidad en el modelo Any Vertex. Igualmente se debe hacer notar que la generación en ArcGIS y SpatialLite se realizó a través de un asistente, mientras que en Oracle esta fue realizada a mano.

Luego de concluido el paso 2, se obtuvieron los caminos mínimos entre 5 pares de nodos, las distancias resultantes se reflejan en la Tabla 4, donde se puede apreciar que no existe prácticamente diferencia entre las distancias obtenidas, solamente en los casos de ArcGIS. Esto se debe a que para realizar los análisis en esta herramienta, fue necesario introducir los vértices iniciales y finales a través de una interfaz SIG, lo que generó una diferencia de algunos centímetros (cm) entre el nodo de la red y el insertado manualmente.

En la Fig. 3 puede observarse la ubicación geográfica de las rutas obtenidas en el paso 2, identificando en colores diferentes cada una de ellas.

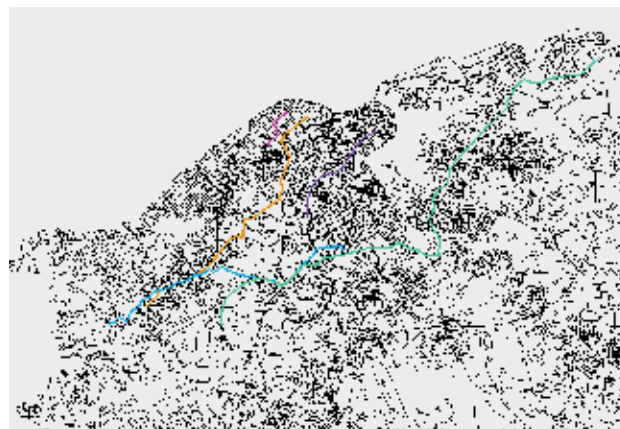


Fig. 3. Representación gráfica de los caminos mínimos mostrados en la Tabla 4.

Luego de obtener los resultados iniciales mostrados en la Tabla 4, se creó un programa en C# para obtener de forma automática nuevos resultados, según lo planteado en el paso 3. Este programa sigue las líneas generales del siguiente pseudocódigo:

```

1. nodes[]; // array of id nodes in network
2. beginNodes[];
3. endNodes[];
4. i = 0; j = 0, k = 0;
5. while i < 100 do
6. beginN = random(); // random id of node
7. f beginN is on nodes[]
8. beginNodes[i] = beginN;
9. i = i + 1;
10. while j < 100 do
11. endN = random(); // random id of node
12. if endN is on nodes[]
13. endNodes[j] = endN;
14. j = j + 1;
15. for k to 100
16. oracleSP(beginNodes[k], endNodes[k]);
    
```

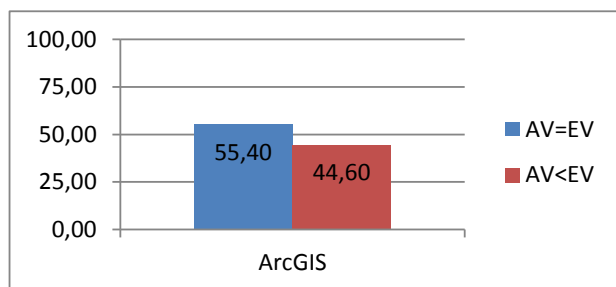


Fig. 4. Relación porcentual existente entre los resultados obtenidos con los diferentes modelos de ArcGIS.

- 17. spatiaLiteDSP(beginNodes[k], endNodes[k]);
- 18. spatiaLiteASP(beginNodes[k], endNodes[k]);
- 19. arcGISAVSP(beginNodes[k], endNodes[k]);
- 20. arcGISEVSP(beginNodes[k], endNodes[k]);

Si bien los resultados mostrados en la Tabla 4 no reflejan diferencias significativas entre los análisis realizados, es de esperar que con un tamaño de muestra cien veces mayor y totalmente aleatoria, sí se generen diferencias apreciables, sobre todo entre los dos modelos de ArcGIS y entre los modelos de SpatialLite y de Oracle con el de ArcGIS. Igualmente se esperaba alguna diferencia en los resultados, según la utilización de los algoritmos **Dijkstra y A\***, en SpatialLite, atendiendo a lo expresado en la bibliografía consultada.

El análisis de los resultados se dividió en cuatro partes fundamentales: comparar los resultados a partir de los dos modelos de redes de ArcGIS, comparar los resultados a partir de los modelos de similar construcción, pero en las diferentes herramientas (ArcGIS End Vertex, Oracle y SpatialLite), comparar el comportamiento de los dos algoritmos ofrecidos por SpatialLite y, por último, analizar el tiempo de ejecución de cada herramienta. A continuación se muestran estos resultados y su análisis, a partir de gráficas estadísticas.

La Fig. 4 muestra la relación porcentual existente entre los resultados obtenidos con los diferentes modelos de ArcGIS (AV: Any Vertex, EV: End Vertex). Como se puede apreciar los resultados se comportaron de dos formas diferentes: iguales en ambos modelos (55.40%) o ligeramente inferiores en el modelo AV (44.60%), lo que se explica a partir de la existencia de mayor cantidad de vértices en este modelo.

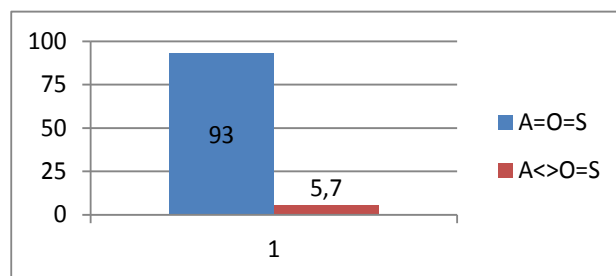


Fig. 5. Relación porcentual existente entre los resultados obtenidos con los modelos generados de forma similar en tres herramientas diferentes.

La Fig. 5 presenta el gráfico de una comparación realizada a partir de las herramientas que permiten construir el modelo de red de forma similar y utilizan el mismo algoritmo (Dijkstra). Este gráfico refleja, esencialmente, el porcentaje de veces que los resultados obtenidos, con cada herramienta, fueron iguales en los tres casos (A=O=S) o iguales entre Oracle y SpatialLite, pero diferentes con ArcGIS (A<>O=S).

Nótese que en el gráfico de la Fig. 5 los porcentajes mostrados no alcanzan el 100%, esto es debido a que sólo un resultado fue diferente entre Oracle y SpatialLite, existiendo una igualdad entre alguno de estos modelos con el de ArcGIS.

Un resultado interesante es la total igualdad entre los resultados obtenidos con el modelo generado en SpatialLite, utilizando los dos algoritmos que soporta.

Otro análisis realizado a los resultados obtenidos se refiere al tiempo de ejecución de cada herramienta para alcanzar la ruta más corta. La Fig. 6 muestra cómo los menores tiempos fueron logrados por los algoritmos de SpatialLite, mientras que ArcGIS y Oracle se comportaron de manera similar. Ha de tenerse en cuenta que los resultados de ArcGIS fueron conseguidos a partir del uso de un servicio web, lo que genera la transmisión de información a través de una red.

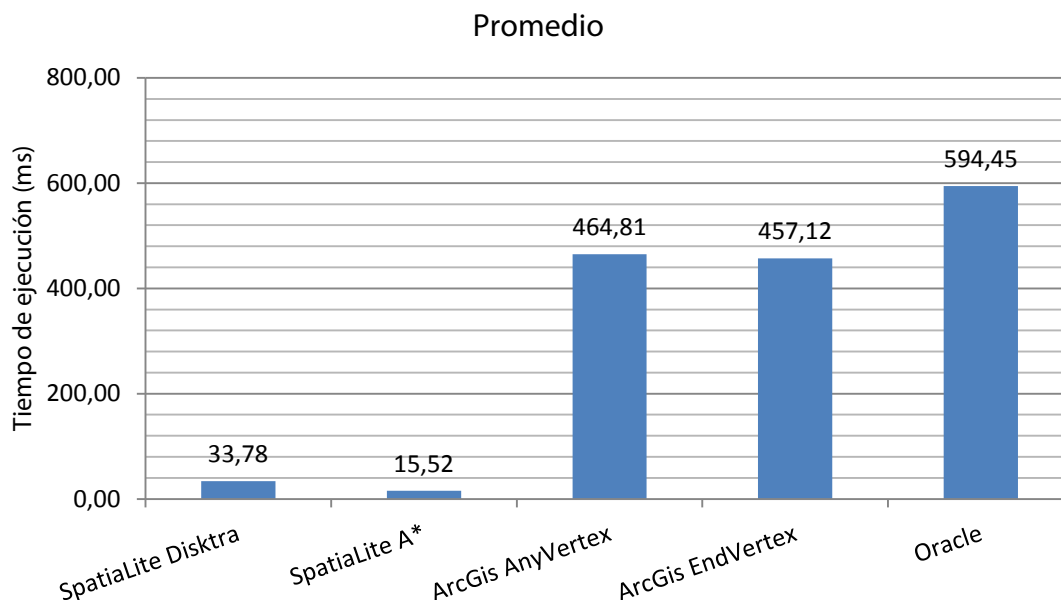


Fig. 6. Tiempo promedio de ejecución, en milisegundos, de las herramientas en la obtención de la ruta más corta.

Es significativo destacar la imposibilidad de asegurar, según la aleatoriedad de los análisis realizados, cuál de las herramientas brinda mejores resultados. Esto se debe a que no se conoce realmente cuál es el camino mínimo entre cualquier par de nodos de la red vial de La Habana, por lo que no existe un óptimo o un mejor resultado para comparar.

Sin embargo, debido a la semejanza de los resultados obtenidos, se puede afirmar que todas las herramientas poseen un comportamiento similar, por lo cual la selección de una de ellas dependerá del entorno donde se desee aplicar. Así, si se desea construir una aplicación sencilla y de fácil manipulación o una aplicación móvil para el cálculo de caminos mínimos, puede utilizarse SpatialLite. Por otra parte si lo que se desea es realizar algún tipo de análisis de forma sencilla, a través de una interfaz SIG, se recomienda ArcGIS. Por último, si lo que se desea es acceder a un servicio web de fácil uso, estándar o no, se recomienda el uso de ArcGIS u Oracle.

## 7. CONCLUSIONES

Con la realización de este trabajo se logró identificar que las principales características de los datos espaciales, que representan una red vial para poder resolver el problema de encontrar el camino mínimo,

son: la geometría de los ejes viales, la longitud de los mismos y su sentido de circulación.

Igualmente se mostró que existen varias herramientas SIG capaces de almacenar estos tipos de datos y realizar los análisis correspondientes sobre los mismos, sin necesidad de otras aplicaciones o sistemas. La mayoría de estas herramientas son Sistemas de Gestión de Base de Datos (SGDB) con características “*espaciales*”.

A partir del uso de algunas de las herramientas mostradas se realizó un conjunto de pruebas demostrándose que, con los datos existentes en la actualidad de la red vial de La Habana, los resultados en la resolución del problema para encontrar la ruta más corta, son similares entre todas las herramientas. Se destaca entre estos resultados el muy similar comportamiento de los algoritmos Dijkstra y A\*, tanto con respecto al tiempo de ejecución (A\* siempre menor), como a la distancia de la ruta más corta (siempre igual).

Estos resultados permiten afirmar que la selección de una u otra de estas herramientas dependerá del contexto en el que se deseen usar y no de sus características para realizar análisis de redes viales, pues en sentido general todas tienen un comportamiento similar.

Por último, es importante destacar que en Cuba también se han alcanzado ciertos avances en el análisis de redes viales, algunos de los cuales son mostrados en este trabajo.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores reconocen las contribuciones de Anaisa Hernández González, Alejandro Rosete Suárez y Rolando Acosta Sánchez, en la revisión de este documento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Consejería de Fomento, "Sistemas de localización e información geográfica," 2009.
- [2] J. Bosques, *Sistemas de Información Geográfica*. Madrid: Ediciones Rialp S.A., 2000.
- [3] P. A. Burrough, *Principles of geographical information systems for land resources assessment*. Vol. 12. New York: Clarendon Press, 1986.
- [4] K. K. Kemp and M. F. Goodchild, "Introduction to GIS," in *NCGIA core curriculum*, Vol. 1, Santa Barbara, California: NCGIA-Geography Dept., University of California at Santa Barbara, 1990.
- [5] F. S. Moreno Fernández and G. Miranda Valdés, "Base de Datos cartográfica nacional callejera para múltiples usos," presented at the 8th Congreso Internacional de Geomática, La Habana, 2013.
- [6] OpenStreetMap. (2013). *Planet OSM* [online]. Available: <http://planet.openstreetmap.org/>
- [7] E. W. Dijkstra, "A note on two problems in connexion with graphs," *Numerische Mathematik*, vol. 1, pp. 269-271, 12-01 1959.
- [8] R. Rodríguez Puente, "Modelo basado en grafos reducidos para la representación y análisis de redes en Sistemas de Información Geoespacial," Doctor, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, La Habana, 2012.
- [9] D. Delleng, "Engineering and Augmenting Route Planning Algorithms," Doctoral, Fridericana zu Karlsruhe, Hamburg, 2009.
- [10] I. Rihawl Aragon (2009, Diciembre 18). *Búsqueda no informada: Algoritmo de Coste Uniforme* [online]. Available: <http://poiritem.wordpress.com/2009/12/06/6-5-1-busquedano-informada-algoritmo-de-coste-uniforme/>
- [11] R. Johnsonbaugh, *Matemáticas discretas*, Vol. 2, La Habana: Felix Varela, 2004.
- [12] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael. (1968, A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. *Volume: 4(Issue: 2)*.
- [13] A. Rodríguez Villalobos, "Grafos: herramienta informática para el aprendizaje y resolución de problemas reales de teoría de grafos," presented at the tenth Congreso de Ingeniería de Organización, Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Organización - ADINGOR, Valencia, 2006.
- [14] P. L. Ángel Restrepo and L. F. Marín Sepúlveda, "Un método computacional para la obtención de rutas óptimas en sistemas viales," in *Dyna*, pp. 112-121, 2011.
- [15] R. Kothuri, A. Godfrind, and E. Beinat, *Pro Oracle Spatial for Oracle Database 11g*. Apress, 2007.
- [16] E. Pena Alonso, "Sistema de Análisis de Redes Viales en la Provincia de Villa Clara," in *VII Congreso Internacional GEOMATICA 2011*, La Habana, 2011.
- [17] M. A. Barrientos Martínez, "Network Analyst: Análisis de redes desde ArcGIS 9.2," 2007.
- [18] L. Hsu and R. Obe, "Cross Compare of SQL Server, MySQL, and PostgreSQL," *Postgres OnLine Journal*, Mayo, 2008.
- [19] L. Hsu and R. Obe. (2010). *Compare SQL Server 2008 R2, Oracle 11G R2, PostgreSQL/PostGIS 1.5 Spatial Features* [online]. Available: [http://www.bostongis.com/PrinterFriendly.aspx?content\\_name=sqlserver2008r2\\_oracle-11gr2\\_postgis15\\_compare](http://www.bostongis.com/PrinterFriendly.aspx?content_name=sqlserver2008r2_oracle-11gr2_postgis15_compare)
- [20] Indian Institute of Technology, N. L. Sarda and R. Subham, "Comparison between Oracle & Postgis in terms of Spatial Queries," 2011.
- [21] PostgreSQL. (2013, Junio). *Guía de inicio rápido para pgRouting* [online]. Available: <http://live.osgeo.org/es/index.html>



- [22] PostgreSQL. (2013). *PostGIS* [online]. Available: <http://www.pgRouting.org/>
- [23] R. Budhrani, "Cálculo web de rutas con pgRouting, OpenStreetMap y OpenLayers," ed. Mallorca, 2010.
- [24] A. Furieri. (2013, Junio). *SpatiaLite Cookbook* [online]. Available: <http://www.gaia-gis.it/gaia-sins/spatialite-cookbook/index.html>
- [25] P. SpatiaLite. (2013). *SpatiaLite* [on line]. Available: <https://www.gaia-gis.it/fossil/libspatialite/index>
- [26] A. Furieri. (2011). *SpatiaLite Cookbook* [online]. Available: <http://www.gaia-gis.it/gaia-sins/spatialite-cookbook/index.html>
- [27] Esri. (2013). *Mapping & Analysis for Understanding Our World* [online]. Available: <http://www.esri.com/software/arcgis>
- [28] (2010). *Productos* [online]. Available: <http://www.esri.es/es/productos/arcgis/>
- [29] Esri. (2012). *ArcGIS Resource Center* [online]. Available: <http://help.arcgis.com/es/arcgis-desktop/10.0/help/index.html>
- [30] R. Valdés Yznaga, "Infraestructura de Datos Espaciales: Análisis de Redes Viales en ArcGIS," Ingeniero, Trabajo de diploma para optar por el título de Ingeniería en Informática, La Habana, Cuba, 2011.
- [31] D. Alfonso del Valle, A. Zulueta Amador, G. Miranda Valdez, and P. E. Limia Téllez, "Servicio web de enrutamiento de vehículos," in *Memorias. XV Convención y Feria Internacional Informática 2013*, ed. La Habana, 2013.
- [32] L. Benavides César, J. E. Diéguez Díaz, R. Queralta Pozo, and M. O. Molina Machado, "Servicio provincial de rutas para la IDERC," in *Memorias. XV Convención y Feria Internacional Informática 2013*, ed. La Habana, 2013.
- [33] M. Neteler and H. Mitasova, *Open Source GIS: A GRASS GIS Approach*. 3 ed. New York: Springer, 2008.
- [34] T. Brinkhoff, "A framework for generating network-based moving objects," *Geoinformatica*, vol. 6, pp. 153-180, 2002.
- [35] A. Rosete Suarez, D. Paredes Miranda, and E. Sánchez Ansola, "Optimización del calendario de la Serie Nacional de Béisbol para reducir el costo de transportación," in *1er Evento Científico del Béisbol Cubano*, La Habana, 2012.

## ADAPTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA LA CREACIÓN DE ÁRBOLES DE ENRUTAMIENTO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICA

### GENETIC ALGORITHM ADAPTATION FOR THE CREATION OF ROUTING TREES INTO A WIRELESS SENSOR NETWORK

**Ángela María Rodríguez-Vivas, MSc**

*Universidad del Cauca.  
Popayán, Colombia.  
arodriguezvivas@unicauca.edu.co*

**Juan Carlos Corrales-Muñoz, Ph.D.**

*Universidad del Cauca.  
Popayán, Colombia.  
jcorral@unicauca.edu.co*

(Recibido el 21-03-2013. Aprobado el 28-06-2013)

**Resumen.** El enrutamiento en redes de sensores inalámbricas (*Wireless Sensor Networks, WSN*) es un factor de incidencia en su longevidad; en aplicaciones como la agricultura de precisión es primordial preservar el tiempo de vida de los nodos sensores, porque la ubicación del campo de despliegue (terrenos montañosos) no permite usualmente recargar sus baterías. En este artículo se propone una adaptación al algoritmo genético de tal forma que genere árboles de enrutamiento para WSN en el contexto de la agricultura de precisión. La adaptación consiste en incluir en el algoritmo parámetros de dicho contexto y en determinar, a través de la experimentación, cuál método de selección se adecua mejor a la solución, según el tiempo de convergencia del algoritmo.

**Palabras clave:** Árbol de enrutamiento; longevidad de una red; algoritmo genético; agricultura de precisión; red de sensores inalámbrica.

**Abstract.** Routing is an impact factor for wireless sensor networks (WSN) longevity; in applications like precision agriculture is essential to preserve the sensor nodes lifetime because deployment field (hilly land) location usually does not allow to recharge their batteries. In this paper a genetic algorithm adaptation in order to generate routing trees for WSN in the context of precision agriculture is proposed. The adaptation consists of including in the algorithm parameters from such a context, and of determining by means of experimentation the selection method that is best suited to the solution according to the convergence time of the algorithm.

**Keywords:** Genetic algorithm; routing; wireless Sensor networks.

## 1. INTRODUCCIÓN

Una red de sensores inalámbrica (WSN, por sus siglas en inglés) consiste en un conjunto de dispositivos distribuidos espacialmente, conocidos como nodos sensores, que se asemejan a un microcomputador ya que poseen unidad de memoria, procesamiento, radiofrecuencia y sensado, al igual que una fuente de energía que consiste en una batería limitada; de ahí que los nodos son restringidos en términos de energía [1], [2].

Estas redes se programan para recolectar datos del ambiente circundante, que son enviados por medio inalámbrico, en forma de paquetes, hacia una estación base remota también conocida como 'nodo recolector' o 'pasarela'. Igualmente los nodos sensores tienen la capacidad de comunicarse entre ellos de manera inalámbrica.

Del amplio rango de aplicaciones de las WSN, entre las que se encuentran los sistemas de advertencia de desastres, el cuidado de la salud, la automatización del hogar, la vigilancia y el monitoreo ambiental, se puede destacar la agricultura de precisión. La agricultura de precisión es un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en el estudio de la existencia de variabilidad en campo, cuyo fin es incrementar los niveles de producción a través del análisis costo-beneficio [3].

En los proyectos de agricultura de precisión, la inclusión de las WSN como herramienta de apoyo tecnológico ha aportado avances significativos para el monitoreo de los cultivos, como se evidencia en los proyectos documentados en [4] - [11], ejecutados en diferentes regiones del mundo con diferentes productos agrícolas.

En el contexto de la agricultura de precisión, las WSN cuentan con características como: despliegue escaso de nodos (en regiones en vía de desarrollo los nodos están espaciados hasta 100 m.), recolección periódica de datos, recorridos extensos de los paquetes de datos (debido a la extensión de las parcelas). La longevidad de la red debe alcanzar por lo menos seis meses que corresponde al periodo de sembrado. Además, la ubicación de las parcelas de los cultivos (pueden ser terrenos montañosos), usualmente no permite recargar las baterías de los nodos.

Teniendo en cuenta este contexto y su expectativa de longevidad de la red, una fase crítica de la operación de la WSN es la transmisión de datos. Esto se debe al uso del módulo de radiofrecuencia que es el principal consumidor de potencia en la red. En trabajos como [2], [11] se afirma que el costo de la energía requerida para transmitir los datos, excede el costo requerido para realizar cualquier otra tarea como procesarlos y/o almacenarlos.

Consecuentemente Gupta, Kuila y Jana [12] afirman: "Un enrutamiento de datos eficiente en energía a través de los nodos, es bastante importante para reducir su consumo energético". Por su parte los autores de [13] concluyen: "El tiempo de vida de una WSN puede variar considerablemente, dependiendo del esquema de enrutamiento usado".

El Algoritmo Genético (AG) es un algoritmo de optimización que trabaja con búsqueda probabilística, basado en los conceptos de selección y evolución naturales. Los trabajos documentados en [12] - [17] usan el AG para definir esquemas de enrutamiento de WSN que evalúan la energía de la red y la distancia de los recorridos de los paquetes. Se observa que en estos trabajos el método de selección del AG se escoge de manera indiferente.

En el presente artículo se propone un esquema de enrutamiento para WSN en el cual se adapta el AG de acuerdo a características de las redes usadas en agricultura de precisión. El aporte de este trabajo, respecto a los trabajos documentados en [12] - [17], está en dos partes de la adaptación del algoritmo: primero, la función de aptitud incluye parámetros no tenidos en cuenta en los trabajos previos y, segundo, el método de selección usado se escoge de acuerdo al tiempo de convergencia del algoritmo.

Las pruebas realizadas se enfocaron en determinar cuál método de selección se comporta de manera favorable, respecto al criterio de tiempo de ejecución del algoritmo, para una WSN con topología de árbol.

## 2. VISTA GENERAL DEL ALGORITMO GENÉTICO

El algoritmo genético es un método adaptativo que se usa para resolver problemas de optimización; sus principios fueron descritos rigurosamente por John Holland en los años 60.

El AG inicia con un conjunto de posibles soluciones generadas aleatoriamente conocidas como *pobla-*

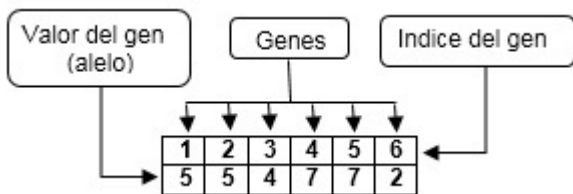


Fig. 1. Un cromosoma de 6 genes.

*ción inicial.* Cada solución individual en una población se representa por un arreglo de *genes* y se denomina *cromosoma* o *individuo*, todos con igual longitud. El valor del gen se llama alelo (ver Fig. 1).

En el AG se dispone de una *función de aptitud* que asigna un *valor de aptitud* a cada individuo, basado en qué tan cerca está de la solución óptima. Es gracias a la personalización de esta función que el AG se adapta a diversas aplicaciones; este es el soporte para el siguiente paso del AG que es la selección.

De la población inicial se seleccionan pares de cromosomas (*padres*), dependiendo de su valor de aptitud, que intercambian su información genética para generar dos cromosomas *hijos* (*descendencia*) mediante el proceso de *cruce*. Para producir una mejor solución los cromosomas hijos experimentan la *mutación*, restableciendo los valores genéticos perdidos cuando la población *converge* demasiado rápido.

Los cromosomas resultantes conforman la *siguiente generación*. Para asegurar que esta nueva generación es por lo menos tan apta como la previa, algunos de sus individuos más pobres (en desempeño) se reemplazan por el mismo número de individuos de la generación previa que mostraron un mejor desempeño. Este proceso se llama *elitismo*.

El ciclo completo se repite hasta que se encuentra el *criterio de parada* del algoritmo (ver Fig. 2). Detalles del funcionamiento del AG pueden ser consultados en [18], [19].



Fig. 2. Diagrama de flujo del Algoritmo Genético.

### 3. MODELO DE RED

El algoritmo propuesto está enfocado en realizar el enrutamiento en una WSN que está desplegada en un campo de cultivo, del tal manera que se contribuya con la longevidad de la red. Para tal fin es necesario fijarse en el comportamiento de las WSN cuando se usan en agricultura de precisión y, a partir de este, adaptar el AG.

Para esto se realizó un análisis de los artículos [4] - [11] donde se documentan proyectos de agricultura de precisión que usan una WSN, y se extrajeron los factores que influyen durante la fase de transmisión de datos por la red. La lista de estos parámetros se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros que influyen en la fase de transmisión de datos en una WSN.

Parámetro	Trabajo	[4]	[5]	[6]	[7]	[8]	[9]	[10]	[11]
Posición de los nodos.					✓	✓	✓	✓	
Energía residual del transmisor.	✓					✓		✓	
Energía residual del receptor.					✓		✓		
Energía residual de todos los nodos vecinos.					✓		✓		
Indicador de calidad de enlace (LQI, Link Quality Indicator).	✓	✓	✓	✓	✓			✓	
Cantidad de saltos hasta la estación base.			✓	✓	✓				✓
Frecuencia de transmisión.								✓	
Nivel del nodo fuente en el árbol.				✓					
Energía residual del jefe de clúster (Fortaleza de la señal).						✓			
Velocidad de bits del radio.						✓		✓	
Capacidad de memoria disponible de los nodos.								✓	
Velocidad del muestreo de la variable del nodo.								✓	

Igualmente, de acuerdo al estudio de las características de los proyectos mencionados, se definió que se trabajará con una red jerárquica con  $n$  nodos multisalto y una estación base potente conectada a una fuente de energía, como la que se muestra en la Fig. 3. Así mismo, se trabajará sobre los siguientes supuestos:

- Los nodos sensores se despliegan de manera aleatoria y son estacionarios después del despliegue.
- Siendo una aproximación centralizada, nuestro algoritmo asume que la ubicación exacta de los nodos es conocida de antemano a través de algún sistema de localización como el GPS.
- Cada periodo de recolección y transmisión de datos, agregados desde todos los nodos hacia la estación base, es referida como una *ronda*.
- Un enlace inalámbrico se establece entre dos nodos sólo si ellos están dentro del rango de comunicación del otro.
- El esquema de enrutamiento se calcula en alguna entidad centralizada (por ejemplo, la estación base).
- En una ronda de recolección de datos la estación base recibe datos de todos los nodos. Cada sensor adquiere las muestras de los datos requeridos para su entorno, agrega algún paquete de entrada desde sus vecinos y lo reenvía a su padre o a la estación base.

- La red es homogénea, es decir que la energía inicial de todos los nodos es la misma.

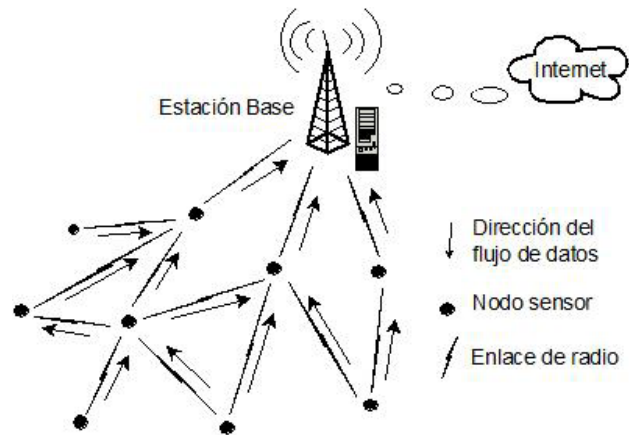


Fig. 3. Esquema de una WSN.

#### 4. ADAPTACIÓN DEL ALGORITMO GENÉTICO PARA ENRUTAMIENTO

Según los autores del artículo documentado en [20], una WSN puede modelarse como un grafo ponderado donde los vértices son los nodos sensores, las aristas representan posibilidad de comunicación entre un par de nodos y la ponderación corresponde al valor de los parámetros que influyen en dicha comunicación.

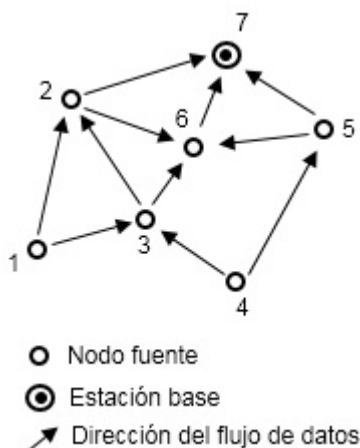


Fig. 4. Dígrafo que representa una WSN.

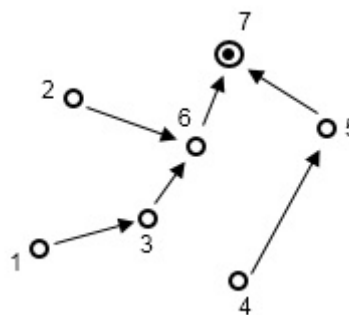
En el presente trabajo, una WSN como la de la Fig. 3 se modela como un grafo donde los  $n$ , nodos de la red, se etiquetan con 1, 2, 3, ...,  $n$  y la estación base se etiqueta como  $n+1$ . Existe una arista entre dos nodos si se encuentran dentro del mismo rango de comunicación; además, existe flujo de datos desde un nodo  $i$  hasta un nodo  $j$  ( $i \rightarrow j$ ) siempre que el nodo  $j$  esté más cerca de la estación base que el nodo  $i$ .

Así, una representación apropiada para la WSN es un dígrafo como el que se aprecia en la Fig. 4. Aquí se nota que el nodo 3 tiene, en su rango de comunicación, a los nodos 1, 2, 4 y 6 y que los nodos 2 y 6 están más cerca de la estación base que él mismo.

#### 4.1 Representación del cromosoma

La solución al enrutamiento implica convertir el grafo de la Fig. 4 en un árbol (red jerárquica), de manera que resulte un único camino desde cada nodo hasta la estación base. En términos de la teoría de grafos esto es un *grafo dirigido acíclico* o árbol dirigido como el de la Fig. 5(a).

Siendo el cromosoma (para el AG) la solución al problema de optimización, en este caso un cromosoma debe representar el esquema de enrutamiento que ilustra la Fig. 5(a). Así, en la presente propuesta, el cromosoma tiene una longitud igual a la cantidad de nodos de la red, donde el índice de cada gen se refiere a la etiqueta del nodo fuente y el alelo indica quién es su nodo de próximo salto (ver Figura 5(b)). De esta manera el cromosoma define la ruta desde cada nodo hasta la estación base.



(a) Árbol dirigido.

Nodos fuente	1	2	3	4	5	6
Nodos de próximo salto	3	6	6	5	7	7

(b) Cromosoma que representa al árbol dirigido.

Fig. 5. Solución de enrutamiento de la WSN.

En la Fig. 5 se muestra un programa de enrutamiento para la red de la Fig. 4. El valor del gen en la posición 1 es 3, indicando que el nodo 1 selecciona al nodo 3 para transmitirle sus datos. El nodo 3, a su vez, escoge al nodo 6 y el valor en 6 es 7, indicando que el próximo nodo es la estación base. Por lo tanto la ruta completa de recolección de los datos del nodo 1 se expresa como el camino  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ .

#### 4.2 Población inicial, función de aptitud y selección

Si bien el cromosoma de la Fig. 5(b) brinda una solución de enrutamiento a la red de la Fig. 4, existen más soluciones ya que se pueden generar diferentes caminos desde los nodos fuente hasta la estación base. Por ejemplo, una ruta alterna para el nodo 1 podría ser  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 7$ .

En la presente adaptación del AG, la población inicial es una colección de cromosomas generados aleatoriamente, donde cada uno corresponde a un esquema de enrutamiento válido para la red. Un cromosoma es válido cuando el valor de cada gen, en la posición  $i$ , se ha seleccionado entre los nodos candidatos a ser próximo salto de  $i$ ; es decir, que estén dentro de su rango de comunicación y que estén más cerca de la estación base que él mismo. Por ejemplo, para la red de la Fig. 4 el valor del gen, en la posición 2, puede ser 6 o 7.

La función de aptitud se define de manera que evalúe cuál esquema de enrutamiento (cromosoma) contribuye, en mayor medida, con la longevidad de la red. Para esto se acude a los parámetros de la Tabla 1 porque éstos influyen en la transmisión de los datos por la red y ésta es una fase crítica para su longevidad. Se toman entonces los siguientes parámetros: distancia total cubierta por los caminos resultantes y niveles del árbol.

El parámetro ‘niveles del árbol’, a su vez, está compuesto por tres factores a saber: la cantidad de niveles del árbol, los nodos hoja árbol (nodos del último nivel; es decir, nodos que no tienen hijos en el árbol) y los nodos de cada nivel. Estos factores agrupados se convierten en la función mostrada en (1).

$$N = \binom{n_h}{k} \times \left( \sum_{i=1}^k (n_i \cdot i) \right) \quad (1)$$

Donde  $N$  es el valor para ‘niveles del árbol’ que corresponde a la evaluación parcial de cada cromosoma,  $n_h$  es la cantidad de nodos hoja,  $k$  es la cantidad de niveles,  $n_i$  es la cantidad de niveles del nivel  $i$ . Es importante tener en cuenta que el valor mostrado en (2) debe ser igual a la cantidad total de nodos de la red.

$$\sum_{i=1}^k n_i \quad (2)$$

Así, cada individuo se evalúa por una función como la mostrada en (3).

$$Aptitud(c) = \left( \frac{N}{D} \right) \quad (3)$$

Donde  $c$  es el cromosoma que se está evaluando,  $D$  la suma de la distancia recorrida por todos los nodos de la red y  $N$  es la sub-función de niveles del árbol, especificada en la ecuación (1).

Para el proceso de selección se han considerado dos alternativas: el *método de la ruleta* o la *selección por torneo*, que son los que predominan en los trabajos relacionados analizados. Con el *método de la ruleta* los cromosomas con mayor valor de aptitud tienen más probabilidad de ser seleccionados como padres; mientras que en la *selección por torneo* se barajan los individuos de la población y se escogen algunos para compararlos en base a su aptitud, así

se selecciona al ganador del ‘torneo’ como el individuo más apto [18].

Para determinar el método de selección del AG, de la presente propuesta, se comparó el tiempo de procesamiento del AG con cada uno de ellos. Estas pruebas se documentan en la sección 4.5

### 4.3 Cruce

Se utiliza el cruce de único punto, en el que los padres usan su información genética para producir los hijos como sigue: parte de los cromosomas padres se intercambian en algún punto de cruce que se selecciona aleatoriamente. El proceso se ilustra en la Fig. 6.

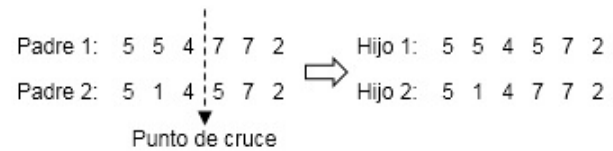


Figura 6. Operación de cruce.

### 4.4 Mutación

El proceso de mutación se adapta de la siguiente manera: en el cromosoma resultante se selecciona el gen que introduce la mayor cantidad de saltos en una ronda y se le llama *nodo crítico*. Sea  $i$  el nodo crítico y  $j$  su nodo de próximo salto; se reemplaza este último por un nuevo nodo  $z$  de tal forma que el camino  $i \rightarrow z$  debe conducir hasta la estación base con una menor cantidad de saltos que el camino  $i \rightarrow j$ , y no incrementar la distancia total del camino desde  $i$  hasta la estación base.

En el caso de la red de la Fig. 5, puede ser 1 el nodo crítico. Entonces durante el proceso de mutación se reemplazaría el alelo del índice 1 (que es 3) por 2, generando el camino  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 7$ , ya que en la red inicial (Fig. 4) los nodos 2 y 7 están dentro del mismo rango de comunicación. Igualmente se debe verificar que el nuevo camino no sea más largo (en términos de distancia total) que el camino  $1 \rightarrow 3 \rightarrow 6 \rightarrow 7$ .



Fig. 7. Tiempo de convergencia del algoritmo.

#### 4.5 Pruebas

Según un estudio publicado en [21], el tiempo necesario para que un AG converja a una solución única depende del tamaño de la población. Es evidente que cuanto mayor sea el número de individuos, se explorarán más zonas del espacio de soluciones; pero también es obvio que esto acarreará un costo computacional mayor. Por su parte, Goldberg y Deb publicaron un estudio en 1991 demostrando que el tiempo en el que un individuo se propaga a toda la población, utilizando métodos rápidos de selección, es  $O(n \cdot \log_n)$  siendo  $n$  el tamaño de la población; por lo que se debe buscar un compromiso entre el número de individuos utilizados, el método de selección utilizado y la calidad que se desea alcanzar.

En este sentido cobra importancia evaluar el tiempo de convergencia del Algoritmo Genético adaptado en este trabajo, respecto a la cantidad de nodos de la red, usando diferentes métodos de selección (torneo y ruleta).

El prototipo que ha sido desarrollado en el lenguaje de programación java, haciendo uso del paquete JGAP (*Java Genetic Algorithms Package*), que es un componente de algoritmos genéticos y programación genética provisto como una librería de java. JGAP, es un software libre distribuido bajo la licencia pública GNU y está disponible para descarga en <http://jgap.sourceforge.net/>.

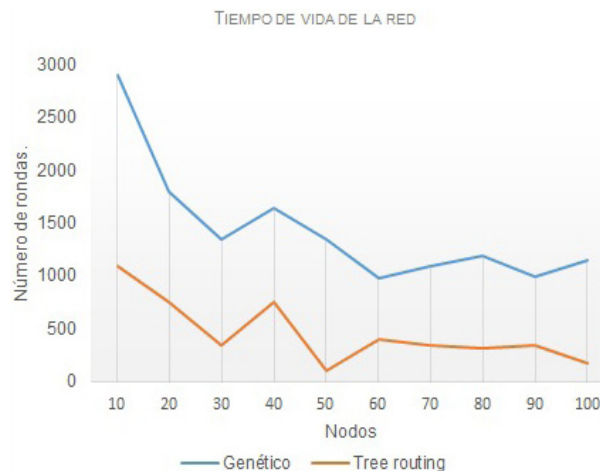


Fig. 8. Tiempo de vida de la red con la ejecución del algoritmo.

Las pruebas se llevaron a cabo usando el IDE de Java Eclipse Indigo (Service Release 1) en un computador con procesador AMD E-450 de 1.65 GHz y RAM de 4GB, corriendo sobre la plataforma Windows 7 Ultimate de 64 bits.

Se consideró un escenario de red donde los nodos fuente están desplegados en un área de 2000 m. de diámetro y la estación base está en el centro de ellos. Se ejecutó 10 veces el algoritmo de selección de rutas expuesto en este documento, variando la cantidad de nodos desde 10 hasta 100. Por cada ejecución se probaron los dos métodos de selección: torneo y ruleta, con el fin de determinar cuál de los dos tiene un comportamiento favorable para el algoritmo de enrutamiento, en términos de tiempo de ejecución.

Los resultados de las mediciones se ilustran en la Fig. 7. A continuación se presenta una síntesis de las observaciones.

- Con la selección por torneo, el tiempo de ejecución del AG varía en proporciones mínimas a medida que varía la cantidad de nodos, comparado con la selección por ruleta en la cual el tiempo de ejecución del algoritmo sí se incrementa a medida que se aumentan los nodos en la red.
- Para cualquier cantidad de nodos en la red, el AG toma más tiempo en ejecutarse cuando se usa el método de la ruleta, que cuando se usa el de torneo.



- La selección de cromosomas en el método de la ruleta está sujeto a eventos probabilísticos, lo cual podría introducir inexactitud en el resultado; además ralentiza la ejecución del algoritmo a medida que aumentan los nodos de la red, mientras que el método de selección por torneo realiza un proceso de comparación entre los individuos, demostrando ser eficiente computacionalmente para el contexto de aplicación de WSN trabajado en el presente artículo.
- Utilizando el método de selección por torneo, en el algoritmo descrito en este trabajo, se crearon árboles de enrutamiento variando la cantidad de nodos desde 10 hasta 100, para medir, por medio de simulación, el tiempo de vida de la red (número de rondas hasta que el primer nodo muera) en cada caso.
- Los resultados se compararon con el algoritmo especificado por ZigBee, Tree Routing, cuyo funcionamiento se puede consultar en [23]. En la Figura 8 están los valores comparados. El modelo de energía usado es el mismo definido en [13]; la ubicación de la estación base se asume en la coordenada (0,0).

## 5. TRABAJOS FUTUROS

Para generar una nueva versión del algoritmo, se han considerado los siguientes aspectos sobre los cuales se está trabajando en el momento:

- Inclusión del elitismo.
- Creación de una función de aptitud multi-objetivo.
- Diseño de una técnica para recalcular la topología de la red, de manera dinámica, una vez que exista al menos un nodo cuyas condiciones de trabajo se hayan deteriorado al límite.
- Teniendo en cuenta que la ejecución del AG es una tarea compleja a nivel computacional [19], y que la cantidad de nodos es relativamente alta al tratarse de extensiones (terminos de hectáreas) de campos de cultivo, una vez implementada la nueva versión del AG, se identificará el proceso que toma mayor tiempo de ejecución y, a partir de este resultado, se diseñará una técnica para indexar el dígrafo inicial (Figura 4) con el fin de agilizar el recorrido del AG.

## 6. CONCLUSIONES

El trabajo realizado ha permitido conocer algunos retos que enfrentan los proyectos de agricultura de precisión, que han incluido una WSN en su solución. También ha logrado la primera etapa de una propuesta de enrutamiento basada en AG para una WSN, teniendo en cuenta características del contexto de la agricultura de precisión.

Así mismo se han identificado los alcances del Algoritmo Genético y su versatilidad para ser adaptado a diferentes contextos. Los resultados de las pruebas permiten identificar que para el AG adaptado, propuesto en este artículo, el método de selección por torneo tiene ventaja, computacionalmente hablando, en relación al método de la ruleta.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia “Colciencias” y a la Universidad del Cauca, por el apoyo brindado a la Ing. Ángela María Rodríguez, a través del programa de Jóvenes Investigadores; Convocatoria 525-2011.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. K. Singh, M. P. Singh, and D. K. Singh, “Routing protocols in wireless sensor networks—A survey,” *International Journal of Computer science and engineering Survey (IJCSSES)*, vol. 1, no. 2, pp. 63–83, 2010.
- [2] S. Hussain and O. Islam, “An energy efficient spanning tree based multi-hop routing in wireless sensor networks,” in *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*, 2007, pp. 4383–4388.
- [3] M. L. Marote, “Agricultura de Precisión”, *Ciencia y Tecnología 10*, ISEU, 2010.
- [4] S. Yoo, J. Kim, T. Kim, S. Ahn, J. Sung, and D. Kim, “A2S: Automated Agriculture System based on WSN,” in *Consumer Electronics, 2007. ISCE 2007. IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 1–5.
- [5] J. Panchard, S. Rao, T. V. Prabhakar, J.-P. Hubaux, and H. S. Jamadagni, “Commonsense net: A wireless sensor network for resource-poor

- agriculture in the semiarid areas of developing countries,” *Information Technologies and International Development*, vol. 4, no. 1, pp. 51–67, 2007.
- [6] Y. Wang, L. Huang, J. Wu, and H. Xu, “Wireless sensor networks for intensive irrigated agriculture,” in *Consumer Communications and Networking Conference, 2007. CCNC 2007. 4th IEEE*, 2007, pp. 197–201.
- [7] J. Hu, L. Shen, Y. Yang, and R. Lv, “Design and implementation of wireless sensor and actor network for precision agriculture,” in *Wireless Communications, Networking and Information Security (WCNIS), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 571–575.
- [8] N. P. Karthickraja, V. Sumathy, and J. Ahamed, “A novel hybrid routing protocol for data aggregation in agricultural applications,” in *Communication Control and Computing Technologies (ICCCCT), 2010 IEEE International Conference on*, 2010, pp. 227–231.
- [9] F. Chiti, A. De Cristofaro, R. Fantacci, D. Tarchi, G. Collodo, G. Giorgetti, and A. Manes, “Energy efficient routing algorithms for application to agro-food wireless sensor networks,” in *Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on*, 2005, vol. 5, pp. 3063–3067.
- [10] A. H. Kabashi and J. Elmighani, “A technical framework for designing wireless sensor networks for agricultural monitoring in developing regions,” in *Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies, 2008. NG-MAST’08. The Second International Conference on*, 2008, pp. 395–401.
- [11] L. Karim, N. Nasser, and T. El Salti, “Efficient Zone-based Routing Protocol of Sensor Network in agriculture monitoring systems,” in *Communications and Information Technology (ICCIT), 2011 International Conference on*, 2011, pp. 167–170.
- [12] S. K. Gupta, P. Kuila, and P. K. Jana, “GAR: An Energy Efficient GA-Based Routing for Wireless Sensor Networks,” in *Distributed Computing and Internet Technology*, Springer, 2013, pp. 267–277.
- [13] A. Bari, S. Wazed, A. Jaekel, and S. Bandyopadhyay, “A genetic algorithm based approach for energy efficient routing in two-tiered sensor networks,” *Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 4, pp. 665–676, Jun. 2009.
- [14] F. Dressler and O. B. Akan, “A survey on bio-inspired networking,” *Computer Networks*, vol. 54, no. 6, pp. 881–900, Apr. 2010.
- [15] A. Chakraborty, S. Kumar, and M. Kanti, “A genetic Algorithm Inspired Routing Protocol for Wireless Sensor Networks,” *International Journal of Computational Intelligence Theory and Practice*, vol. 6 no. 1, 2011.
- [16] I. Apetroaei, I.-A. Oprea, B.-E. Proca, and L. Gheorghe, “Genetic algorithms applied in routing protocols for wireless sensor networks,” in *Roedunet International Conference (RoEdu-Net), 2011 10th*, 2011, pp. 1–6.
- [17] O. Islam, S. Hussain, and H. Zhang, “Genetic algorithm for data aggregation trees in wireless sensor networks,” Jodrey School of Computer Science Acadia University, Canada, Technical Report, TR-2007-001, 2007.
- [18] A. León Javier, “Diseño e implementación en hardware de un algoritmo bio-inspirado”, Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Computación, México D.F., 2009.
- [19] J. I. Hidalgo and C. Cervigón Rückauer, “Una revisión de los algoritmos evolutivos y sus aplicaciones,” *Enlaces: revista del CES Felipe II*, no. 2, p. 5, 2004.
- [20] A. Das, and S. Das, “Power Conservation in Wireless Sensor Networks: A Graph-Theoretic Approach”, *45th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, pp.1-6, Marzo 2011.
- [21] J. I. Hidalgo, and C. Cervigón, “Una revisión de los algoritmos evolutivos y sus aplicaciones”, *Revista del CES Felipe II, Universidad Complutense de Madrid*, no 2, Diciembre 2004.
- [22] Chengxin Yan; Jing Hu; Lianfeng Shen; and Tiecheng Song, “RPLRE: A Routing Protocol Based on LQI and Residual Energy for Wireless Sensor Networks,” *Information Science and Engineering (ICISE), 2009 1st International Conference on*, vol., no., pp. 2714-2717, December 2009 doi: 10.1109/ICISE.2009.1041.
- [23] M. Al-Harbawi; M. F. A. Rasid; and N. K. Noordin, “Improved Tree Routing (ImpTR) Protocol for ZigBee Network”, *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, vol. 9, no. 10, October 2009.

## DEGRADACIÓN DE SUELOS ANTE TENSIÓN DE CORTE CÍCLICA

### SOIL DEGRADATION UNDER CICLIC SHEAR STRESS

**Rubén Ángel Galindo-Aires, Ph.D**

*Departamento Ingeniería de caminos, canales y puertos  
Universidad Politécnica de Madrid, España  
ragalindoa@hotmail.com*

(Recibido el 01-05-2013. Aprobado el 30-06-2013)

**Resumen.** En este artículo se estudia el fenómeno de degradación y se proponen dependencias con las variables que intervienen en el problema, planteando la formulación matemática que caracteriza la deformación acumulada y la generación de presión intersticial asociada al fenómeno cíclico. Primeramente se plantea el marco teórico necesario para el adecuado estudio del fenómeno dinámico asociado al proceso de carga tangencial cíclica. A continuación, se introduce un nuevo concepto llamado “ciclo límite” que sirve de referencia para el seguimiento de la degradación del suelo. Por último, se identifican las variables fundamentales que intervienen en el problema de estudio y se plantea, en base a una completa campaña de ensayos disponibles de una investigación anterior, la formulación matemática que permite la caracterización y cuantificación de la deformación acumulada y la generación de presión intersticial generada con el número de ciclos de carga.

**Palabras clave:** Degradación, corte cíclico, generación de presión intersticial, suelos cohesivos, dinámica de suelos.

**Abstract.** The article describes the phenomenon of degradation and dependencies with the variables involved in the dynamic problem are proposed, considering the mathematical formulation that characterizes the cumulative deformation and pore pressure generation associated with cyclical phenomenon. First, the necessary theoretical framework for the proper study of dynamic phenomena associated with the process of cyclic shear load is raised. Then, a new concept called “limit cycle” that serves as a reference for monitoring soil degradation is introduced. Finally, the fundamental variables involved in the study problem are identified and is raised, based on an earlier test campaign of an available research, the mathematical formulation that allows the characterization and quantification of the accumulated deformation and generation of pore pressure with the number of load cycles.

**Keywords:** Degradation, simple shear, pore pressure generation, cohesive soils, soil dynamics.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las características de comportamiento de un suelo sometido a carga cíclica tangencial, crea los siguientes efectos desfavorables:

- Amplificación dinámica en problemas reales, en función de las acciones actuantes, características de los terrenos, contornos y geometría que los definan.
- Fenómenos de fatiga de los materiales resistentes que provocarían la disminución de los parámetros de respuesta.
- Generación de presión intersticial creciente con los ciclos de carga tangencial en los suelos blandos.

Consideramos que el fenómeno fundamental y diferenciador, frente a otros problemas y planteamientos de la mecánica de suelos, es el de generación de presión intersticial que puede ocasionar, en el caso de terrenos granulares poco densos, fenómenos de licuefacción y en el caso de suelos blandos cohesivos, grandes deformaciones en pocos ciclos de carga.

Es objeto del artículo obtener una formulación matemática del fenómeno de degradación y de generación de presión intersticial basada en una completa campaña de experimentación disponible.

En el apartado 2 se realiza, en primer lugar, la descripción del método de análisis teórico de la degradación de los suelos, así como una breve descripción de las muestras y de la etapa experimental. En el apartado 3 se presentan algunas consideraciones de los resultados obtenidos experimentalmente, que permiten la formulación matemática de la generación de presión intersticial producida y de la deformación acumulada con el número de ciclos, debido a la degradación inducida por la carga cíclica. Por su parte, en el apartado 4 se presentan las principales es del trabajo. Al final del documento se añaden las nuevas líneas de investigación y las referencias empleadas.

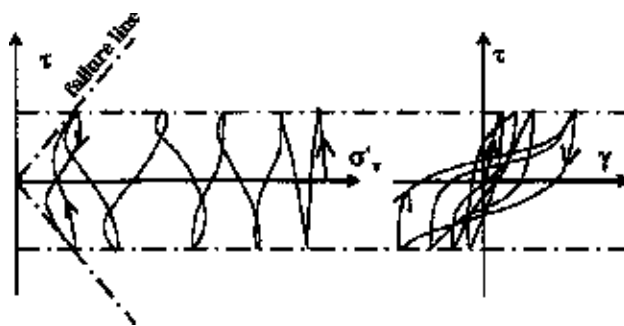


Fig. 1. Resultados experimentales tensión-deformación, obtenidos en muestras sometidas a corte cíclico no drenado (de Groot, Bolton and Foray [1]).

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Estudio dinámico del suelo

El comportamiento de los suelos blandos, bajo la actuación de cargas tangenciales cíclicas, se caracteriza por cambios volumétricos importantes y relaciones tensión-deformación que resultan claramente inelásticas. La importancia de estos fenómenos viene dada principalmente por la amplitud de la tensión tangencial que recibe el suelo, su estado de confinamiento y sus características de compresibilidad que lo definen como suelo blando. Al aumentar el nivel de deformación tangencial, producida en el suelo, las curvas tensión-deformación muestran un comportamiento inelástico y no lineal y, en cada rama de respuesta, van adoptando una geometría muy característica en forma de "s". En la Fig. 1 (tomada de [1]) se muestra, en el gráfico de la derecha, las formas de dichas curvas tensión-deformación —según el nivel de deformación alcanzado—, representándose en ordenadas la carga tangencial solicitante  $\tau$  y en abscisas la deformación de corte producida  $\gamma$ ; también se representa en dicha figura, en el gráfico de la izquierda, el fenómeno asociado de generación de presión intersticial del suelo saturado (en abscisas se representa la tensión vertical efectiva entre partículas del suelo  $\sigma'_v$ , que se hace cada vez más pequeña, lo cual es debido a que parte de la tensión vertical actuante es absorbida por el agua intersticial).

El hecho de que los ciclos tensión-deformación sean cada vez más tendidos es la manifestación de la degradación de las propiedades resistentes del suelo que se hace menos rígido, como consecuencia de la pérdida de confinamiento al generarse presión intersticial en exceso y de la fatiga del material some-

tido a un continuado y repetido nivel tensional que, en general, será de amplitudes y periodos variables.

## 2.2 Caracterización del ciclo límite

En unos determinados modelos matemáticos conocidos como “modelos de la superficie frontera”, se define una superficie límite que sirve de proyección a los estados interiores y que no será superada en ningún momento del proceso de carga; es decir, incorporar las fronteras del dominio para la tensión tangencial supone definir un ciclo límite [2] que, en principio, no puede ser superado. *A priori*, se puede pensar que el ciclo máximo posible vendrá dado por el valor de rotura alcanzable en el ensayo de corte simple estático, de forma que los valores que se alcanzan habitualmente, como tensión tangencial límite o de rotura  $\tau_{lim}$  de un ensayo de corte, se cuantifican con  $\tau_{lim} = ct_{\theta} \cdot \sigma'_{v0}$ , siendo  $\sigma'_{v0}$  la tensión vertical efectiva inicial y la constante un valor que, en virtud de las propiedades del suelo ensayado, se suele encontrar entre 0,2 y 0,35.

La definición del ciclo límite que se propone en este artículo permite entender la degradación en relación a la magnitud de las deformaciones que se vayan alcanzando (deformación límite  $\gamma_{lim}$ ) al aplicar la tensión límite, es decir, la máxima tensión del ciclo límite.

En un proceso de degradación del suelo con el número de ciclos, es evidente que la deformación máxima alcanzable va aumentando al evolucionar el número de ciclos para la misma secuencia de carga cíclica; en este caso se definiría un ciclo límite para cada ciclo. Por tanto se trata de definir una deformación máxima que, según el número de ciclos, le corresponda al valor de la máxima tensión actuante.

Sin embargo, según la llamada “teoría del estado crítico”, la rotura como tal, en suelos blandos, supone la evolución de la tensión de corte hasta mantener un nivel prácticamente constante en el que la muestra de suelo sigue deformándose a la misma velocidad. Así, para establecer la rotura en los ensayos de corte simple estáticos, se fija un nivel máximo de deformación donde se detiene el ensayo que corresponde al entorno del 15%. Este hecho no hace apropiado identificar el ciclo límite con el punto de rotura del ensayo estático ya que le correspondería una determinada deformación y, por tanto, perdería sentido el uso de dicho concepto de ciclo límite para definir la

degradación en función de la deformación máxima alcanzable.

En nuestro caso, se dispone de un suelo blando procedente del subsuelo del Puerto de Barcelona sobre el que, fruto de una investigación anterior [3], se realizaron ensayos de corte simple cíclico, combinando diferentes proporciones de carga tangencial inicial y cíclica hasta un total de 142 ensayos, de los cuales 20 corresponden al corte simple estático. El ensayo tangencial estático, para dichas muestras, dio tensiones de rotura con valores aproximados de  $\tau_{lim} = 0,30 \cdot \sigma'_{v0}$ . Evidentemente, en los ensayos de corte simple cíclicos no se lleva la carga externa a ese máximo obtenido en la prueba estática sino que, como va a haber además degradación, se alcanzó un porcentaje menor que la que produce la rotura estática; por tanto, se disponen ensayos (sin carga de corte inicial) al 15%, 20% y 25% de la tensión vertical efectiva inicial  $\sigma'_{v0}$ . Además, la deformación máxima a la que se llega en cada ensayo varía con cada ciclo, subiendo con el número de ciclos.

Para definir el ciclo límite se toman como valores frontera, para un determinado ciclo de un ensayo, los valores de la deformación máxima (deformación límite) alcanzada en dicho ciclo y como valor de la tensión tangencial frontera, su correspondiente tensión de corte. Esto es así por varios motivos, el primero de ellos es que los valores frontera —deformación y tensión— están referidos y de producirse deben alcanzarse los dos en el mismo momento del proceso de carga. Asociar a la deformación de corte máxima un valor diferente de la tensión de corte, con la que se produjo en un ensayo, supone que la tensión de corte que produce esa deformación de corte máxima, en el modelo que usemos, será diferente a la real. Por otro lado, hay que notar que matemáticamente no hay ninguna incongruencia ni bloqueo de la solución al introducir valores superiores a los valores límite.

La mejor aproximación al comportamiento del suelo se logra utilizando como ciclo límite el que corresponde al de mayor tensión de corte cíclica, previsible en el problema geotécnico que se plantea resolver. Así, por ejemplo, si disponemos de ensayos al 15% y 20% de la tensión vertical efectiva inicial, la mejor elección de parámetros para un problema geotécnico, que no someterá al suelo en ningún momento a tensiones superiores al 15%, se obtendrá utilizando como ciclo límite el que corresponde al 15%.

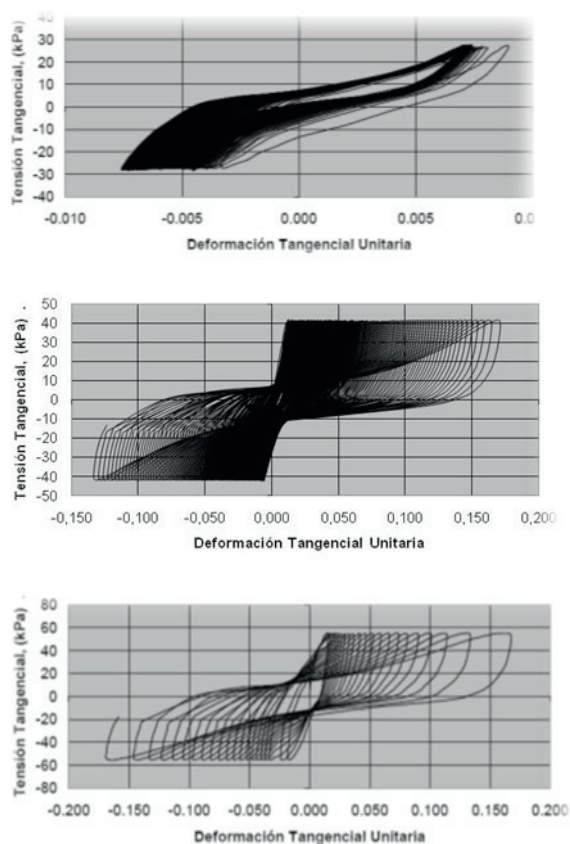


Fig. 2. Representación de los ciclos correspondientes a ensayos reales disponibles, para una tensión efectiva de consolidación de 277 kPa y una tensión de corte cíclica respecto a dicho valor, para los gráficos del superior al inferior, del 10%, 15% y 20% respectivamente.

A la luz de los ensayos experimentales [3] podemos observar un cambio brusco de comportamiento para valores de tensiones cíclicas situadas entre el 10% y el 15% de la tensión efectiva vertical de consolidación. A continuación, en la Fig. 2, se muestra, a modo de ejemplo, los ciclos obtenidos experimentalmente [3] en diferentes condiciones tensionales cíclicas para muestras sometidas a una tensión efectiva vertical de consolidación de 277 kPa.

En la Fig. 2 se observa cómo los ciclos para las muestras sometidas al 10% de la tensión efectiva vertical de consolidación, tienen una forma del ciclo cerrada que supone un amortiguamiento del 13% aproximadamente; sin embargo, para el 15% y el 20% la forma del ciclo es claramente histerética con amortiguamientos superiores al 20% y cercanos al 25% en ambos casos.

A este respecto, Wilson y Greenwood [4] efectuaron ensayos cíclicos sobre muestras de arcilla inalterada, normalmente consolidada y sobre arcilla remoldeada, concluyendo que para relaciones de esfuerzos cíclicos (tensión de corte cíclica entre tensión tangencial de rotura), menores de 0,37, el suelo tenía un comportamiento predominantemente elástico.

La observación experimental de los ensayos disponibles, junto con investigaciones como la citada en el párrafo anterior, hacen pensar en la existencia de un esfuerzo cíclico crítico tal que, para tensiones cíclicas superiores, los ciclos adoptan la característica forma de “s” mostrando un comportamiento claramente histerético; sin embargo, con valores inferiores a dicho valor de tensión cíclica crítica, los ciclos que se forman son mucho más cerrados, exhibiendo un comportamiento claramente elástico.

### 2.3 Caracterización de la degradación

La dependencia del ciclo límite que hemos definido es tal que, si su definición permanece constante en todo el proceso de carga cíclica actuante, implica que bajo solicitaciones periódicas de amplitud constante nos moveremos siempre en el mismo ciclo cerrado. Es decir, no se consideraría la degradación de las propiedades deformacionales de respuesta del suelo, al repetirse con el tiempo la solicitación actuante y por tanto el número de ciclos.

Así pues, resulta necesario ir adaptando la deformación máxima que define el ciclo límite. Partimos de la  $\gamma_{lim}$  correspondiente a la tensión máxima del ciclo límite elegido para representar el problema de estudio y, con el número de ciclos, damos el incremento de deformación respecto al ciclo anterior.

Como la historia de carga pasa por diferentes niveles tensionales en los sucesivos ciclos que van produciéndose, será necesario traducir el daño acumulado en la historia de carga real al número de ciclos que produciría el mismo daño para la amplitud del ciclo en curso. Este paso supone incorporar la dependencia de la historia pasada en la evaluación de la degradación y, por tanto, en la formación de los diferentes ciclos; así mismo, utiliza el concepto de daño acumulado pero de forma diferente al definido convencionalmente en textos clásicos. En nuestro caso, introducimos el concepto de daño acumulado en deformación, que hace referencia al número de ciclos  $N_i$  de amplitud de tensión tangencial constante  $\tau_i$  que alcanza la misma deformación máxima que toda la his-

toria de carga anterior recibida y notaremos con  $N_{eq}$  al número de ciclos equivalentes así obtenidos.

Bajo la consideración de la teoría de estado crítico —como válida—, según muestran las pruebas de ensayo, se pueden identificar los puntos extremos de los ciclos límite, al evolucionar el número de ciclos, como puntos de igual tensión tangencial a los que se les asocia la deformación límite del ciclo  $\gamma_{lim}$  (según el ajuste degradativo con el número de ciclos para las condiciones de cada ensayo), de forma que el efecto de la degradación, para un cierto nivel tensional, es equivalente al que se produce en la deformación máxima continuamente creciente que se adquiere cuando se alcanza el estado crítico.

Notamos que los ciclos límite se conforman únicamente con los ciclos sin carga estática inicial, de tal forma que dicho efecto no supone ninguna variación de las leyes constitutivas del material. Sin embargo, en lo que sí influyen las tensiones iniciales anteriores a las cíclicas, y además lo hace sustancialmente, es en la degradación; las leyes de evolución de los puntos representativos de la deformación máxima del ciclo límite sí se ven muy influenciadas por este hecho, es decir, por las diferentes condiciones de corte estático inicial.

#### 2.4 Generación de presión intersticial

La reacción del suelo frente a los esfuerzos cíclicos se traduce en variaciones de la posición intersticial, debido a la tendencia a las variaciones de volumen. En suelos blandos la tendencia suele ser hacia la contracción y, por consiguiente, las presiones intersticiales aumentan cuando las partículas buscan la posición más estable en menos volumen, presionando el agua, disminuyendo las tensiones efectivas y, por tanto, la resistencia del suelo.

Frente a estados de carga cíclica isotrópica no hay degradación, toda la carga se la llevaría el agua intersticial, de forma que se cargaría y descargaría al ritmo de la sollicitación actuante. Sin embargo, frente a carga tangencial, en condiciones no drenadas, para cada magnitud de la carga de corte se llega a una situación de equilibrio que se alcanza cuando se han reacomodado las partículas y ya no hay más cambios de volumen, absorbiendo el corte el suelo y manteniendo el agua su presión intersticial en exceso, máxima para esa carga.

En particular, es muy notable, para las muestras disponibles, la disminución de la presión intersticial generada, en el primer ciclo, para tensiones tangenciales cíclicas superiores al 10% de la tensión efectiva vertical de consolidación.

### 3. ETAPA EXPERIMENTAL

#### 3.1 Identificación de variables

De forma general, Hardin y Black [5] consideraron como variables, que intervienen en la caracterización que tratamos de realizar, las que se comentan a continuación:

$$G = f(\sigma', \tau_D, \tau_c, e, F, s, C, f, T, \theta, \Pi) \quad (1)$$

Donde:

$G$  es el módulo de rigidez transversal

$\sigma'$  es la tensión axial efectiva

$\tau_D$  es la tensión tangencial inicial

$\tau_c$  es la amplitud de la vibración

$e$  es el índice de huecos

$F$  es la historia de vibraciones

$s$  es el grado de saturación

$C$  representa características de las partículas

$f$  es la frecuencia de la vibración

$T$  representa los efectos secundarios con el tiempo

$\theta$  representa la estructura del suelo

$\Pi$  es la temperatura

Los datos disponibles en este trabajo [3] corresponden al ensayo de corte simple. En este equipo se consigue mantener toda la muestra en deformación de corte simple, ya que las tensiones son las mismas sobre cualquier plano horizontal, puesto que las paredes laterales permanecen planas al estar formadas

por un conjunto de anillos de pequeño espesor, que confina la muestra, situados uno sobre otro y en cuyo hueco interior se sitúa la muestra cilíndrica a ensayar.

Teniendo en cuenta que se dispone de ensayos de corte simple cíclico no drenados [3], bajo diferentes condiciones de combinación de cargas estáticas y cíclicas y con un periodo de carga cíclica igual a 10 segundos para todas las muestras y que las muestras utilizadas corresponden a un terreno saturado que se encuentra en condiciones normalmente consolidado o ligeramente sobreconsolidado, resulta justificado la consideración de las siguientes variables:

- Tensión vertical efectiva  $\sigma'_v$  o equivalentemente  $\Delta u \Delta u$  en términos de presión intersticial.
- Tensión de corte inicial  $\tau_D$
- Amplitud de los ciclos de tensión tangencial  $\tau_c$
- El número de ciclos actuantes  $N$
- Módulo de rigidez transversal secante  $G$ , en cada ciclo, que equivalentemente puede ser expresado como la deformación de corte máxima del ciclo  $\gamma_{max}$  de amplitud  $\tau_c$
- Índice de huecos  $e$
- Índice de plasticidad  $IP$

En las variables elegidas destacamos la adimensionalización respecto a la tensión vertical efectiva de consolidación. Esto es considerado debido a que, por un lado, según las investigaciones de Zergoun y Vaid [6], la respuesta y los valores de los parámetros dinámicos del suelo, en unas determinadas condiciones, serán semejantes a cualquier otra si los valores de la tensión tangencial de corte estática y cíclica están, para dichas situaciones, en la misma relación respecto a la tensión vertical efectiva de campo y, por otro lado, Matsui [7] concluyó que para una misma relación de tensiones cíclicas y un determinado número de ciclos, la presión intersticial generada, normalizada a la tensión vertical efectiva de consolidación, es la misma para diferentes valores de dicha tensión efectiva de confinamiento.

Se utilizarán como variables dependientes:  $\gamma_{lim}$  y  $\Delta u$ . En particular, el empleo de la variable  $\gamma_{lim}$  se centra en las necesidades de predecir, mediante expresiones empíricas, la evolución con el número de ciclos de la deformación máxima alcanzable en cualquier situación de combinación de acciones estáticas y cíclicas.

Se plantea un ajuste que considera como estructuras de fórmulas “generales” ecuaciones que relacionan las variables  $\tau_D/\sigma'_{vD}$ ,  $\tau_c/\sigma'_{vD}$ ,  $N$ ,  $\gamma_{lim}$  y  $\Delta u$  y, sobre éstas, se considerarán  $IP$  y  $e$  como parámetros del modelo a introducir según el tipo de suelo.

En este artículo se obtienen dos expresiones que ajustan los valores de la deformación máxima y del incremento de la generación de presión intersticial, en función de las mismas variables. Este hecho justifica, en gran parte, la afirmación de que la degradación es producida fundamentalmente por la generación de presión intersticial; es decir:

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{lim} &= f\left(\frac{\tau_D}{\sigma'_{vD}}, \frac{\tau_c}{\sigma'_{vD}}, N, e\right) \\ \Delta u &= g\left(\frac{\tau_D}{\sigma'_{vD}}, \frac{\tau_c}{\sigma'_{vD}}, N, e\right) \end{aligned} \right\} \rightarrow \Delta u = h\left(\gamma_{lim}, \frac{\tau_D}{\sigma'_{vD}}, \frac{\tau_c}{\sigma'_{vD}}, e\right) \quad (2)$$

### 3.2 Metodología de ajuste

Debido al número de variables necesarias a manejar en las ecuaciones de regresión, se utilizarán los métodos de regresión múltiple, llamando regresoras o predictoras a las variables independientes.

La estimación del vector de parámetros de ajuste se realiza por el método de mínimos cuadrados, utilizando un procedimiento iterativo que, partiendo de los valores iniciales, permite iniciar el algoritmo iterativo alcanzando, en cada etapa, un nuevo estimador hasta obtener la convergencia según un criterio predefinido.

Es importante observar que la estructura de las fórmulas debe ser introducida por el investigador, de tal forma que el ajuste estadístico nos dé los parámetros de dicha relación propuesta. En consecuencia, se han probado multitud de funciones de ajuste y de estructuras de expresiones para las diferentes relaciones entre variables. En el caso de la generación de presión intersticial, las gráficas de ensayos simples mostraban claramente la tendencia logarítmica al aumentar el número de ciclos, siendo buscada con muchas funciones de prueba la forma de integrar, en una única expresión, sus diferentes comportamientos. En el caso de la deformación máxima alcanzada en cada ciclo, se observa una tendencia de crecimiento potencial con el aumento del número de ciclos; así mismo, se ha realizado el esfuerzo de experimentación numérica con una extensa lista de funciones de ajuste.



En particular se disponen de ensayos realizados para tensiones verticales efectivas de confinamiento, expresadas en kPa, de 277, 283, 294, 311, 315, 328, 343, 347, 349, 364, 366, 373, 384, 389, 401 y 413 bajo combinaciones de tensiones tangenciales iniciales y cíclicas que se indican a continuación:  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.15$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.20$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.25$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.05$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.20$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.05$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.25$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.1$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.15$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.1$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.20$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.15$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.10$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.15$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.15$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.20$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.05$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.20$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.10$ ,  $\tau_D/\sigma'_{vD} = 0.25$  y  $\tau_c/\sigma'_{vD} = 0.05$ .

Para cada conjunto de muestras realizadas, a una cierta tensión vertical efectiva de consolidación, se dispone de una medida del índice de plasticidad y el peso específico. Como se dispone también de la humedad natural de todas las muestras, se puede estimar el índice de huecos correspondiente.

De cada ensayo se tienen registrados los valores de la generación de presión intersticial y la deformación máxima producida en cada ciclo de carga cíclica.

### 3.3 Expresión de ajuste de la degradación

Con los criterios comentados en el apartado anterior, se ajustan los datos disponibles con el programa estadístico SPSS (*Statistical Package for the Social Sciences*) obteniéndose la siguiente expresión matemática que indica la dependencia de la deformación máxima de cada ciclo:

$$\gamma_{lim} = c_1 \left( \frac{|\tau_D| + |\tau_c|}{|\sigma'_{vD}|} \right)^{c_2} N^{c_3} \left| \frac{\tau_c}{\sigma'_{vD}} \right| \quad (3)$$

Donde se tiene que  $c_1 = 2e^{1.5}$ ,  $c_2 = 2,8$  y  $c_3 = 1 + e$ .

Además, es necesario añadir la deformación máxima en caso de no haber degradación; es decir, la deformación máxima de corte alcanzaría en el primer ciclo,  $\gamma_{lim,D}$ . Así:

$$\gamma_{lim,D} = \frac{\tau_D}{G_D} + \frac{\tau_{lim} - \tau_D}{G_{lim}} \quad (4)$$

Donde  $G_D$  es el módulo de rigidez transversal secante del suelo, frente a la actuación de una carga tangencial estática  $\tau_D$ ; por su parte,  $G_{lim}$  es el módulo

secante de rigidez transversal dinámico, frente a la actuación de la carga cíclica  $\tau_{lim}$  de corte correspondiente al ciclo límite.

La formulación de la degradación se reduce al hecho de añadir incrementos de deformación de corte, según la ecuación, a la deformación de corte inicial estimada  $\gamma_{lim,D}$ .

El ajuste se ha realizado estratificadamente, dando el mismo peso a todos los casos de combinación. Se ha obtenido un coeficiente de correlación múltiple, en términos globales, de 0.81, dando valores parecidos en todos los casos de combinación de carga analizados por separado.

Como se puede observar, en la fórmula presentada no aparece el índice de plasticidad, esto es debido a que no se encontró dependencia alguna con él. La introducción de dicha variable no suponía el aumento de la correlación obtenida. Por el contrario, los valores de los parámetros de ajuste  $c_1$  y  $c_3$  se han hecho dependientes del índice de huecos. La introducción de dicha variable en la estructura de la relación de ajuste, sube significativamente dicha correlación.

El correcto ajuste realizado tiene como consecuencia directa la predicción de la deformación permanente, sin necesidad de utilizar fórmulas de ajuste independientes, como se propone en otros trabajos.

Las fórmulas de este apartado están deducidas para cargas cíclicas de amplitud constante, como corresponde a los ensayos disponibles; sin embargo, sabemos que esa situación es ideal y es necesario emplear el concepto de daño acumulado que se introdujo anteriormente, entrando en las fórmulas ajustadas con el número de ciclos equivalentes  $N_{eq}$ . Como el número de ciclos equivalentes es una medida del daño acumulado, no limitamos su campo de validez a números enteros.

### 3.4 Expresión de ajuste de la generación de presión intersticial

Al igual que en el apartado anterior, pero para obtener una expresión de la generación de presión intersticial en exceso  $u$ , se ha realizado el ajuste a los datos disponibles con el programa estadístico utilizado, obteniéndose la siguiente expresión matemática:

$$\frac{u}{\sigma'_{vb}} = \alpha_1 \left| \frac{\tau_c}{\sigma'_{vb}} \right| \ln N + \alpha_2 \left| \frac{\tau_b}{\sigma'_{vb}} \right| + \alpha_3 \left| \frac{\tau_c}{\sigma'_{vb}} \right| \quad (5)$$

Donde  $\alpha_1 = 0,35(1 + \vartheta)$ ,  $\alpha_2 = 1,2\vartheta^{1,5}$  y  $\alpha_3 = 1$ .

Expresando (5) incrementalmente en un dominio discreto para el número de ciclos:

$$\frac{\Delta u}{\sigma'_{vb}} = \alpha_1 \left| \frac{\tau_c}{\sigma'_{vb}} \right| \ln \left( 1 + \frac{1}{N} \right) \quad (6)$$

Al igual que para el caso de la deformación límite, el ajuste realizado ha sido estratificado, dando el mismo peso a todos los casos de combinación. El coeficiente de correlación múltiple obtenido es, en términos globales, del 0.87 con valores de poca dispersión, respecto a dicho valor, en todos los casos de combinación de carga analizados por separado.

Como era de esperar, por analogía, con el ajuste de la degradación no se encontró dependencia alguna con el índice de plasticidad. Por su parte, los valores de los parámetros de ajuste  $\alpha_1$  y  $\alpha_3$  se han hecho dependientes del índice de huecos. La introducción de dicha variable, en la estructura de la relación de ajuste, sube significativamente dicha correlación.

Las fórmulas de este apartado están deducidas para cargas cíclicas de amplitud constante, como corresponde a los ensayos disponibles. La realidad supone sollicitaciones de amplitud variable para cualquier punto de suelo. Así, es válido aquí también el concepto de daño acumulado ya comentado; esto supone, simplemente, usar las fórmulas ajustadas con el número de ciclos equivalentes de presión intersticial  $N_{\vartheta q, M}$ . Como el número de ciclos equivalentes es una medida del daño acumulado, no limitamos su campo de validez a números enteros.

#### 4. CONCLUSIONES

Del artículo presentado se pueden extraer las siguientes es respecto al comportamiento dinámico de los suelos:

Se demuestra que la degradación producida en los suelos blandos, al ser sometidos a carga de corte cíclica, es el fenómeno clave para la predicción e interpretación de la generación de presión intersticial en los suelos blandos saturados.

Se presentan las variables y aspectos que afectan significativamente al proceso dinámico de estudio.

Se establece una metodología para el análisis del comportamiento dinámico referido a la degradación y generación de presión intersticial ante carga tangencial cíclica.

Se introduce para el conocimiento de suelo el concepto de ciclo límite y se da criterio para su elección a partir de los debidos ensayos experimentales de los que se dispone.

Se obtienen las estructuras de las fórmulas matemáticas de predicción para caracterizar el fenómeno evolutivo de la degradación y de la generación de presión intersticial.

#### 5. TRABAJOS FUTUROS

La evolución científica de este trabajo debe guiarse hacia las aplicaciones de casos reales de obras de ingeniería sometidas a fenómenos de cargas cíclicas en suelos. En particular, al estudio de diques rompeolas sometidos al efecto dinámico del oleaje.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. B. De Groot, M. D. Bolton & P. Foray. "Physics of liquefaction phenomena around marine structures". ASCE Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering. vol. 132, no. 4, pp. 227-243, 2006.
- [2] R. A. Galindo, "Análisis, modelización e implementación numérica del comportamiento de suelos blandos ante la combinación de tensiones tangenciales estáticas y cíclicas". Ph.D. Dirigida por A. Soriano. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2010.
- [3] C. H. Patiño, "Influencia de la combinación de tensiones tangenciales estáticas y cíclicas en la evaluación de parámetros estáticos y cíclicos de un suelo cohesivo". Ph.D. Dirigida por A. Soriano. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Universidad Politécnica de Madrid, 2009.
- [4] N. E. Wilson & J. R. Greenwood. "Pore Pressures and Strains After Repeated Loading of Saturated Clay". Canadian Geotechnical Journal, National Research Council of Canada, vol. 11, pp. 269-277, 1974.
- [5] B. O. Hardin. & A. M. Black, "Vibration modulus of normally consolidated clay". ASCE Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, vol. 94, pp. 353-369, 1968.
- [6] T. Matsui. H. Ohara & T. Ito, "Cyclic stress-strain history and shear characteristics of clay," Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 106, no. GT10, pp. 1101-1120, 1980.
- [7] M. Zergoun, & Y. P. Vaid, "Effective stress response of clay to undrained cyclic loading," Canadian Geotechnique, vol. 31, pp. 714-727, 1994.

## A PROPOSAL OF T-LEARNING: USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE PLANNING AND ONTOLOGICAL REASONING

### UNA PROPUESTA DE T-LEARNING: USANDO PLANIFICACIÓN, INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y RAZONAMIENTO ONTOLÓGICO

**Ingrid-Durley Torres-Pardo, MSc**

*Grupo de Investigación GEA. Institución  
Universitaria Salazar y Herrera.  
Medellín, Colombia.  
i.torres@iush.edu.co*

**Jaime Alberto**

**Guzmán-Luna, Ph.D**  
*Grupo de Investigación SINTELWEB.  
Universidad Nacional de Colombia.  
Medellín, Colombia.  
jaguzman@unal.edu.co*

**Miguel A. Becerra, MSc**

*Grupo de Investigación GEA. Institución  
Universitaria Salazar y Herrera.  
Medellín, Colombia.  
m.becerra@iush.edu.co*

(Recibido el 19-03-2013. Aprobado el 10-06-2013)

**Abstract.** This paper focuses on the proposition of how to use the techniques of Planning in Artificial Intelligence in conjunction with Ontological Reasoning in t-learning environments, in order to i) achieve automating processes such as, the presentation and adaption of the Learning Objects or the educational applications (composed of Learning Object); ii) address the differences of terms and meanings that can occur between multiple viewers, finally, iii) allow the reuse of learning objects in different contexts.

**Keywords:** T-learning, ai planning, ontological reasoning, differences of meanings, automated processes.

**Resumen.** Este artículo se centra en proponer cómo utilizar las técnicas de planificación de inteligencia artificial en conjunto con el razonamiento ontológico en entornos t-learning, con el fin de: i) lograr automatizar procesos tales como la presentación y la adaptación de objetos de aprendizaje o de las aplicaciones educativas (compuestas de objetos de aprendizaje); ii) abordar las diferencias de términos y significados (heterogeneidad semántica) que se pueden producir entre los múltiples espectadores, y iii) permitir la reutilización de los objetos de aprendizaje, en diferentes contextos.

**Palabras clave:** T-learning, planificación, razonamiento ontológico, heterogeneidad semántica, automatización de procesos.

## 1. INTRODUCTION

Major international efforts have been made in order to improve teaching-learning model [21]. A recent proposal is the use of the television as a teaching device (t-learning). In other words, it is possible to say that the transformation of an e-learning application on a t-learning is not necessarily trivial and sometimes needs several modifications to the system in order to be usable. In the e-learning context, Learning Objects (or LO as shorthand) have played an important role in the conceptualization of e-learning applications [17], because these LO are the main components of educational applications [16]. But how to use the LO of the e-learning in the t-learning? In this situation there are many factors that must be considered, for example:

- LO in t-learning which, unlike those of e-learning, consist mainly of audio and video (traditional TV formats) trying to reduce the maximum text appearance, since it is difficult to read;
- the LO are developed by persons that use, most of the time, terms and meanings that are different to terms and meanings known by the viewers;
- It is necessary to present only the content of interest to viewers. But ¿what happens if, the viewers are a group of persons that have different preferences?. How can we to know which is the LO that representing more the interest to all viewers?.
- Other problem is the navigability. This occurs because all process of input of user's data is made by the remote control, following in pre-defined navigation template.

This paper proposes to use the techniques of Planning in Artificial Intelligence (AI) in conjunction with Ontological Reasoning, in order to enable t-learning process automation. The main idea is to automate the presentation and adaptation of the LO, address the diversity of meanings and allow a consensus between a group of interests composed of several viewers.

To provide a more detailed vision of this paper, the article is organized as follows: section 2 defines the main concepts related to this proposal's framework. Section 3, presents some of the relevant works related. The Section 4, defines the proposal and finally,

Section 5 compiles s and future work arising from the development proposed herein.

## 2. REFERENCE FRAMEWORK

In this section, we survey and present the background knowledge with emphasis on the following areas:

### 2.1 Learning object (LO)

The use of LO is supported by three basic ideas [13]:

- The LO are digital elements, that can be converted into small learning units.
- The LO are self-described elements. This allows each LO can be manipulated independently;
- The LO are reusable; this is the ability to find and assemble the LO in different contexts and by different users.

The use of these independent small pieces that are independent and the ability to find and assemble them at will, to build them up structural models added style LEGO blocks [10] is what makes the LO one of the most attractive elements of use that has increased the interest generated by e-learning. Formally, there is a unique one definition of the concept of an LO. Nonetheless, it is convenient to consider, as an attempt to unify; the following definition: An LO will be understood as all the material structured in a significant way, and it must be related to a learning objective which must correspond to a digital resource that can be distributed and consulted online. An LO must also have a registration form or metadata that includes a list of attributes which not only describes the possible attributes of an LO, but also allows to catalogue and exchange it. In this setting, standardization is a notably recurrent topic since when one handles various types of resources for different applications and with different technologies, it becomes a key topic to continue operating current applications and even to make them grow. Among these initiatives it is highlighting the an LOM (Learning Object Metadata [13]); It is a standard that specifies the syntax of a minimum set of metadata required to complete and to adequately identify, administrate, locate and evaluate an LO. Its purpose is to facilitate the task of searching, sharing and exchanging LOs for authors, students and automatic systems.

## 2.2 AI Planning

AI Planning is a process of explicit and abstract deliberation which selects and organizes actions anticipating expected results [15]. This deliberation aims to fulfill some pre-established objectives the best way possible for it; is a problem of searching which requires finding an efficient sequence of actions leading to a system from its initial state to an objective state [10].

In essence, in a learning problem the main elements are [6]: i) the students' background/preferences, ii) the learning goals to be attained, iii) the profile-adapted LOs with their prerequisites and learning outcomes, iv) the ordering relations, and v) the tailored learning route. In order to compare to elements of learning problem with the planning, respectively we can say that is possible to represent each of the above elements, respectively to: i) initial state, ii) top level goals, iii) actions with preconditions and effects, iv) causal link relations, and v) the solution plan. Planning also deals with multi-criteria optimization, a very appealing feature for e-learning: students (and teachers) prefer the best learning route, in terms of time, competence, resources or cost, and not simply yet another route [11]. All the processes described above, are always bearing in mind that an action represents the state of knowledge that have the viewer in an instant of time specified. So is possible to model all the learning process (for this case t-learning) such as a state transition system (i.e.,

## 2.3 Ontological Reasoning

Ontologies are formal models that support web semantics [5], provide more knowledge for contents (images, videos, audio), enabling the automation of many tasks currently performed by humans. In particular, semantics seeks to produce a world where ontologies [12] allow greater task automation by structuring resources available on the web, so that software agents may analyze and execute processes such as searching, retrieving, invocation, interoperability, and automatic execution [8]. To fulfill these tasks, such ontologies must be sufficiently expressive and must be able to describe the properties of related Domains.

An ontological reasoning is a key component for working with ontologies [14]. With an ontological reasoning is possible to make inferences. The inference makes a much more valuable data because it could

have an effect on the creation of new information and lead to positive or negative effects. Each piece of information has the ability to add a lot of new information via inference. So from this way is possible to represent a knowledge base of a particular domain using an ontology, that addresses the diversity of meanings, while new knowledge is produced from the processing of the preferences and tastes of a group of users to convert it in one only specification valid for everybody, i.e. inference implementation.

## 3. RELATED WORK

This section is a brief compilation of major works of literature related to the domain of t-learning and defines how the authors have used the semantic web technologies. Specifically the review has focused on implementing solutions to: (i) payment contributions and (ii) the definition of the stage of learning process focusing. For space limits only a few works are presented in the Table 1.

An important aspect is that all authors have been working focused in the user, in recommendation system or in adaptive system. LO are considered as documents and search engines apply information retrieval methods, to retrieve the LOs that satisfy the user query. However, such work requires the viewer to scroll manually (with remote control) complete learning units.

Our proposal (see last row of Table 1) is to automate the search according to the exact requirement of the viewer (who represent users) customizing the presentation (adapting learning content to profile-viewer), the conceptual differences, own to culture and language. Finally, the approach described in the paper is inspired in several works that employ LO on digital TV to address classical problems from the personalization (T-maestro and Notube). Our proposal is related with the use of semantic models for the representation of all domain of LO and the knowledge world. The using the semantic allow, besides of personalization of the LO, we can to use too the LO of other repositories and specially, we can re-use that LO in other contexts of T-learning, defined previously by ontologies available on the web. While the AI planning technique is possible to build (in real time) a learning route (plan into IA Planning) that best suits the user profile, not force it to go through the learning content of a course.

LEARNING PROCESS	USER	LO	INPUT DEVICE
E-learning (Manual, Semiautomatic, Automatic)			
T-Learning (Manual)			

Figure 1. Elements e-learning Vs t-learning

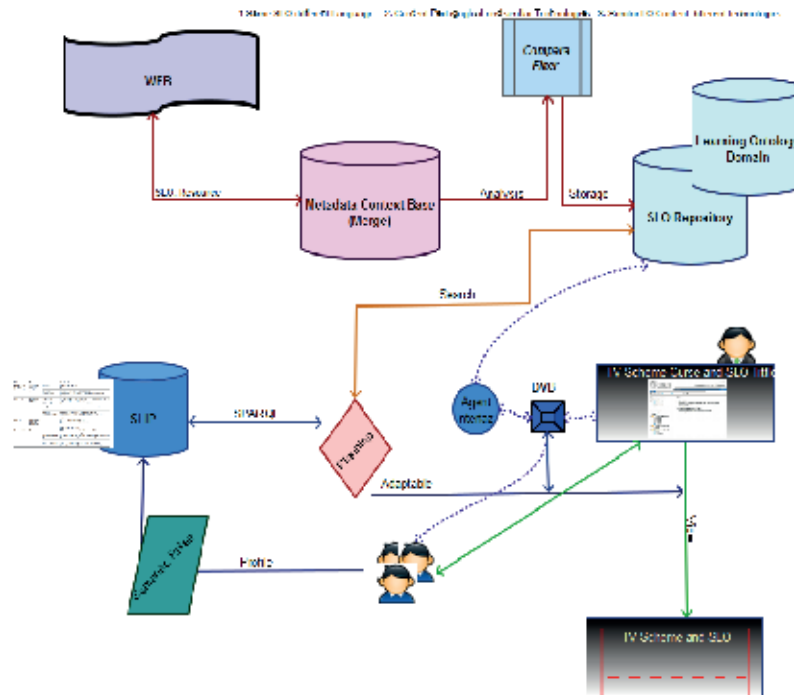


Figure 2. Proposed Architecture

#### 4. THE PROPOSAL

The transformation of an e-learning process into a t-learning environment cannot be performed directly. It requires a method of adaptation and depth study, that depends largely on the interaction of each element in play, as shown in Figure 1 (LO, viewers, interaction

devices and the management of processes). The architecture (see Figure 2) is defined by several ontologies. For example, the Metadata Context Base, is an macro ontology that allows the merging of different ontologies of available domains in the web or by ontologies properly built by us.

**Table 1. Related works with LO and ontologies**

Existing initiatives	Idea	Contribution	Focused on
T-maestro [16]	The content personalization in the field of IDTV	SCOS (Selft-adaptative Sharable Content Object) SCOCreator Templates	Work only about user preferences (with ontologies)
EDiTv: Virtual Education to support television-based distance learning programs [3]	Basic architecture that facilitates the introduction of new services in the IDTV	Inclusion of a pedagogical and technological architecture IDTV	In pedagogical model
Advertesing auction to IDTV [4]	Personalization of advertisements in digital interactive TV environments	Each advertising company enters an auction to buy time transmission of your ads through set-top-box and user preferences.	Work only about user preferences
A Ciencia Cierta [11]	Educational content developed from learning objects for IDTV	The user can expand their searches or they can complete questionnaires to assess their knowledge	On user preferences and knowledge gained by him
UPM [21]	Trends of digital television but projected on the convergence of web technologies	Offers different services: content of demand, personalization and feedback, semantics is used to define services.	Is only a theoretical work not implemented yet
RICAO [19]	Advanced search mechanism which allows the consultation of audiovisual content (non-educational)	A methodology that includes the recovery process and information integration using ontologies (case study portals ONO televisión programming and Digital +, and the film IMDb)	In the recovery process and information integration but non-educational.
NOTUBE [2]	Reuse of flows to determine the activity of interest and generating tele-spectator recommendation	Aggregating user data from different applications web social and line	To present the data and recommendation process
OUR PROPOSAL	Reuse the LO adapting learning content to profile-viewer in real time. Then tries to build an unanticipated creation of a subordinated learning object sequence plan (i.e. learning route), which is attained from other previously existent objects.	Automatic construction of learning routes (in real time) adapted to the user profile. Enriched with semantic representations	To reuse or LO, Semantic an IA Planning to automate processes

The SLO is a Learning Object Repository; it has the resource web, the metadata (defined by SIMS, that is the semantic representing IMS metadata standard) and the formative intentionality, the URL pointing to a concept of an Learning Ontology Domain.

SLIP is other ontology that represents the user preference. These preferences are composed by pedagogical preferences, technological preferences and social level. The comparison filter, check that there isn't redundancy between LO registered in the repository, i.e., check that: i) does not include twice the same LO, ii) that the LO not have different educational content with similar technologies or iii) LO does not have the same content with different pedagogical technologies. Semantic Rules (and SPARQL) are the logical reasoning mechanism, which will work with the adaptability the LO that composed the t-learning applications.

Finally, through the application of an AI planning technique [10], is possible to form a learning route (as plan), which may tend to a user's specific knowledge needs. The purpose of planning is then an unanticipated creation of a subordinated learning object sequence plan (i.e. learning route), which is attained from pre-existing LO registered in a repository.

## 5. FUTURE WORK

Our immediate future work is implementing the architecture proposed and all modules and using the different ontologies available in web (FOAF, GeneOntology, ontolingua, allmusic, etc) [5].



## 6. CONCLUSION

This work describes an approach that modeling various elements of the t-learning environment using AI planning and the ontologies reasoning in order to i) achieve to automate processes such as, the presentation and adaption of the Learning Object or the educational applications (composed of Learning Object), plus ii) address the differences of terms and meanings that can occur between different viewers, and finally, iii) allow a consensus between a group of interests of several viewers, with the objective of adequate the learning object to viewer's interests. The use of an ontology-based indexing scheme is a crucial element in the approach. It provides a unique vocabulary for query retrieval and reasoning on LO. While, IA Planning enables automation of processes such as search, personalization and presentation of learning units associated to the exact user interest.

## ACKNOWLEDGMENT

This work present the preliminary results of the research project "Una Infraestructura para la Generación de Aplicaciones Educativas Basadas en Televisión Digital Usando Objetos de Aprendizaje Semánticos" funded by COLCIENCIAS (Administrative Department of Science, Technology, and Innovation of Colombia) and Universidad Nacional de Colombia under the Project with code 111856933723, and project "Caracterización de los Objetos de Aprendizaje para la Generación de Aplicaciones Educativas usando tecnologías Semánticas" partially supported by the Institución universitaria Salazar y Herrera y la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

## BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

- [1] Aarreniemi-Jokipielto, and P. T-learning, "Model for Learning via Digital TV," in '16th EAEEIE Annual Conference on Innovation in Education for Electrical and Information Engineering (EIE). 2012
- [2] Aart C., Aroyo L., Brickley D., Buser V., Miller L., Minno M., Mostarda M., Palmisano M., Raimond Y., Schreiber G., and Siebes G. (2010). The NoTube BeanCounter: Aggregating User Data for Television Programme Recommendation [Online]. Available: <http://www.notube.tv>
- [3] Arciniegas J. L., Amaya J. P., Urbano F., Campo W. Y., Euscategui R., García X., and García A., "Editv: Educación Virtual Basado En Televisión Interactiva Para Soportar Programas A Distancia," Colombia E-Colabora: Revista de Ciencia, Educación, Innovación y Cultura Apoyadas por Redes de Tecnología Avanzada, vol. 1, Fasc. 1, pp. 42 – 47, 2011.
- [4] Athanasiadis E., Mitropoulos S. A., "Distributed Platform for Personalized Advertising in Digital Interactive TV Environments," Journal of Systems and Software, vol. 83, Ed. 8, pp. 1453-1469, Agosto 2010.
- [5] Berners-Lee J., Hendler T., and Lassila, O., "The Semantic Web." Scientific American, vol. 284 (5), pp. 34-43 [Online]. Available: <http://www.scientificamerican.com/Systems>
- [6] Castillo L., Morales L., González-Ferrer A., Fdez-Olivares J., Borrajo D., and Onaindía E., "Automatic Generation of Temporal Planning Domains for E-learning." Journal of Scheduling, vol. 13(4), pp. 347-362, 2010.
- [7] García F. J., "Web Semantics and Ontology," in Web Application Development Trends, J. J. F. García, M. Moreno (Eds.), Salamanca: Departamento de Informática y Automática, Universidad de Salamanca, 2004, pp. 1-23.
- [8] García-Sánchez F., Valencia-García R., Martínez-Béjar R., and Fernández-Breis J., "An Ontology, Intelligent Agent-based Framework for the Provision of Semantic Web Service." Expert Systems with Applications, vol. 36, Issue 2, Part 2, pp. 3167-3187, March 2009.
- [9] Garrido A., Onaindía E., and Sapena O., Intelligent Planning of Personalized learning Routes. XV JENUI. Barcelona, July 2009. ISBN: 978-84-692-2758-9 [Online]. Available: <http://jenui2009.fib.upc.edu/>
- [10] Garrido A., Onaindía E., Morales LI., Castillo L., Fernández S., and Borrajo D. (2009b). "Modeling E-Learning Activities in Automated Planning", in Proceedings of International Competition on Knowledge Engineering for Planning and Scheduling, ICAPS'09, Thessaloniki (Greece), September 2009.
- [11] Garrido A., Fernández S., Morales L., Onaindia E., Borrajo D., and Castillo L., "On the Automatic Compilation of E-Learning Models to Planning", The Knowledge Engineering Review In press, 2009.
- [12] Gruber T. R., "A Translation Approach to Portable Ontology Specifications," Knowledge Acquisition, vol. 5(2), pp. 199-220, 1993.

- [13] López C. (2007). LO Repositories as a Support for an E-learning Setting. Los Repositorios de O.A como soporte a un entorno e-learning [Online]. Available: [http://www.biblioweb.dgsca.unam.mx/libros/reporeporepo/objetos\\_aprendizaje.htm](http://www.biblioweb.dgsca.unam.mx/libros/reporeporepo/objetos_aprendizaje.htm)
- [14] Martín V., Gil S., Blanco F., Servia R., and Pazos J., Semantics-Driven Recommendation of Coupons Through Digital TV: Exploiting Synergies with Social Networks, En International Conference on Consumer Electronics (ICCE). Las Vegas (USA): IEEE, 2008.
- [15] Pistore M., Marconi A., Bertoli P., and Traverso P., Automated composition of web services by Planning at the Knowledge Level. IJCAI, 2005.
- [16] Rey M., Díaz R., Fernández A., Pazos J., and López M., "Adaptive Learning Objects for T-learning," Latin America Transactions, IEEE, vol. 5, pp. 401–408, Octubre 2007.
- [17] Sánchez R., "La Evaluación de la Formación a través de Dispositivos Móviles (Diseño de software educativo con perspectiva de género)," in Congreso Euro-Iberoamericano ATEI Alfabetización mediática y culturas digitales, Sevilla, p. 16, 2010.
- [18] Sangrá A. (Agosto 2010). La Qualitat en les Experiències Virtual Déducacio superior [Online]. Available: <http://www.uoc.edu/web/cat/art/uoc/0106024/sangsa.html>
- [19] García M., "RICA0 v1.0: Recuperación e integración de contenidos audiovisuales empleando ontologías," Tesis de pregrado, Universidad de Murcia, España, 2008.
- [20] Torres I., Guzmán J., and Jiménez J., "Una propuesta de planificación reactiva para descubrir y componer dinámicamente rutas de aprendizaje," in Colombia. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, vol. 2, Fasc. 18, Editorial: Java Eu, pp. 33-42, 2011.
- [21] Tovar E., and Bonatre O., "El Desarrollo de la Web Semántica y la TV Social en Entornos de Aprendizaje (PLE)," Next Web: web 3.0, web semántica y el futuro de internet, España, 2012.

# INTERFAZ CEREBRO COMPUTADOR BASADO EN SEÑALES EEG PARA EL CONTROL DE MOVIMIENTO DE UNA PRÓTESIS DE MANO USANDO ANFIS

## BRAIN COMPUTER INTERFACE BASED ON EEG SIGNALS FOR MOTION CONTROL OF HAND PROSTHESIS USING ANFIS

**Alexandra Bedoya-Rojas, Est**  
Grupo de Investigación GI2B.  
Instituto Tecnológico  
Metropolitano.  
Medellín, Colombia.  
alex.patricia@hotmail.com

**Jessica Giraldo-Leiva, Est**  
Grupo de Investigación GI2B  
Instituto Tecnológico  
Metropolitano.  
Medellín, Colombia.  
jessicagiraldo@hotmail.com

**Ingrid-Durley Torres-Pardo, MSc**  
Grupo de Investigación GEA.  
Institución Universitaria  
Salazar y Herrera.  
Medellín, Colombia.  
i.torres@iush.edu.co

**Miguel A. Becerra, MSc**  
Grupo de Investigación GEA.  
Institución Universitaria  
Salazar y Herrera.  
Medellín, Colombia.  
m.becerra@iush.edu.co

(Recibido el 10-04-2013. Aprobado el 10-06-2013)

**Resumen.** Existe un gran número de personas en el mundo que presentan amputación de miembros que son reemplazados usualmente por prótesis mecánicas. Por otro lado, las prótesis electromecánicas han venido tomando fuerza y son apoyadas por diferentes tipos de interfaces como las interfaces cerebro computador que permiten mejorar la funcionalidad de estas y, a pesar de mostrar resultados representativos para el control de las prótesis, aún es un campo abierto de investigación que busca mejorar su eficacia y eficiencia. En este artículo se presenta una metodología de clasificación de Señales Electroencefalográficas (EEG) para el control del movimiento de una prótesis de mano, basada en el sistema de inferencia neuro-difuso adaptativo (*Adaptive Neuro Fuzzy Inference System*, ANFIS) aplicado a características obtenidas de la Transformada Wavelet (TW) y los conjuntos difusos rough (FRS) a señales EEG obtenidas en el sistema 10-10. De esta forma el rendimiento del sistema propuesto fue medido utilizando validación cruzada 70-30 con 30 repeticiones, obteniendo un alto desempeño en términos de precisión, lo que significa que este modelo tiene potencial como clasificador en la detección de los cambios EEG para la generación de comandos que permitan el control del movimiento de la mano.

**Palabras clave:** Interfaz Cerebro Computador (BCI), Señales Electroencefalográficas (EEG), Sistema de Inferencia Neuro-difuso Adaptativo (ANFIS), Transformada Wavelet (WT).

**Abstract.** A large number of people in the world who have amputated limbs that are usually replaced by mechanical prostheses. Moreover, electromechanical prostheses have been gaining strength and are supported by different types of interfaces as brain interfaces computer that improve the functionality of these, despite show representative results for the control of prostheses, it is still an open field research that seeks to improve its effectiveness and efficiency. In this paper, we present a methodology for classification of electroencephalographic signals (EEG) to control movement of a prosthetic hand, based on the adaptive neurofuzzy inference system (ANFIS) applied to features derived from the wavelet transform is presented ( TW ) and the rough fuzzy sets (FRS ) to EEG signals obtained in 10-10 system. Thus the performance of the proposed system was measured using cross-validation with 30 repetitions 70-30 obtaining high performance in terms of accuracy, which means that this model has potential as a classifier for the detection of EEG changes for the command generation for the control of hand movement.

**Keywords:** Brain Computer Interface (BCI), Electroencephalogram signals (EEG), Adaptive Neurofuzzy Inference System (ANFIS), Wavelet Transform (WT).

## 1. INTRODUCCIÓN

La Interfaz Cerebro Computador (BCI) es una alternativa eficiente para mejorar la calidad de vida en personas de diversos funcionales [1], que permite traducir pensamientos capturados por medio de ondas cerebrales Electroencefalográficas (EEG), en comandos para el control de dispositivos externos [2]. Aproximadamente el 15% de la población mundial vive con algún tipo de discapacidad [3] —como la carencia de extremidades—, para lo cual se han desarrollado diferentes tipos de prótesis, como las mecánicas y las electromecánicas que si bien han mejorado la precisión por medio de señales mioeléctricas, no parecen mejorar significativamente la facilidad del uso de la extremidad superior artificial o su aceptación por parte de los pacientes [4]. Para desarrollar un mejor sistema de control de prótesis se utiliza la BCI a partir de señales EEG superficiales, la cual presenta ventajas como: no ser invasiva, posibilidad de manejo por diferentes usuarios, mayor número de funciones, uso intuitivo y mayor semejanza con la forma natural de controlar las extremidades.

La literatura reporta una gran cantidad de algoritmos de clasificación que han sido probados para el desarrollo de sistemas BCI, presentando inconvenientes en la toma y la clasificación de las señales [5], por lo que se ha discutido sobre las ventajas de los diferentes clasificadores, presentando a ANFIS con resultados significativos en la modelación de sistemas no lineales, además de ser un sistema que se aproxima a la forma en que los humanos procesan la información [6], demostrando una alta eficiencia [7], [8]. De igual forma se han desarrollado diferentes estudios de ANFIS junto con la Transformada Wavelet, para la clasificación de señales EEG, entre ellas la estimación de niveles de sueño [10] y la detección de alteraciones en la actividad EEG durante los episodios de hipoapnea del sueño [11]. Por lo anterior, ANFIS se puede considerar como una alternativa adecuada para la etapa de clasificación en el desarrollo de sistemas BCI [9], cuya capacidad discriminante puede ser potencializada utilizando la Transformada Wavelet para la representación de la señal.

Así, en este trabajo, se presenta una metodología para la generación de comandos a partir de señales EEG que contienen información del movimiento de la mano. El sistema parte de la obtención de características aplicando la Transformada Wavelet a las señales EEG; luego, con la finalidad de obtener un espacio de representación con alta capacidad dis-

criminante, se realiza la selección de características aplicando conjuntos difusos Rough con entropía y finalmente la etapa de clasificación es realizada mediante un sistema de inferencia difuso, obtenido a partir de ANFIS.

Un enfoque basado en la Transformada Wavelet y ANFIS, junto con un análisis de relevancia para la reducción de características mediante conjuntos difusos Rough, es presentado con el fin de proporcionar un sistema de clasificación de señales EEG de alto desempeño para la generación de comandos de control, aplicado a los movimientos de una prótesis de mano.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se presenta el marco teórico y la metodología del sistema BCI propuesto.

### 2.1 Base de datos

La base de datos utilizada pertenece a PhysioNet y fue construida por los desarrolladores de BCI2000. Consta de 1526 registros de 64 señales EEG (sistema 10-10), cada uno con duración entre uno y dos minutos, obtenidos de 109 voluntarios. Cada individuo cuenta con 14 registros, correspondiente a diferentes tareas motoras e imaginarias así: línea base de ojos abiertos, línea base de ojos cerrados, apertura y cierre del puño izquierdo o derecho, apertura y cierre de ambos puños o pies [12], las cuales fueron adquiridas a una frecuencia de 160Hz, usando el sistema BCI2000. Finalmente, fueron seleccionadas 400 señales libres de artefactos para el desarrollo de este estudio [13].

### 2.2 Transformada Wavelet

La Transformada Wavelet es una transformada tiempo-frecuencia que funciona en una base multi-escala que permite la descomposición de una señal en  $n$  escalas (ver Fig. 1), donde cada una representa un grosor particular de la señal bajo estudio [6] y se obtiene a partir de una wavelet prototipo llamada wavelet madre [14].

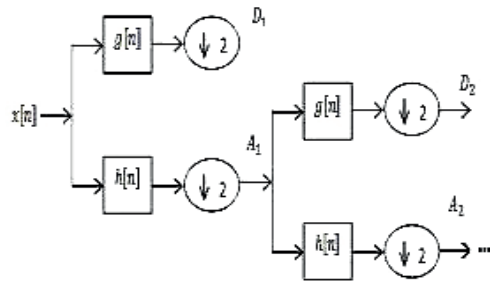


Figura 1 Descomposición transformada wavelet discreta [1]

La TW puede expresarse en términos de un filtro pasa bajas que cumpla la condición (1) y su filtro complementario (2) [14].

$$(z)(z^{-1}) + (-z)(z^{-1}) = 1 \quad (1) \quad G(z) = z H(-z^{-1})$$

$$(2)$$

Una secuencia de filtros con aumento de longitud se puede obtener de:

$$H_{i+1}(z) = (z 2i)(z) \quad (3)$$

$$G_{i+1}(z) = (z2i)(z), i=0,\dots,1 \quad (4)$$

Con la condición inicial  $H_0(z) = 1$  Se expresa como una escala 2 en el dominio del tiempo.

$$h_{i+1}(k) = [h]_{12^i} \times h_i(k) \quad (5)$$

$$g_{i+1}(k) = [g]_{12^i} \times h_i(k) \quad (6)$$

Donde el subíndice  $[ \cdot ]_{12^m}$  indica el muestreo ascendente por un factor de m, y k indica el tiempo discreto. La wavelet normalizada y las funciones de base de escala  $\varphi_{i,l}(k)$ ,  $\psi_{i,l}(k)$ , pueden ser definidas como:

$$\varphi_{i,l}(k) = 2^{-i} h_l(k - 2^i l) \quad (7)$$

$$\psi_{i,l}(k) = 2^{-i} g_l(k - 2^i l) \quad (8)$$

Donde el factor  $2^{i/2}$  es un producto de normalización interna e  $i$  y  $l$  son los parámetros de escala y traducción, respectivamente. La descomposición por medio de la transformada wavelet discreta se describe por medio de:

$$(i)(l) = (k) \times \varphi_{i,l}(k) \quad (9)$$

$$(i)(l) = (k) \times \psi_{i,l}(k) \quad (10)$$

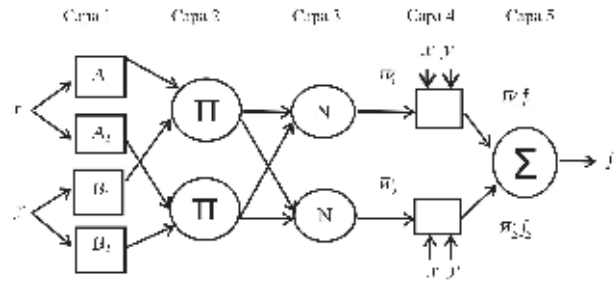


Figura 2 Red ANFIS

Donde  $(i)(l)$  y  $d_{(i)}(l)$  son los coeficientes de aproximación y los coeficientes de detalle de resolución  $i$  respectivamente.

### 2.3 Modelo ANFIS

ANFIS es un modelo difuso tipo sugeno que facilita el aprendizaje y la adaptación de los sistemas. Este modelo combina las capacidades de la red neuronal adaptativa y el enfoque cualitativo de la lógica difusa [8].

Para el desarrollo de la arquitectura de la red ANFIS es necesario tener en cuenta las dos reglas difusas *if-then*, basadas en el modelo de primer orden difuso sugeno así:

Regla 1:  
 if (x is A1) and (y is B1) then (f1=p1x+q1y+r1) (10)

Regla 2:  
 if (x is A2) and (y is B2) then (f2=p2x+q2y+r2) (11)

Donde x y y son las entradas,  $A_i$  y  $B_i$  son los conjuntos difusos,  $f_i$  representa las salidas de la región difusa —especificadas por la regla difusa— y  $p_i$ ,  $q_i$  y  $r_i$  son los parámetros de diseño que se determinan durante el proceso de formación. Para poner en práctica estas dos reglas, en la Fig. 2 se muestra la arquitectura ANFIS, en la que un círculo indica un nodo fijo, mientras que un cuadrado indica un nodo adaptativo [6]. ANFIS está conformada por cinco capas que operan de la misma forma descrita por [15].



Figura 3 procedimiento general propuesto

### 3. PROCEDIMIENTO PROPUESTO

De acuerdo a la Fig. 3, para disminuir las perturbaciones de las señales EEG, se realizó un remuestreo a 150Hz, aplicando un filtro FIR antialiasing y se normalizaron las señales en el rango [-1 1]. Posteriormente, se realizó una caracterización para el reconocimiento de patrones por medio de la Transformada Wavelet Symlet con 6 niveles de descomposición y, con el objetivo de obtener un mínimo conjunto de características, se realizó la selección de estas, aplicando FRS (conjuntos difusos Rough) [17]. Finalmente, un modelo ANFIS con parámetros de entrenamiento, descritos en la Tabla 1, fue implementado para la clasificación de señales EEG en tareas motoras e imaginadas, concernientes a movimientos de la mano y pies, donde el conjunto de características seleccionado fue normalizado y usado como vector de entrada y se determinó el desempeño del modelo aplicando validación cruzada 70-30 con 30 fold, donde se analizó la capacidad de representación del espacio de características.

Tabla 1. Parámetros de entrenamiento - ANFIS

Número de capas	5
Tipo de FIS	Takagi- Sugeno
Número de entradas	30
Tipo de particionamiento	Substractivo
Radio de Influencia subclúster	0.5
Tipo de algoritmo de aprendizaje	Mínimos cuadrados y gradiente descendiente.
Número de reglas difusas	70
Error de entrenamiento	0.01

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 2 presenta medidas estadísticas del rendimiento del modelo desarrollado en este trabajo en términos de exactitud, especificidad y sensibilidad, en la clasificación de las señales EEG para la detección de 2 tareas motoras y dos imaginarias, correspondientes a la apertura/cierre de una mano (T1) y apertura/cierre de ambas manos o pies (T2), las cuales son probadas independientemente del sujeto. Así, el sistema demostró el mejor desempeño con las tareas motoras T1 y T2 con un acierto de 93.1% y 92.4% respectivamente.

La Tabla 3 muestra una comparación del rendimiento del sistema propuesto con otros sistemas BCI. El enfoque BCI propuesto Wavelets/ANFIS, alcanzó una exactitud del 91.55% presentando una diferencia mínima de 0.1% respecto a los resultados obtenidos en [18], donde usaron solo señales imaginarias y obtuvieron una exactitud del 91.65% y respecto al estudio realizado en [19], se presenta una diferencia de 3.45% por debajo, que puede atribuirse a que el estudio fue realizado con señales obtenidas en condiciones controladas y porque en este modelo tomaron 2 parámetros para el clasificador, que fueron:  $\lambda$  (influencia del umbral del parámetro de asignación) y  $Sc$  (zona de influencia de la neurona), los cuales corresponden a parámetros propios de cada individuo, por lo que requiere una fase de configuración que permita inicializar correctamente los parámetros, lo cual proporciona, a su vez, un incremento en el rendimiento del sistema, mientras que en este estudio, para los 109 individuos, no se tuvieron en cuenta parámetros de inicialización.

**Tabla 2. Tasa de clasificación Wavelet - ANFIS**

	Especificidad (%)	Sensibilidad (%)	Acierto (%)
Motora T1	95.1±1.3	91.5±0.7	93.2±1.2
Motora T2	91.5±0.7	91.7±1.1	92.4±0.9
Imag T1	94.0±0.8	87.8±1.0	90.1±0.8
Imag T2	91.4±1.3	89.9±1.1	90.5±1.0

**Tabla 3. Comparación con otros enfoques**

Enfoque	Exactitud (%)
HHT /SVM [18]	91.65
RBF/HMM [19]	95
Wavelets/ANFIS (Este Trabajo)	91.55

## 5. TRABAJOS FUTUROS

Como trabajo futuro se propone un sistema automático que facilite la eliminación de artefactos de las señales y la sintonización de los parámetros ANFIS.

## 6. CONCLUSIONES

En este estudio se desarrolló un sistema BCI basado en un enfoque ANFIS para la generación de comandos, con el que se obtuvo un alto desempeño en promedio, pero alcanzando una mayor exactitud con señales generadas de tareas motoras respecto a las obtenidas a través de tareas imaginarias. Mediante la utilización de coeficientes Wavelet Symlet de 6 niveles de descomposición y la selección de características, basada en conjuntos difusos Rough, se demostró una adecuada representación de las señales EEG. De igual forma, con la aplicación de ANFIS se logró obtener un sistema adecuado, con una alta exactitud, sensibilidad y especificidad, para el control de una prótesis de mano.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al programa de Ingeniería Biomédica del Instituto Tecnológico Metropolitano ITM, como también al centro de investigación de la Institución Universitaria Salazar Herrera de Medellín, Colombia.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Dobkin B. H. "Brain-computer interface technology as a tool to augment plasticity and outcomes for neurological rehabilitation", *The Journal of Physiology*, no. 579, pp. 637-642, 2007.
- [2] Blankertz B., Müller K. R., Krusienski D., Schalk G., Wolpaw J. R., Schlögl A., Pfurtscheller G., Millán J. del R., Schröder M., Birbaumer N., "The BCI Competition III: validating alternative approaches to actual BCI problems, *IEEE Transactions of Neural Systems and Rehabilitation Engineering*", pp. 153-159, June 2006.
- [3] Organización Mundial de la Salud, Resumen Informe sobre la Discapacidad, Organización Mundial de la Salud y Banco Mundial, Resumen Informe Mundial sobre la Discapacidad, 2011, 17 de Agosto de 2013. , [http://www.who.int/disabilities/world\\_report/2011/summary\\_es.pdf](http://www.who.int/disabilities/world_report/2011/summary_es.pdf)
- [4] Jiang N., Dosen S., Müller K. R., Farina D., "Myoelectric Control of Artificial Limbs- ¿Is There a Need to Change Focus?" *IEEE signal processing*, pp. 152-150, September 2012.
- [5] Kousarrizi M. R. N., Ghanbari A. A., Teshnehlab M., Aliyari M., Gharaviri A., "Feature Extraction and Classification of EEG Signals using Wavelet Transform, SVM and Artificial Neural Networks for Brain Computer Interfaces". *IEEE*, pp. 352-355, August 2009.
- [6] Übeyli E. and Güler I. "Adaptative Neuro-Fuzzy Inference System for Classification of EEG Signals Using Wavelet Coefficients", *Journal of Neuroscience Methods*, pp. 113-121, April 2005.

- [7] Hsu W., "Embedded prediction in feature extraction: application to single-trial EEG discrimination." *Clinical EEG Neuroscience Official Journal of EEG and Clinical Neuroscience Society*, vol. 44, no. 1, pp. 31-38, January 2012.
- [8] Übeyli E. D., "Automatic detection of electroencephalographic changes using adaptive neuro-fuzzy inference system employing Lyapunov exponents." *Expert Systems With Applications*, vol.36, Issue 5, pp. 9031-9038, July 2009.
- [9] Odeh S., Hodali J., Sleibi M., and Ilyaa S., "Cursor Movement Control Development by Using ANFIS Algorithm". *The International Arab Journal of Information Technology*, pp. 448-453, June 2009.
- [10] Yidiz A., Poyraz M., Kirbaz G., and Akin M., "Application of adaptative neuro-fuzzy inference system for vigilance level estimation by using wavelet-entropy feature extraction". *Expert systems whit applications*, vol. 36, Issue 4, pp. 7390-7399, May 2009.
- [11] Übeyli E., Cvetkovic D., Holland G., and Cosic I., "Adaptive neuro-fuzzy inference system employing wavelet coefficients for detection of alterations in sleep EEG activity during hypopnoea episodes." *Digital Signal Processing*, vol. 20, Issue 3, pp. 678–691, May 2010.
- [12] Goldberger A., Amaral L., Glass L., Hausdorff J., Ivanov P., Mark R., Mietus J., Moody G., and Peng C.-K., "Components of a New Research Resource for Complex Physiologic Signals". *Circulation Electronic Pages*, pp. 215-220, 2000.
- [13] Schalk G., McFarland D., Hinterberger T., Wolpaw J., and Birbaumer N., "BCI2000: A GeneralPurpose Brain-Computer Interface (BCI) System." *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 51, no. 6, pp. 1034-1043, June 2004.
- [14] Güler I., and Ubeyli E., "Application of adaptive neuro-fuzzy inference system for detection of electrocardiographic changes in patients with partial epilepsy using feature extraction". *Expert Systems with Applications*, pp. 323–330, 2004.
- [15] J.-S. R. Jang, "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.*, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, May 1993.
- [16] M. Becerra, "Metodología dinámica sobre espacios de representación abstracta basada en técnicas estocásticas orientada a la detección de soplos cardiacos a partir de los cuatro focos de auscultación," Tesis de Maestría, Maestría en Automatización y Control Industrial, Institución Universitaria Instituto Tecnológico Metropolitano, 2013.
- [17] Orrego D. A., Becerra M. A., and Delgado Trejos E. "Dimensionality reduction based on fuzzy rough sets oriented to ischemia detection," in *34th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, San Diego, California, USA pp. 2012, pp. 5282 –5285.
- [18] Lu P, Yuan D, Lou Y, Liu C, and Huang S. "SingleTrial Identification of Motor Imagery EEG based on HHT and SVM." *Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 256, pp. 681-689, 2013.
- [19] Pérez J. L. M., and Cruz A. B., "Adaptive RBF-HMM BiStage Classifier Applied to Brain Computer Interface." *Communications in Computer and Information Science*, vol. 127, pp. 152–65, 2011.



## CONSTRUCCIÓN DE UN APLICATIVO PARA EL CONTROL DE ACTIVOS TECNOLÓGICOS AL INTERIOR DE UNA ORGANIZACIÓN: BENEFICIOS Y EXPERIENCIAS

### CONSTRUCTION OF A SOFTWARE APPLICATION FOR MANAGEMENT AND CONTROL OF TECHNOLOGY ASSETS WITHIN A FIRM ORGANIZATION: BENEFITS AND EXPERIENCES

**Adrián Alberto Jaramillo-Arango, Ing.**

*Facultad de Ingenierías  
Fundación Universitaria Luis Amigó  
Medellín, Colombia  
oviedojara@hotmail.com*

**Gabriel Jaime Correa-Henao, Ph.D.**

*Facultad de Ingenierías  
Fundación Universitaria Luis Amigó  
Medellín Colombia  
gabriel.correahe@amigo.edu.co*

(Recibido el 19-03-2013. Aprobado el 10-06-2013)

**Resumen.** Este artículo presenta la realización de un caso de estudio que incluye el desarrollo e implementación de una herramienta de gestión de recursos tecnológicos, con aplicaciones en la mejora de los procesos de organizaciones con certificaciones en gestión de calidad. El desarrollo de la metodología y su respectiva aplicación se ha implementado en la “Fundación Universitaria Luis Amigó”, en línea con su modelo administrativo de gestión por procesos, lo cual contribuye a su reconocimiento como institución educativa de alta calidad. Los resultados de este caso de estudio han demostrado las ventajas de automatizar los diferentes procedimientos a través de herramientas de software, los cuales contribuyen a consolidar el sistema de gestión de calidad. En el artículo también se presenta una reflexión sobre la estrategia metodológica que soporta la construcción de una herramienta de software, la cual tiene en cuenta la combinación de los paradigmas: ingeniería de requerimientos y los enfoques administrativos propios de la organización, para facilitar la gestión del conocimiento y la administración de activos tecnológicos.

**Palabras clave:** Gestión del Conocimiento, Ingeniería de Requerimientos, Programación de Objetos, PHP.

**Abstract.** This paper shows the results of a case-study which has been applied to both development and implementation of a software tool for management of technologic assets. The development of the methodology and its respective application has been implemented in “Fundación Universitaria Luis Amigó”, according to its administrative structure model that aims to its recognition as high quality educational institution. The results of this study have demonstrated the advantages of automating various processes by means of software tools, which help to strengthen the quality management system. The article also shows a discussion on the strategy that supports the construction each organization, in order to facilitate knowledge management and asset management technology.

**Keywords:** Knowledge Management, Software Engineering, Oriented Objects Programming, PHP.

## 1. INTRODUCCIÓN

Desde los primeros años del siglo XXI se hace evidente, para las organizaciones o entidades con cualquier tipo de razón social, la necesidad de manejar su información mediante la gestión de procesos que faciliten su competitividad. Dicha necesidad exige el uso de herramientas tecnológicas que le permita a tales entidades estar a la vanguardia de la gestión de sus procesos. Esta continua evolución tecnológica exige a las organizaciones, alinear sus procesos administrativos con la gestión tecnológica, facilitando muchas de las tareas inherentes a los diferentes procesos y funciones, lo cual representará optimizaciones en costos y en tiempos [1], [2], [3].

El modelo empresarial surgido desde principios del siglo XX, y que está plasmado en la teoría de la administración, plantea la necesidad de implementar sistemas de gestión que permitan controlar, de forma sistemática, las actividades y procesos de la empresa, con la participación e implicación de todos sus trabajadores, para lograr los resultados previstos [4], [5]. En estos modelos de gestión no basta con tener en cuenta solamente los parámetros económicos y de productividad, puesto que la satisfacción de los trabajadores, de los clientes y del entorno social en el que desarrolla su actividad, las actuales exigencias en materia de seguridad y salud en el trabajo, de la calidad y medioambientales, deben ocupar posiciones preponderantes y de mejora continua.

Los directivos que pretendan mantener sus organizaciones en el mercado, tendrán que adaptarse a las anteriores exigencias e implantar sistemas de gestión informatizados y autogestionados que permitan que sus productos, procesos o servicios tengan elementos cualitativos que sean de peso, den confianza y favorezcan la decisión de compra por los clientes [6], [7].

En este artículo se pretende mostrar cómo el capital humano de las organizaciones es el principal gestor de evolución en las mismas; dicho capital es el principal generador de conocimiento que, a través de aportes significativos, puede contribuir al éxito de las empresas.

Se realiza un caso de estudio que pretende presentar un proceso de mejora al interior de la Fundación Universitaria Luis Amigó, específicamente un procedimiento del departamento de infraestructura tecnológica donde, a la fecha (año 2014), existen

procedimientos muy básicos para el control de los elementos de cómputo [7]. Dichos procedimientos se fundamentan en la escritura de documentos, lo cual es poco productivo e ineficaz. La FUNLAM desea mejorar sus procesos en virtud de las políticas de calidad.

Por tal razón se describirán métodos enfocados desde el punto de vista administrativo y de ingeniería de software, con el fin de desarrollar una herramienta informática que automatice el proceso de inventario de activos, y el control y parametrización de funcionalidades inherentes al proceso.

El presente trabajo dará cuenta del desarrollo de esta herramienta de gestión, la cual se ha denominado SPARTEC (Sistema Para la Administración de Recursos Tecnológicos). La primera parte del artículo presenta aspectos relevantes, desde el enfoque administrativo, incluyendo algunas definiciones en torno al paradigma de gestión por procesos, así como las estrategias de mejoramiento continuo en una organización. La segunda parte de este artículo presenta aspectos relacionados con el desarrollo técnico y la ingeniería de software. Lo anterior incluye la descripción de los pasos necesarios en el desarrollo de una herramienta informática, desde el levantamiento de requisitos, análisis y modelos de datos. La última parte presenta los beneficios en la aplicación y uso de la herramienta, en un marco de gestión de un sistema de calidad a nivel institucional.

## 2. METODOLOGÍA DE DESARROLLO PARA UN CASO DE ESTUDIO

El término “sociedad del conocimiento” hace referencia a todo aquello que permite, al ser humano, realizarse y contribuir al desarrollo de su sociedad [8]. Por este motivo, y gracias al aporte de personas idóneas en el ámbito tecnológico, ha sido posible encontrar mecanismos que impulsen a la humanidad a desarrollar estrategias y métodos que ayudan a resolver los grandes problemas y enigmas que propone la realidad actual [1]. En este contexto surge la necesidad de implementar una herramienta informática que permita contribuir al mejoramiento de procesos a nivel organizacional en la Funlam. Lo anterior requiere la formación de sinergias entre los componentes de software, desde el punto de vista lógico (Ingeniería de sistemas de información), y las diferentes modalidades de alcanzar la calidad institucional [8].

En un marco de ingeniería informática existen metodologías y herramientas que facilitan el desarrollo tecnológico de la sociedad [6], los cuales se describen en esta sección. Especial énfasis tiene el desarrollo de sistemas bajo el paradigma de programación orientada a objetos, la cual se populariza cada vez más, dado que los lenguajes fundamentados en dicho paradigma permiten desarrollar software a partir del análisis y diseño de soluciones, con criterios de adaptabilidad, robustez, fiabilidad y calidad [10], [11], [12].

De esta manera, estas herramientas de software contribuyen a la mejora de procesos y no se convierten en una carga para los procesos donde se pretende brindar soluciones [1], [5]. La Ingeniería de Software reconoce que una buena estrategia para aumentar la calidad de sus productos requiere de una mejora de procesos en las organizaciones [13]; por ejemplo, a través del soporte tecnológico por medio de herramientas groupware [5], [14], [15], [16], las cuales ayudan a gestionar los proyectos de mejora de procesos.

En esta sección se presenta la aplicación de una metodología de desarrollo para crear una herramienta de software que pretende dar solución a la problemática que enfrenta el área de tecnologías de la Fundación Universitaria Luis Amigó. Dicha herramienta se desarrolló bajo estándares y normas de la Ingeniería de Sistemas, con aplicaciones a la ingeniería de procesos; estos procesos serán abordados desde conceptos globales que se expondrán en los apartados siguientes.

## 2.1 Antecedentes administrativos

El diseño e implementación del Sistema de Gestión Institucional –SIGI– para la Fundación Universitaria Luis Amigó –Funlam–, basado en la Norma NTC ISO 9001 [19], [20], tiene como propósito proveer a la institución de una herramienta de gestión establecida en procesos que le permita tener un mejor control de sus actividades, el logro de sus objetivos –de una manera eficaz y eficiente–, y adoptar la cultura del mejoramiento continuo para el alcance de altos niveles de competitividad [16].

El SIGI proporciona una descripción detallada de los procesos y procedimientos, lo cual se constituye en el marco de referencia de las actividades, de los responsables, de los insumos y productos relaciona-

dos a cada uno de los procesos, suministrando un conocimiento claro de cómo se están desarrollando las diferentes labores a su interior [7]. La herramienta proporciona información a la alta dirección, a los clientes, a proveedores, al personal administrativo y demás interesados, lo que demuestra el compromiso de la Funlam con el mejoramiento de la calidad de todos sus servicios.

De igual manera, el SIGI constituye la plataforma para soportar la generación de indicadores de medición en el cumplimiento de metas de la organización. También permite definir los mecanismos e instrumentos necesarios para recopilar la información hacia la toma de decisiones operativas, tácticas y estratégicas de la Funlam, de acuerdo a los sistemas de gestión con indicadores clave [10].

En coherencia con lo anterior, el Sistema de Gestión Institucional de la Funlam se propone armonizar los requisitos de la Norma ISO 9001, que son genéricos, con los requisitos específicos del sector de la educación superior, en lo concerniente a los procesos de autoevaluación y acreditación institucionales y de programas [20]. Los procesos de certificación y acreditación de la educación superior, como acciones permanentes de mejora continua y aseguramiento de la calidad, determinan una dinámica que moviliza la estructura organizacional de las instituciones de educación superior hacia la consecución de los objetivos, plasmados en sus postulados estratégicos. Se hace evidente que todo desarrollo de proyectos debe tener claros los requerimientos en cuanto a cuál va a ser su forma de trabajar, es por esto que para el presente trabajo se tienen en cuenta diferentes elementos que, directa o indirectamente, se involucran y participan activamente del éxito del proyecto [3], [21].

En 2013, el proceso de administración de los recursos tecnológicos de la Fundación Universitaria Luis Amigó se enmarcó dentro del proceso de activos fijos de la institución; es decir, el inventario de activos lo controla el departamento de contabilidad de la institución, pero lo hace únicamente en modo de valor económico, es por esta razón que el departamento de infraestructura ingresa en esta problemática, ya que a parte de la necesidad de controlar los bienes institucionales, también es necesario controlar todo lo que tiene que ver con gestión de requerimientos, control de asignaciones, control de reparaciones, control de equipos obsoletos, control de ubicaciones, generación de órdenes de salida a reparación, rea-

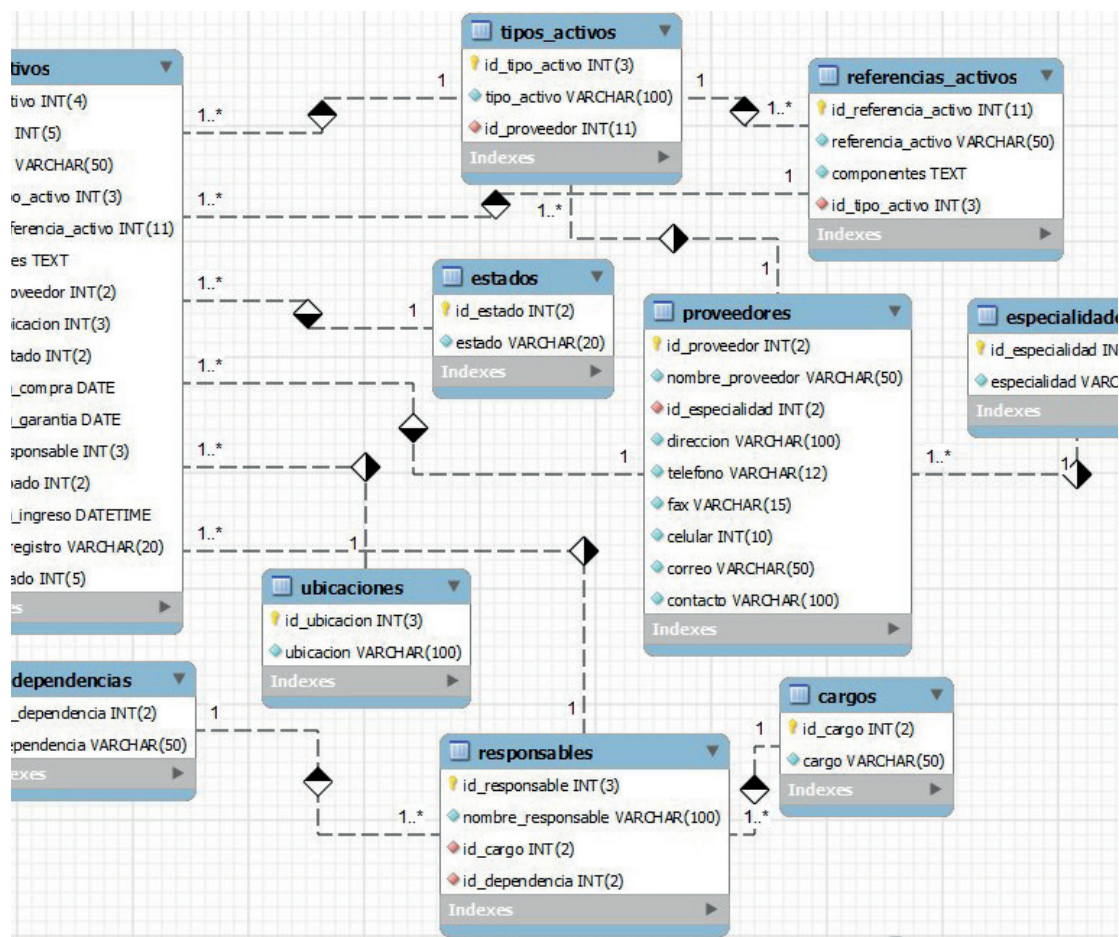


Fig. 1. Modelo de base de datos entidad-relación para administración de recursos tecnológicos en la Funlam.

lización automática de las respectivas actas de dar de baja, gestión de elementos disponibles, gestión histórica de movimientos; es decir, una tarea un poco más allá de un simple control económico que permite reforzar la idea de mejoramiento continuo, al que la universidad apunta [22].

## 2.2 Definición del modelo de datos

El desarrollo de la herramienta informática requiere la configuración de una base de datos correspondiente a una agrupación de datos que, interrelacionados, conforman una ideología única que, posteriormente, se transformarán en información valiosa para la organización, permitiendo así la correcta toma de decisiones con respecto a una situación específica [23].

Para el caso de estudio que se presenta en esta sección, se propone utilizar el modelo de la base de datos entidad-relación, el cual se obtiene en la fase de

diseño de la herramienta de software, originalmente propuesto por Chen [23] y que data de la década de 1970. Dicho modelo se caracteriza por utilizar una serie de símbolos y reglas para representar los datos y sus relaciones [30]. El modelo de base de datos entidad-relación permite representar, de manera gráfica, la estructura lógica de un software [24]. La Figura 1 presenta la concepción de dicho modelo para el caso de estudio, objeto de este artículo en la Funlam, la cual constituye el pilar fundamental de la aplicación.

El modelo de base de datos se compone de diferentes elementos que permiten determinar el rumbo, la factibilidad y la calidad con la que contará la herramienta a construirse [16]. Para el estudio del caso que se presenta en este artículo, el modelo entidad-relación se aplica en los procesos de administración de recursos tecnológicos, dentro de un marco de cumplimiento de la política de calidad institucional.

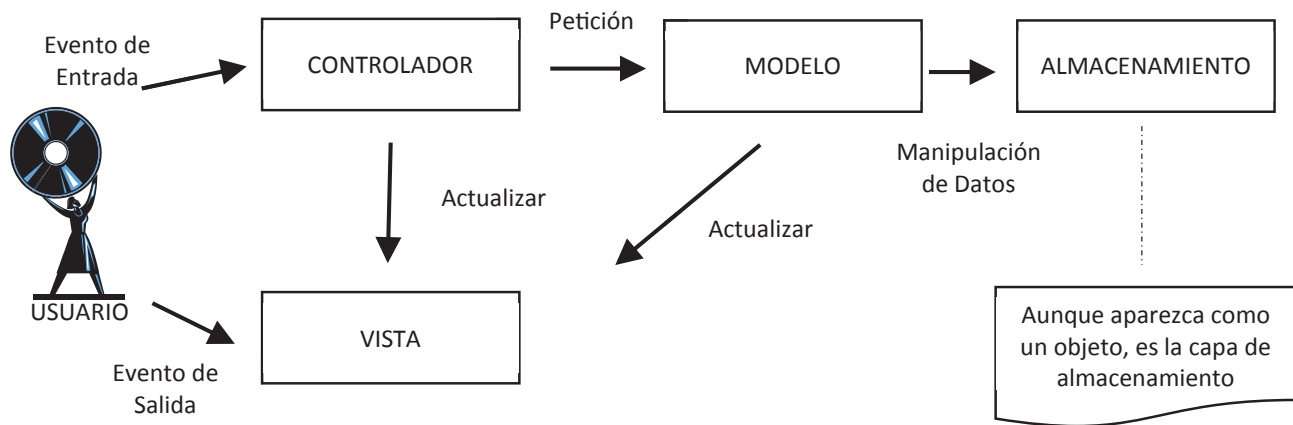


Fig. 2. Concepción de la Arquitectura Informática bajo el modelo Smalltalk [26].

### 2.3 Desarrollo de la Arquitectura Informática

Para el desarrollo de la herramienta informática se utilizan patrones establecidos en los procesos del modelo de datos, presentados previamente en la Fig. 1. Consecuentemente, la herramienta a implementar se despliega bajo una metodología de desarrollo ágil, la cual permite ejecutar modificaciones rápidas sin afectar otras componentes del sistema. Esto garantiza un nivel de robustez para afianzarse como aplicativo que proporciona confiabilidad en la toma de decisiones a nivel organizacional.

Para el caso de estudio se propone trabajar con el patrón MVC (Patrón Modelo Vista Controlador), correspondiente a una arquitectura de diseño propuesta por Trygve Reenskaug [28], cuyos principios se tienen en cuenta en la concepción de la arquitectura bajo el modelo Smalltalk [26], consistente en subdividir la aplicación en tres módulos, según se aprecia en la Fig. 2.

De la Fig. 2 se pueden apreciar las siguientes subdivisiones, en la concepción de la arquitectura informática para la construcción de la herramienta [28], [26]:

1. La vista del usuario (la interfaz a la que accede el usuario).
2. La lógica de control para captar los eventos que el usuario ha generado a través de la interfaz.
3. El modelo que gestiona los datos según le indique la lógica de control.

El flujo que sigue el patrón de la arquitectura informática generalmente es el siguiente [25]:

1. El usuario interactúa con la interfaz de usuario, por ejemplo al pulsa un enlace. Este punto corresponde, en el patrón, a la vista.
2. El controlador recibe (a través de la interfaz) la notificación de la acción solicitada por el usuario; es decir, el controlador gestiona el evento que llega desde la vista, producido por un usuario.
3. El controlador accede al modelo, ya sea con el fin de consultar datos o actualizarlos, posiblemente modificándolo de forma adecuada a la acción solicitada por el usuario.
4. El controlador delega, a los objetos de la vista, la tarea de desplegar la interfaz de usuario. La vista obtiene sus datos del modelo para generar la interfaz apropiada para el usuario, donde se refleja los cambios en el modelo (por ejemplo, produce un listado de las películas que tal usuario tiene). El modelo no debe poseer conocimiento directo sobre la vista. Por lo general, el controlador no pasa objetos de dominio (el modelo) a la vista, aunque puede dar la orden a la vista para que se actualice; sin embargo, en algunas implementaciones, la vista no tiene acceso directo al modelo, dejando que el controlador envíe los datos del modelo a la vista.
5. La interfaz de usuario espera nuevas interacciones del usuario, comenzando el ciclo nuevamente.

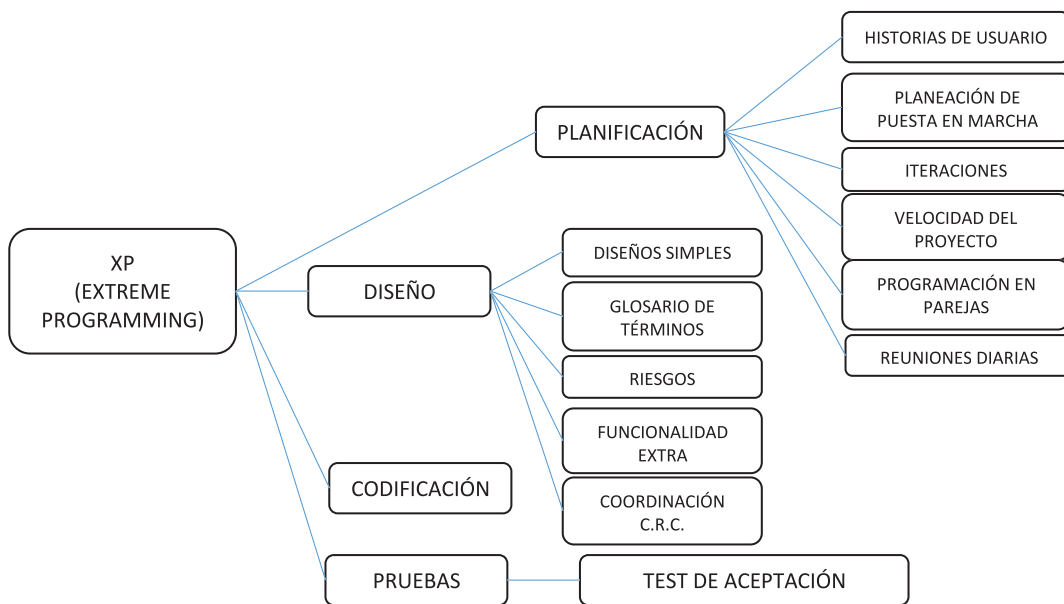


Fig. 3. Estructura de la metodología rápida XP (Extreme Programming) [27] [34].

### 2.4 Metodología de desarrollo rápido

Existen numerosas propuestas metodológicas que inciden en distintas dimensiones del proceso de desarrollo. Por una parte se da crédito a aquellas propuestas más tradicionales que se centran especialmente en el control del proceso, estableciendo rigurosamente las actividades involucradas, los artefactos que se deben producir y las herramientas y notaciones que se usarán [27].

Estas propuestas han demostrado ser efectivas y necesarias en un gran número de proyectos, pero también han presentado problemas en otros. Una posible mejora consiste en incluir el desarrollo de actividades, artefactos y restricciones, de un modo más amplio, basándose en los puntos débiles detectados, comparado con aquellas situaciones en las que no se utilizan metodologías formales [31].

Teniendo en cuenta lo anterior se opta por trabajar con la metodología ágil XP (Extreme Programming) [25], [27]. Dicha metodología XP se caracteriza porque da mayor valor al cliente, a la colaboración con el cliente y al desarrollo incremental del software con iteraciones muy cortas. Este enfoque está mostrando su efectividad en proyectos con requisitos muy cambiantes y cuando se exige reducir drásticamente los tiempos de desarrollo, al tiempo que garantiza alta calidad en la concepción de la arquitectura de

software [34], [25]. La Fig. 3 presenta la estructura general que conforma la metodología de desarrollo rápido. También especifica los elementos que componen el orden a manejar en cada una de las fases de la metodología.

#### 2.4.1 Recolección de información

La trazabilidad de requisitos consiste en la especificación y validación de los servicios que debe proporcionar el sistema, así como las restricciones sobre las que se deberá operar. Es un proceso iterativo y cooperativo de análisis del problema, documentando los resultados en una variedad de formatos y probando la exactitud del conocimiento adquirido, de tal forma que el aplicativo construido cumpla con los niveles de calidad exigidos por el cliente [17], [29].

Para el estudio del caso documentado en este artículo, se tomaron diferentes mecanismos de recolección de información entre los clientes del proceso, incluyendo a funcionarios de la Funlam, como son los cargos de jefe del departamento de sistemas y profesionales y asistentes del área funcional de infraestructuras informáticas. La técnica de recolección de información se fundamentó en entrevistas que permitieran conocer las necesidades y expectativas de los usuarios en la herramienta informática.

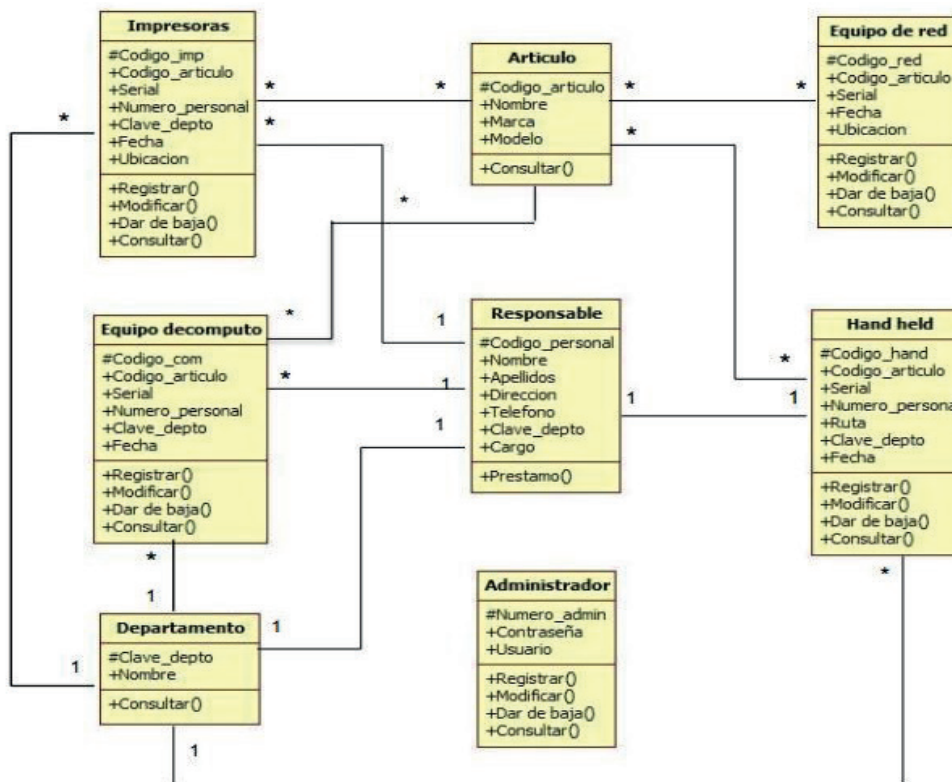


Fig. 4. Aparte del diagrama de clases para la herramienta de administración de recursos tecnológicos en la Funlam.

En el proceso de recolección de información se identificó la necesidad de cumplir con el Plan Informático Institucional [7], el cual exige que las herramientas informáticas cumplan con parámetros de arquitectura monolítica, en configuración cliente-servidor o en configuración por capas; esta última corresponde a la arquitectura elegida para el caso de estudio.

Dichos parámetros se formalizan con un lenguaje estándar y unificado, es decir, todo el software desde su concepción, análisis, desarrollo y pruebas está documentado de la mejor forma, siguiendo estándares y procedimientos según normas internacionales o las propias de cada organización [30]. En el caso de estudio se eligió un lenguaje gráfico, que permite especificar y documentar un sistema de software de modo estándar (incluyendo aspectos conceptuales tales como procesos de negocios y funciones del sistema).

En consecuencia, se ha verificado la posibilidad de utilizar el lenguaje UML 2.0 que incorpora el manejo de elementos netamente estructurales e igualmente cuenta con una notación estándar y semánticas

esenciales (aunque abstractas) para el modelado de un sistema orientado a objetos [25], [32], [33].

#### 2.4.2 Diagrama de clases

Un diagrama de clases se refiere a la representación estática que describe la estructura de un sistema en cuanto a la relación de sus componentes internos [32]. La Fig. 4 representa un aparte del diseño del diagrama de clases, aplicado al caso de estudio, de un sistema informático para administración de activos.

#### 2.4.3 Elección del lenguaje de programación orientado a objetos

El desarrollo de aplicaciones de software incluye la elección del lenguaje de programación [30], el cual se refiere al conjunto de códigos para que la máquina pueda interpretar las acciones y solicitudes de las personas u otros elementos que interactúan con la herramienta informática.

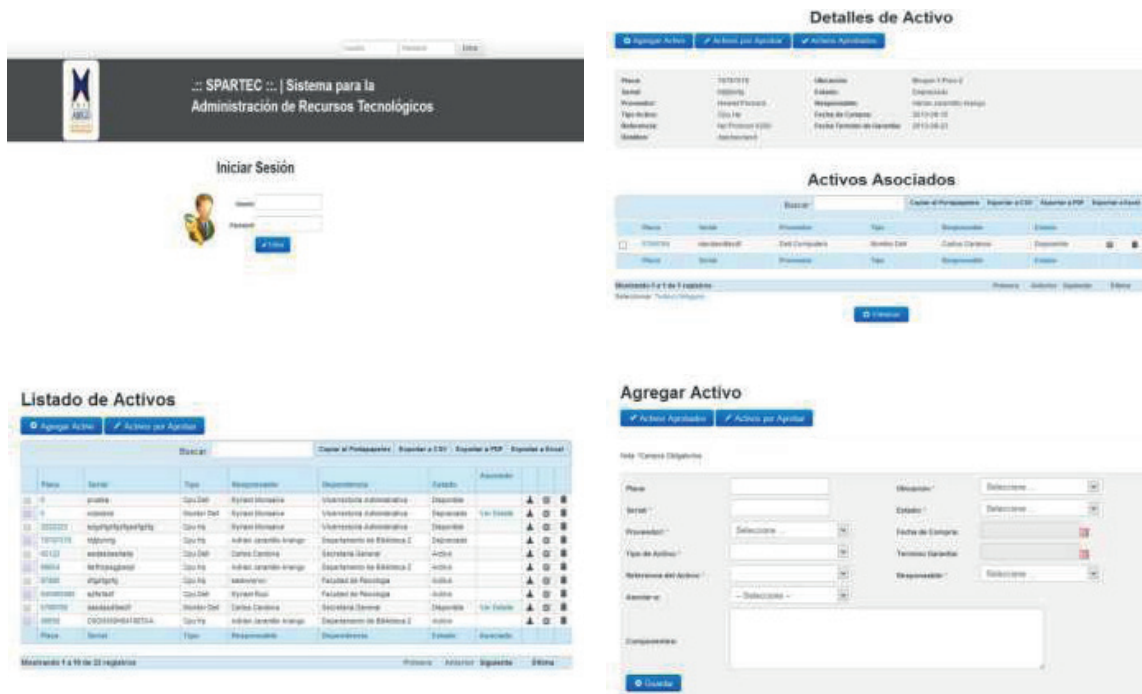


Fig. 5. Presentación de la funcionalidad del sistema implementado en la Funlam.

Teniendo en cuenta la amplia difusión del paradigma de programación orientado a objetos [32], para este caso de estudio se prefiere utilizar un lenguaje fundamentado en dicho paradigma, que sea de libre acceso. La construcción de la herramienta informática documentada, en este caso, se fundamentó en el uso de la plataforma PHP [18], [34], que es un lenguaje de programación que permite técnicas de orientación a objetos y está enfocado a la plataforma web.

### 3. PROTOTIPO Y RESULTADOS

El caso de estudio presentado en este artículo ha derivado en la realización de la herramienta SPARTEC (Sistema Para la Administración de Recursos Tecnológicos de la Funlam). Esta sección proporciona algunos resultados y beneficios que derivan de aplicar la herramienta de software, que responde a las necesidades del departamento de infraestructura tecnológica de la Funlam, al tiempo que contribuye al cumplimiento de objetivos de calidad a nivel institucional [7].

### 3.1 Desarrollo de la herramienta de software

El sistema SPARTEC se fundamenta en un patrón MVC que facilita, en gran medida, el control de la aplicación en lo que se refiere al desarrollo [28].

Dicha aplicación informática demanda el establecimiento de sesiones para sus usuarios, requiriendo una identificación mediante contraseña, para dar acceso a los diferentes módulos que componen el sistema. La herramienta SPARTEC administra el control de acceso, mediante el algoritmo de encriptamiento en la contraseña con *Hash Message-Digest Algorithm (MD5)* [32], [34].

Una vez los usuarios ingresen correctamente al sistema, se encontrarán con una serie de módulos que, en conjunto, conforman la base funcional del mismo. En el menú de la parte superior se encuentran los módulos más importantes, y en el menú lateral se encuentran las opciones de apoyo a los módulos globales.

La Fig. 5 presenta algunas funcionalidades específicas del sistema, incluyendo algunos de los principales módulos de la herramienta SPARTEC, correspondientes al módulo de control y gestión de activos tecnológicos, el de control y gestión de software y el módulo de telefonía.



## Listado de Ordenes de Salida

Buscar <input type="text"/> <span style="float: right;"> <a href="#">Copiar al Portapapeles</a> <a href="#">Exportar a CSV</a> <a href="#">Exportar a PDF</a> <a href="#">Exportar a Excel</a> </span>								
	ID	Placa	Serial	Tipo Activo	Motivo Salida	Fecha		
<input type="checkbox"/>	10	0	prueba	Com Dell	Mantenimiento Preventivo	2010-10-20	Ver	
<input type="checkbox"/>	17	0	prueba	Com Dell	Mantenimiento Preventivo	2010-10-09	Ver	
<input type="checkbox"/>	16	0	prueba	Com Dell	Mantenimiento Preventivo	2010-09-06	Ver	
<input type="checkbox"/>	15	0	prueba	Com Dell	Mantenimiento Preventivo	2010-08-18	Ver	
<input type="checkbox"/>	14	88000	asfasfasf	Com Dell	Mantenimiento Preventivo	2010-08-21	Ver	
<input type="checkbox"/>	13	80565	asfasfasf	Com Dell	Mantenimiento Correctivo	2010-07-11	Ver	
<input type="checkbox"/>	12	88565	asfasfasf	Com Dell	Mantenimiento Correctivo	2010-07-18	Ver	
<input type="checkbox"/>	11	80565	asfasfasf	Com Dell	Mantenimiento Preventivo	2010-07-20	Ver	
<input type="checkbox"/>	10	88565	asfasfasf	Com Dell	Mantenimiento Correctivo	2010-07-08	Ver	
<input type="checkbox"/>	9	8000	pruebatata	Com Ho	Préstamo fuera de las instalaciones	2010-07-10	Ver	
	ID	Placa	Serial	Tipo Activo	Motivo Salida	Fecha		

Mostrando 1 a 10 de 13 registros

[Primera](#)
[Anterior](#)
[Siguiente](#)
[Última](#)

Para el apartado de activos se han tomado conceptos sencillos relacionados con el modelo CRUD (*Create, Read, Update y Delete*) [35], que permite hacer de forma eficiente el trabajo del administrador; por consiguiente, se cuentan con métodos para listar la información contenida en la base de datos.

La herramienta SPARTEC también cuenta con formularios que permiten ingresar información nueva, actualizar la información existente, así como integrar un algoritmo de aprobación automática y de envío de correos, cada vez que sucede una novedad dentro del sistema.

Cabe mencionar que el software trabaja con la implementación de diferentes *plugins* que permiten ejecutar los procesos de desarrollo de una manera sencilla para el usuario. Las vistas para la aplicación se trabajan con el gestor de plantillas *Smarty* [5], [32] y la interacción entre los diferentes elementos (como los de búsquedas y validaciones) se trabaja con el plugin *jqueryUI* [12], [32].

### 3.2 Apoyo a la toma de decisiones

El sistema que se desarrolló fue pensado para proporcionar apoyo a la toma de decisiones en el departamento de infraestructura tecnológica; por esta razón se hizo necesario desarrollar una serie de procedimientos que se encargaran de la generación de

algunos reportes. La Fig. 6 presenta un prototipo de informe que realiza el sistema después de ejecutar sus módulos internos.

Este tipo de informes permiten apoyar la toma de decisiones, dado que proporcionan listados sobre el historial de órdenes de salida para los elementos informáticos que entran y salen de la institución. También presentan estadísticas detalladas de las razones.

El hecho de incluir un sistema que permita exportar en cualquier momento los posibles listados de cualquier módulo, facilita en gran manera la gestión de los procesos a nivel del departamento, ya que agiliza y facilita muchos de los procesos que anteriormente se hacían de forma manual.

## 4. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado los pasos para realizar un aplicativo que puede ser usado para el control y administración de recursos a través de una herramienta de software. Este caso de estudio ha tenido en cuenta la revisión e implementación de modelos y buenas prácticas, la identificación de las tendencias de gestión de activos en la industria y el estudio de herramientas de desarrollo disponibles. Lo anterior ha permitido caracterizar los requisitos de

una herramienta de software para apoyar la gestión de administración de recursos tecnológicos.

Ha sido posible identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejoramiento con el ánimo de participar activamente del progreso continuo requerido en el sistema de calidad de la Funlam. Un diagnóstico inicial presentaba dificultades en los mecanismos de control institucionales, debido a la carencia de métodos cualitativos y cuantitativos, pues se confiaba sólo en el uso de herramientas poco automatizadas (como el paquete de ofimática de Microsoft) para llevar el control del inventario y el control de elementos específicos que se manejan al interior del área.

Este caso de estudio demostró la conveniencia de poner en funcionamiento los proyectos de ingeniería de software que contribuyan al mejoramiento de los procesos. Un trabajo futuro permitirá impulsar el uso de esta aplicación en otras áreas institucionales, teniendo en cuenta el impacto positivo dentro del sistema de gestión de calidad en la organización.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. A. Fraguera Formoso, et al., "La integración de los sistemas de gestión: necesidad de una nueva cultura empresarial". *Revista Dyna – Facultad de Minas, Medellín, Colombia*, vol. 78, no. 167, pp. 44-49, Abril 2011. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532011000300005&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532011000300005&lng=en&nrm=iso)
- [2] L. Pedraja-Rejas, E. Rodríguez-Ponce, J. Rodríguez-Ponce., "Sociedad del conocimiento y dirección estratégica: Una propuesta integradora". *Revista Asociación Interciencia*, vol. 31, no. 8, pp. 570-576, 2006. ISSN 0378-1844. Disponible en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442006000800006&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442006000800006&lng=es&nrm=iso)
- [3] Project Management Institute., "A guide to the project management body of knowledge (PMBOK Guide)", 2008. PMI. Disponible en: <http://www.worldcat.org/isbn/9781933890517>
- [4] L. Rodríguez-Martínez, M. Mora, F. Álvarez, L. Garza, H. Durán, and J. Muñoz. "Review of Relevant System Development Life Cycles (SDLCs) in Service-Oriented Software Engineering (SoSE)," *Journal of applied research and technology*, vol. 10, no. 2, pp. 94-113, 2012. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1665-64232012000200003&lng=es&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-64232012000200003&lng=es&tlng=en)
- [5] A. Bedate, , L. C. Herrero, J. A. Sanz, "Economic valuation of the cultural heritage: application to four case studies in Spain", *Journal of Cultural Heritage*, vol. 5, no 1, pp. 101-111, 2004. ISSN 1296-2074. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.culher.2003.04.002> .
- [6] R. M. Stair, G. W. Reynolds, *Principios de sistemas de información: enfoque administrativo*, 4th ed., 2000, Ed. Thomson.
- [7] A. Mendes da Silva, "Capítulo 1 - Panorâmica da Programação Orientada a Objetos, In *Introdução À Programação orientada a objetos Com C++*", Edited by Antonio Mendes da Silva Filho, Elsevier Editora, 2010, pp. 1-13, ISBN 9788535237023. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9788535237023500017>
- [8] Carballo R., "Innovación y gestión del conocimiento: modelo, metodología, sistemas y herramientas de innovación", 2006. Ed. Díaz de Santos.
- [9] Nuo Li, Tao Xie, Maozhong Jin, Chao Liu, "Perturbation-based user-input-validation testing of web applications", *Journal of Systems and Software*, vol. 83, no. 11, pp. 2263-2274, 2010. ISSN 0164-1212. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jss.2010.07.007>
- [10] Fundación Universitaria Luis Amigó. *Manual de Calidad*, Fondo Editorial Funlam, 2013. Disponible en: [http://www.funlam.edu.co/uploads/gestioncalidad/447\\_OD-001\\_-\\_Manual\\_de\\_Calidad\\_\(V4\).pdf](http://www.funlam.edu.co/uploads/gestioncalidad/447_OD-001_-_Manual_de_Calidad_(V4).pdf)
- [11] C. Macías-Gelabert, A. Aguilera-Martínez., "Contribución de la gestión de recursos humanos a la gestión del conocimiento". *Revista de Estudios Gerenciales*, vol. 28, no. 123, pp. 133-148, 2012. ISSN 0123-5923. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-59232012000200009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-59232012000200009&lng=en&nrm=iso)
- [12] Y. Gorbaneff, S. Torres, J. F. Cardona, "El concepto de incentivo en administración. Una revisión de la literatura". *Revista Economía Institucional*, vol. 11, no. 21, pp. 73-91, 2009. ISSN 0124-5996. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0124-59962009000200006&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0124-59962009000200006&lng=en&nrm=iso)
- [13] Pires, Machado, "Gestión por Procesos en el Diseño de las Organizaciones". *Información Tecnológica*, vol. 17, no. 1, pp. 35-44, 2006. ISSN 0718-0764. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000100005>
- [14] J. Canós, P Letelier, M. C. Penadés, "Metodologías Ágiles en el desarrollo de Software," Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2003. Disponible en: <http://www.willydev.net/descargas/masyxp.pdf>

- [15] P. Díaz, Sánchez, «Metamorfosis: un marco para el análisis de requisitos funcionales», *Workshop em Engenharia de Requisitos*, pp. 233-244, 2005. Disponible en: <http://www.lbd.dcc.ufmg.br/bdbcomp/servlet/Trabalho?id=4531>
- [16] W. L. Pantoja, C. A. Collazos, V. M. R. Penichet, «Entorno colaborativo de apoyo a la mejora de procesos de software en pequeñas organizaciones de software». *Revista Dyna*, vol. 80, no. 177, pp. 40-48, Febrero 2013. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0012-73532013000100005&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0012-73532013000100005&lng=en&nrm=iso)
- [17] M. J. Escalona, N. Koch, «Ingeniería de Requisitos en Aplicaciones para la Web: Un estudio comparativo», Universidad de Sevilla, 2002. Disponible en: <http://www.lsi.us.es/docs/informes/LSI-2002-4.pdf>
- [18] E. Velásquez-Rodríguez, Á. Custodio-Ruiz, «Sistema para la gestión del mantenimiento para un control supervisorio basado en software libre con PHP». *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol.15, no. 59, pp. 103-113, 2011. ISSN 1316-4821. Disponible en: [http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1316-48212011000200007&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212011000200007&lng=es&nrm=iso)
- [19] E. Campos, Teixeira, C. Lima, «Adotando a tecnologia de informação: análise da implementação de sistemas de "groupware"». *RAE electronica*, vol. 3, no. 1, pp. 0-0, 2004. ISSN 1676-5648. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/S1676-56482004000100006>
- [20] M. Suárez-Pita, «Las normas ISO 9000: 2000 en las actividades de registro sanitario». *Revista Cubana Higiene Epidemiológica*, vol. 41, no. 1, pp. 0-0, 2003. Disponible en: [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1561-30032003000100010&lng=es&nrm=iso](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032003000100010&lng=es&nrm=iso) ISSN 1561-3003
- [21] L. Solarte-Pazos, L. F. Sánchez-Arias, «Gerencia de proyectos y estrategia organizacional: el modelo de madurez en Gestión de Proyectos CP3M-V5.0». *Revista Innovar*, vol. 24, no 52, pp. 5-18, 2014. ISSN 0121-5051. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0121-50512014000200002&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-50512014000200002&lng=en&nrm=iso)
- [22] Ó. Parada-Gutiérrez, «Un enfoque multicriterio para la [11] toma de decisiones en la gestión de inventarios». *Cuaderno en Administración*, vol. 22, no. 38, pp. 169-187, 2009. ISSN 0120-3592. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-35922009000100009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-35922009000100009&lng=en&nrm=iso)
- [23] I. Jacobson, G. Booch, J. Rumbaugh, «El proceso unificado de desarrollo de software», Addison Wesley Reading, vol. 7, 2000.
- [24] P. P. Shan Chen, «The entity-relationship model—toward a unified view of data», *ACM Transactions on Database Systems (TODS)*, vol. 1, pp. 9-36, 1976.
- [25] J. Joskowicz, «Reglas y prácticas en eXtreme Programming». Universidad de Vigo, 2008, p. 22. Disponible en: <http://iie.fing.edu.uy/~josej/docs/XP%20-%20Jose%20Joskowicz.pdf>
- [26] A. Goldberg, «Smalltalk-80: The Interactive Programming Environment», Addison-Wesley series in computer science. p. 516, 1983. ISBN 100201113724.
- [27] *Extreme Programming: A gentle introduction, 2014* [online]. Disponible en <http://www.extremeprogramming.org/>.
- [28] T. Reenskaug, P. Wold, and O. Arild-Lehne. «Working With Objects: The OOram Software Engineering Method», Prentice Hall, 1995. ISBN 978-0-13-452930-1.
- [29] G. Booch, J. Rumbaugh, I. Jacobson, «UML: el lenguaje unificado de modelado», Addison-Wesley Iberoamericana España, 1999.
- [30] R. Díaz, «Las metodologías ágiles como garantía de calidad del software», *REICIS Revista Española de Innovación, Calidad e Ingeniería del Software*, vol. 5, pp. 40-43, 2009.
- [31] C. M. Zapata-Jaramillo, F. Arango-Isaza, «The UML method: a problem-based software development method», *Ingeniería e Investigación*, vol. 29 no. 1, pp. 69-75, Abril 2009.
- [32] A. Hernández-González, «Un Método para el Diseño de la Base de Datos a partir del Modelo Orientado a Objetos». *Computación y Sistemas*, vol.7, no. 4, pp. 224-238, 2004. ISSN 1405-5546. Disponible en: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-55462004000200002&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-55462004000200002&lng=es&nrm=iso)
- [33] F. Asteasuain, A. Javed, «Applying aspect oriented technology to relational data bases: The replication case». *Ingeniería y Desarrollo*, no. 25, pp. 218-234, 2009. ISSN 2145-9371. Disponible en: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0122-34612009000100012&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0122-34612009000100012&lng=en&nrm=iso)
- [34] M. Oliveira, M. Caldeira, «Um «framework» para a gestão do conhecimento nas organizações». *Revista Portuguesa e Brasileira de Gestão*. vol.7, no. 1, pp. 33-43, 2008, ISSN 1645-4464. Disponible en: [http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1645-44642008000100005&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.gpeari.mctes.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1645-44642008000100005&lng=pt&nrm=iso)
- [35] M. Heller, 2007. «REST and CRUD: the Impedance Mismatch», Developer World. InfoWorld. [online]. Disponible en: <http://www.infoworld.com/d/developer-world/rest-and-crud-impedance-mismatch-927>

## ENSEÑANZA EN LA INGENIERÍA DE SOFTWARE: APROXIMACIÓN A UN ESTADO DEL ARTE

### SOFTWARE ENGINEERING TEACHING: A STATE-OF-ART APPROACH

**Lina María Montoya-Suárez, MSc.**

*Grupo de Investigación INGECO,  
Universidad Autónoma Latinoamericana,  
Medellín, Colombia  
linamaria.montoya@unaula.edu.co*

**Elizabeth Pulgarín-Mejía, Esp.**

*Facultad de Educación  
Universidad Nacional Abierta y a Distancia  
Medellín, Colombia  
epulgarin@hotmail.com*

(Recibido el 20-05-2013 Aprobado el 21-06-2013)

**Resumen.** En este artículo se presenta una revisión de estado del arte sobre la formación en torno a la Ingeniería de Software, con una aproximación a aspectos relacionados con las estrategias de enseñanza aprendizaje basado en lúdica, haciendo énfasis en la enseñanza de la ingeniería de requisitos.

El artículo presenta una novedosa aplicación fundamentada en juegos, como estrategias de enseñanza con el objetivo de desarrollar habilidades, espacios de trabajo colaborativo, que permitan apoyar la investigación y la formación de maestros, entre otros. También se presenta un análisis sobre los diferentes estrategias lúdicas para la enseñanza en temáticas de la ingeniería del software al interior de un aula de clase.

**Palabras clave:** Educación informática, ingeniería de requisitos, ingeniería de software, lúdica, estrategias didácticas, técnicas de requisitos.

**Abstract.** This article presents an overview of state of the art teaching software engineering, with an approach to aspects of teaching strategies based on playful learning, emphasizing teaching requirements engineering.

The text presents different gaming applications as teaching strategies: aimed at developing skills, collaborative workspaces, and support research and training of teachers, among others, and performed at the end, an analysis of the different strategies for recreational teaching inside a classroom.

**Keywords:** Technology Education, software engineering, recreational, educational strategies, requirements techniques.

## 1. INTRODUCCIÓN

Enseñar ingeniería de requisitos es fundamental para los proyectos de desarrollo de software, debido a que los requisitos marca el punto de inicio y fin de las actividades como la planeación [1]. Para esto se necesitan técnicas que se incorporen en el proceso de enseñanza en el área de Ingeniería de software, con el propósito de crear métodos de enseñanza que permitan abordar la complejidad inherente a los sistemas de desarrollo [2], para esto es fundamental comprender varias temáticas en especial el área de requisitos.

Las autoras involucradas en la realización de este trabajo de investigación pretenden presentar una revisión del estado del arte para la enseñanza de ingeniería de software [3]. El trabajo hace parte de una experiencia documentada en educación para cursos importantes dentro de la ingeniería informática.

La necesidad de dar respuesta al desarrollo de las habilidades en los estudiantes obliga a realizar una revisión sobre la literatura disponible acerca de las estrategias de enseñanza con componente lúdico, estrategias didácticas y su aplicación en aula de clase [3], a continuación se presenta un marco teórico.

Esta revisión del estado del arte consiste en dos secciones. Se presenta el marco teórico en torno a las definiciones dentro de la ingeniería de requisitos en la primera parte del artículo. En la segunda parte del artículo se presentan algunas estrategias consideradas para la enseñanza de la ingeniería de software, lo cual conduce a la presentación de algunas conclusiones al final del artículo.

## 2. MARCO TEÓRICO

La construcción de la revisión literaria, en torno a la enseñanza Ingeniería de Software, las cuales incluye las siguientes definiciones mínimas:

- Terminología utilizada en la enseñanza en la ingeniería, la elicitación de requisitos y metodologías lúdicas.
- Conceptualización asociada a enseñanza, ingeniería de software, ingeniería de requisitos, elicitación de requisitos.
- Factores que influyen en la práctica de enseñanza y aprendizaje en lúdicas.

- Metodologías y lúdicas relacionadas con ingeniería de software.

### 2.1 Definiciones en Ingeniería de software.

La ingeniería de software se define como el estudio de los principios y metodologías para desarrollo y mantenimiento de sistemas de software [4] [5].

Comprende la aplicación práctica del conocimiento científico en el diseño y construcción de programas de computadora y la documentación asociada requerida para desarrollar, operar (funcionar) y mantenerlos. Se conoce también como desarrollo de software o producción de software [6][7].

Trata del establecimiento de los principios y métodos de la ingeniería a fin de obtener software de modo rentable que sea fiable y trabaje en máquinas reales [7]. También se entiende como la aplicación de un enfoque sistemático, disciplinado, y cuantificable al desarrollo, operación, y mantenimiento del software; es decir la aplicación de Ingeniería de Software [8]. Lo anterior, implica la mención a una disciplina que integra el proceso, los métodos, y las herramientas para el desarrollo de software de computadora [9] [10].

En resumen, es una disciplina de la ingeniería que comprende todos los aspectos de la producción de software desde las etapas iniciales de la especificación del sistema hasta el mantenimiento de este después que se utiliza [11].

### 2.2 Definiciones en Ingeniería de Requisitos.

Esta disciplina ayuda a los ingenieros de software a entender mejor el problema en cuya solución trabajarán. Incluye el conjunto de tareas que conducen a comprender cuál será el impacto del software sobre el negocio, qué es lo que el cliente quiere y cómo interactuarán los usuarios finales con el software [10].

Según Sommerville en [11], se define la ingeniería de requisitos como el proceso de desarrollar una especificación de software. Las especificaciones pretenden comunicar las necesidades del software del cliente a los desarrolladores del sistema [11].

Existen otras definiciones de ingeniería de requisitos, que la consideran como un conjunto de actividades en las cuales, utilizando técnicas y herramientas, se analiza un problema y se concluye con la especificación de una solución [29].

### 2.2.1 Requisitos.

Los requisitos se refieren a una condición o necesidad de un usuario que permita resolver un problema o alcanzar un objetivo [12]. Lo anterior, simplemente significa una declaración abstracta de alto nivel de un servicio que debe proporcionar el sistema o una restricción de éste [11].

También se entienden como una condición o capacidad que debe estar presente en un sistema o componentes de sistema para satisfacer un contrato, estándar, especificación u otro documento formal [12][13].

### 2.2.2 Captura de los Requisitos.

La captura de los requisitos es la primera etapa para la construcción y comprensión del problema que se pretende solucionar a través de una aplicación de software [14]. Es fundamental una actividad humana y es allí donde se identifican los stakeholders (Los interesados del sistema); así como las relaciones se establecen entre el equipo del desarrollo y el cliente logrando “descubrir los requisitos,” y la “adquisición de los requisitos” [15].

Uno de los aspectos fundamentales de la buena ingeniería de software es que exista buena comunicación entre los usuarios del aplicativo de software y los ingenieros [16]. Antes que comience el desarrollo, los expertos en requisitos deben formar el conducto para ser mediador entre el dominio de los usuarios del software y el mundo técnico del ingeniero de software hace la tarea de traducir la necesidad de los clientes utilizando diversas técnicas [17]

### 2.2.3 Técnicas de Captura de requisitos.

El proceso de definición en la ingeniería de requisitos, requiere una concentración en las técnicas. En este punto, los ingenieros informáticos necesitan sensibilizarse dado que los usuarios pueden tener dificultad para describir sus tareas [18]. En muchos casos se puede dejar información importante sin especificar, o los usuarios pueden estar poco dispuestos a cooperar, ni tampoco contarán con el tiempo suficiente que permita describir lo que esta definición de requisitos [19]. En este contexto los stakeholders y los ingenieros de requisitos trabajan en forma conjunta para identificar “qué”, “dónde” y “cómo” [15].

Es particularmente importante entender que la captura de requisitos no es una actividad pasiva y que ingenieros de requisitos tienen que trabajar arduamente para extraer la información adecuada.

## 2.3 Definiciones en el proceso Enseñanza-Aprendizaje.

### 2.3.1 Enseñanzas basadas en juegos.

Los juegos, la enseñanza y el aprendizaje pretenden la adquisición de conocimientos, hábitos, capacidades partiendo de la persona como entidad global. Las experiencias e intereses le permiten al ser humano aprender y generar conocimiento. También le permiten motivarse, lo que provoca cambios a nivel educativo [20].

A pesar de las discrepancias existentes en las teorías de la motivación, la mayoría de los especialistas coinciden en la definición de motivación como el conjunto de procesos implicados en la activación, dirección y persistencia de la conducta [21].

### 2.3.2 Categorías de los resultados del aprendizaje.

Las categorías de aprendizaje, según la estructuración propuesta por Rodas [22], consisten en:

**Habilidades intelectuales:** Son las capacidades que hacen al estudiante competente, y le permite responder a las conceptualizaciones de su entorno social. Forma la estructura fundamental y al mismo tiempo una cobertura en la educación formal, incluyendo las habilidades más simples del lenguaje como hacer un escrito básico o frase hasta las habilidades avanzadas de la ciencia o la ingeniería [22].

**Estrategias Cognoscitivas:** Son las capacidades que administran el proceso de aprendizaje del individuo, su retentiva y su conducta al pensar [21] [22] [23].

**Información verbal.** La mayoría de seres humanos reciben cantidad relevante de información o contenido verbal. Existe mucha información almacenada en la memoria de las personas, en forma de palabras (nombres de pueblos y ciudades, nombres de los meses, de las personas, de las cosas, etc.). Los seres humanos están en capacidad de guardar información en forma organizada, cuando se relaciona

con hechos históricos, formas de gobierno, noticias de éxitos de las ciencias, etc [21] [22] [23].

**Habilidades Motrices.** Se refiere a la capacidad humana para caminar, manejar un vehículo, escribir, dibujar, pintar, manejar una serie de herramientas, entre otros [21] [22] [23].

**Actitudes.** Con base al dominio afectivo de la persona, se pueden identificar algunas capacidades aprendidas o "actitudes". Los seres humanos tienen actitudes hacia personas, cosas o situaciones [21]. El efecto de tales actitudes es magnificar las reacciones positivas o negativas, lo cual se denomina como "estados internos de la persona", los cuales pueden observarse indirectamente en su conducta [22].

### 3. FASES DE APRENDIZAJE

La literatura en general permite evidenciar los métodos de enseñanza enfocados en tres aspectos fundamentales para la ingeniería informática, con lo que se pretende identificar algunas características o elementos relevantes para ser incorporados en el diseño de métodos para la enseñanza.

#### 3.1 Enseñanza general en la Ingeniería Informática

En esta fase se consideran las estrategias de aprendizaje como procesos de toma de decisiones (conscientes e intencionales) en los cuales el estudiante elige y recupera, de manera coordinada, los conocimientos que necesita para asistir una determinada demanda u objetivo, dependiendo de las características de la situación educativa en que se produce la acción [24].

Wankat & Oreovicz en [25] presentaron un conjunto de estrategias didácticas para ingeniería en general, en la enseñanza incluyen las clases magistrales y los proyectos prácticos. Otras estrategias, como los juegos, los estudios de casos y la educación personalizada, poco se han aplicado en la enseñanza de la ingeniería de software. Estos autores, además, afirman que la clase magistral como estrategia didáctica requiere ser complementada por otras estrategias para alcanzar objetivos cognitivos de más alto nivel [25].

La enseñanza tradicional de la ingeniería se ha complementado con nuevos métodos que ofrecen posibilidades en el conocimiento. Los juegos establecen estrategias que pueden complementar la enseñanza tradicional, pues su objetivo no es reemplazar las clases magistrales y los proyectos prácticos, sino suministrar y apoyar los espacios para afianzar los conceptos que se ofrecen en los tipos tradicionales de enseñanza [25].

Godoy en [26] presenta una revisión de las contribuciones de Roger C. Schank en [27] y propone desarrollar actividades en un ambiente virtual. Este autor sostiene que solo se aprende a través de intentar hacer cosas que requieran conocimiento y no escuchando a un docente narrar reglas del oficio. Schank en [27] resalta la importancia de tener presente las fallas de quien aprende, y que la falla conduce a reconstruir la estructura del conocimiento para explicarse por qué las predicciones no resultaron correctas, para esto presenta la estructura del razonamiento basada en casos y en reglas; el modelo de explicación basado en casos consta de cinco arquitecturas de enseñanza [28], las cuales se denominan:

1. Aprendizaje Activo.
2. Aprendizaje incidental.
3. Aprendizaje por reflexión.
4. Enseñanza basada en casos.
5. Aprendizaje por exploración.

#### 3.2 Enseñanza Específica en la Ingeniería de Software.

Los ingenieros de software deben tener aptitudes de tipo administrativo, que poco se cultivan en la enseñanza tradicional [29]. Hoy en día, la enseñanza no se basa sólo en los conceptos impartidos por el maestro, sino que se inclina hacia el estudiante como elemento central de la clase. Es por ello que ahora se emplean los juegos como herramienta pedagógica [29] [30].

El desarrollo de software ha sido desde sus inicios una actividad caótica, complicada de entender y poco ingenieril [31]. En efecto, si se observa años atrás, se encuentran más problemas que aciertos. Es común que los proyectos de software se atrasen, no terminen a tiempo, se liquiden y que los presu-

puestos destinados a ellos se desborden sin límite; es común que los esfuerzos en la gestión de esos proyectos caiga en terrenos estériles y que en ocasiones parezca que esos proyectos van a la deriva [32].

Algunas reflexiones personales de parte de Ruiz en [33], sobre el papel que juega la ingeniería del software en la informática, argumenta la necesidad de una reforma en los contenidos en la manera de enseñar y aprender apostándole a la incorporación transversal en toda la carrera de informática una perspectiva de ingeniería [33].

Anaya en [34] propone una visión de la enseñanza en la ingeniería de software como apoyo al mejoramiento de las empresas con un fin: la integración de factores técnicos, gerenciales y organizacionales permitiendo mejorar la práctica del desarrollo en las organizaciones como principios y estrategias. Su trabajo se resume en dos aspectos básicos: uno es que los profesores deben tener una vista unificada acerca del cuerpo de conocimiento que soporta esta área y lo segundo, la universidad debe tener una percepción de la realidad de las prácticas en las organizaciones de software y los problemas que enfrentan, por la falta de aplicación de las buenas prácticas de ingeniería de software [34].

Marqués en [35] plantea un ciclo de desarrollo para software educativo de programas en diez fases y hace una descripción detallada de las actividades y recursos fundamentales para cada una de las etapas, el eje de la construcción de los programas educativos parte de una idea inicial (semilla) con el propósito de favorecer los procesos de enseñanza / aprendizaje y que va tomando forma poco a poco para el pre-diseño o diseño funcional; una idea que conforma unas actividades atrayentes para el alumno que potencialmente pueden facilitar la consecución de unos determinados objetivos educativos [35].

Gayo Lanvin & Salvador en [36] describe una experiencia, desarrollada en una asignatura utilizado herramientas colaborativas en el desarrollo de software libre utilizando la herramientas Sourceforge, creado un proyecto común entre todos los estudiantes, con el objetivo de facilitar un aprendizaje basado en proyectos.

Guitart et al. [37] hace una elección del modelo de evaluación como caso práctico para asignaturas de ingeniería del software, con base al planteamiento

inicial del proceso de evaluación, que debe de ser coherente con los objetivos de aprendizaje. Para esto tuvieron en cuenta las características fundamentales de la asignatura y como influyó en el modelo de evaluación, generando los siguientes descriptores: objetivos generales de aprendizaje, secuencialidad, semestre en que se sitúa la asignatura, metodología de aprendizaje a seguir, tipología de la asignatura y número de aulas por asignatura. En resumen, para los objetivos generales de aprendizaje, se han distinguido tres elementos [37]:

- **Conceptual:** Relacionado con el incremento del conocimiento teórico del saber de un área.
- **Procedimental:** Se basa en la ampliación de conocimiento práctico del saber de un área.
- **Integrador:** Relacionado con el crecimiento de conocimiento sobre las destrezas, aptitudes y actitudes propias del ejercicio de una profesión.

A partir de los descriptores mencionados en [37], ha sido posible construir un resumen de la discusión del modelo de evaluación, según se presenta en la Tabla 1:

Vale la pena mencionar en esta revisión, el trabajo de Mariño et al. en [38], en el que se presenta un software interactivo orientado a la enseñanza de un método de programación por camino crítico. Para el desarrollo de la aplicación se utilizaron varias técnicas y tecnologías de comunicación. A partir de estas técnicas, se priorizaron aquellas relacionadas con el diseño de aplicaciones interactivas hipermediales y se adoptó la técnica basada en el desarrollo de prototipos informáticos de Kendall [39] y de Whitten [40] orientándola a la producción de material didáctico interactivo. Para ello siguieron los siguientes pasos:

1. Evaluación y estudio de las herramientas orientadas a la construcción de software multi-medial educativo.
2. Selección de los contenidos temáticos específicos.
3. Definición de dos etapas para la elaboración del producto.
4. Diseño de las interfaces, la arquitectura de las pantallas y la secuencia del recorrido.



**Tabla 1: Modelos de evaluación para Ingeniería de Software**

Tipología	Objetivos generales de aprendizajes	Modelo de Evaluación
Secuenciales Terminales	Conceptual	Examen o prueba de Validación
	Procedimental	Prueba de Validación o Evaluación continuada
	Integradora	Evaluación continuada
Secuenciales No Terminales	Conceptual	Examen
	Procedimental	Prueba de Validación o Evaluación continuada
	Integradora	<b>Evaluación continuada</b>

5. Creación del prototipo educativo.
6. Ejecución de pruebas y validaciones.

### 3.3 Enseñanza en la Ingeniería de Requisitos para el Desarrollo de Software

En la actualidad se encuentran herramientas en entornos virtuales que apoyan el proceso de enseñanza con fines educativos [41] En el ámbito multimedial, las principales tendencias en el diseño de juegos, se basa en juegos de computador [42].

Díaz et al. [43] presenta elementos teórico-metodológicos con el fin de guiar la elaboración de software con fines educativos, haciendo referencia a una guía metodológica, con la que se persigue propiciar un enfoque crítico, reflexivo, interdisciplinario e integrador, de los conceptos clave en el desarrollo de software educativo. Se hace énfasis en la relación que presenta la pedagogía en la ingeniería del software, acerca de los principios subyacentes en los dos paradigmas educativos, instructivismo y constructivismo, de forma implícita o explícita.

## 4. ENSEÑANZA BASADA EN JUEGOS EN LA INGENIERÍA DE SOFTWARE.

El juego de la consistencia es una herramienta didáctica para usar en las aulas de clase, que le permite al estudiante afianzar, estructurar, analizar los conocimientos sobre modelado, métodos de desarrollo

de software, trabajo en equipo y comunicación en la ingeniería de software [44].

Para la enseñanza futura de la ingeniería de software, estrategias de autoaprendizaje para los estudiantes, y refiere específicamente entre estas estrategias la participación en investigación desde el pregrado y la realización de juegos instructivos en clase [45]. Esta sugerencia coincide con la apreciación de Fairley et al [46], para la Ingeniería en general, cuando afirman que se requiere que el aprendizaje en clase sea activo y cooperativo, de forma que los estudiantes tengan una actitud más activa en relación con los conocimientos que se ofrecen, a diferencia de las tradicionales clases expositivas que se suelen impartir. Estrategias como los juegos en clase no han sido comúnmente empleadas en la enseñanza tradicional de la ingeniería (o, más específicamente, en la Ingeniería de Software) para esto existen algunas experiencias

Zapata & Duarte en [44], proponen en su investigación el juego de la consistencia: una estrategia didáctica para la ingeniería de software como una manera de lograr el aprendizaje de los alumnos desde una experiencia lúdica; el juego permite trabajar el concepto de consistencia entre diagramas de UML (Unified Modeling Language), el estándar más aceptado en la actualidad para el modelado de sistemas informáticos en ingeniería de software [44].

### 4.1 Juego UNC Method

Zapata et al. en [47] propone un Juego para la Enseñanza de Métodos de Desarrollo de Software, específicamente “UNC-Method”. Este método de desarrollo de software, se caracteriza por poseer cuatro fases: contexto del software, análisis del problema, propuestas de solución y esquema conceptual, en el interior de cada fase, el equipo de desarrollo debe elaborar un conjunto de artefactos que conforman un entregable no importa el orden de elaboración, pero sí se debe respetar el orden de secuencia entre las fases, con el fin de lograr el refinamiento de los artefactos, principalmente el diagrama de casos de uso, las interfaces gráficas de usuario y el diagrama de clases.

En la Figura 1 se observa el tablero de juego que posee un conjunto de zonas.

INICIO	PIERDE UN TURNO	ESCOJA CASILLA DIAGRAMA	DIAGR. CLASES PROPIO	LIBERA DIAGRAMA	DIAGR. CLASES AJENO	ESCOJA CASILLA DIAGRAMA	ESQUEMA PRECONC PROPIO	ESQUEMA PRECONC AJENO	PIERDE DIAGRAMA	INTERFAZ AJENA	INTERFAZ PROPIA
ESCOJA CASILLA DIAGRAMA	DC DO 22 EP CU IN	DC DO 21 EP CU IN	DC DO 30 EP CU IN	DC DO 12 EP CU IN	Puntos: 9	Puntos: 6	Puntos: -1	Puntos: 4	MODELO DOMINIO PROPIO	MODELO DOMINIO AJENO	PIERDE UN TURNO
DIAGR. C. U. PROPIO	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MODELO DOMINIO AJENO	MODELO DOMINIO AJENO	MODELO DOMINIO AJENO	MODELO DOMINIO AJENO	MODELO DOMINIO AJENO	MODELO DOMINIO AJENO	MODELO DOMINIO AJENO
DIAGR. C. U. AJENO	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	DC DO EP CU IN	MODELO DOMINIO AJENO
PIERDE UN TURNO	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	MD DP CE	LIBERA DIAGRAMA
PIERDE DIAGRAMA	DIAGR. CLASES DC ESQ. PRECONC. EP INTERFAZ IN	MOD. DOMINIO MD DIAG. PROCESOS DP CAUSA EFECTO CE	DIAGR. OBJET. DO D. CASOS USO CU	DIAGR. OBJET. DO D. CASOS USO CU	DIAGR. OBJET. DO D. CASOS USO CU	DIAGR. OBJET. DO D. CASOS USO CU	DIAGR. OBJET. DO D. CASOS USO CU	DIAGR. OBJET. DO D. CASOS USO CU	DIAGR. OBJET. DO D. CASOS USO CU	DIAGR. OBJET. DO D. CASOS USO CU	ESCOJA CASILLA DIAGRAMA
DIAGR. OBJET. PROPIO	LIBERA DIAGRAMA	DIAGR. OBJET. AJENO	PIERDE UN TURNO	DIAGR. C-E AJENO	ESCOJA CASILLA DIAGRAMA	AGR. C-E PROPIO	LIBERA DIAGRAMA	ESCOJA CASILLA DIAGRAMA	DIAGR. PROCES. PROPIO	PIERDE DIAGRAMA	DIAGR. PROCES. AJENO

Figura 1: Tablero del juego del UNC-Method [47].

### 4.2 Tarjetas de Riesgos

En la Universidad de Carnegie Mellon se desarrolló un juego para la enseñanza de los conceptos básicos de la gestión de riesgos en el proceso de desarrollo de software, para el programa de Ingeniería, con el objetivo de afianzar la toma de decisiones [48]. Consiste en la simulación de un proyecto de desarrollo de software presenta aspectos importantes a tener en cuenta al diseñar un juego con propósito educativo [48].

El juego consiste en que un jugador asume el rol de director de proyecto y todos compiten unos contra otros, para lograr desarrollar un producto, venderlo en el mercado. El juego está estructurado en 5 fases: la planificación, los requisitos, la arquitectura y el diseño, la ejecución y el ensayo. Se ofrece a los jugadores un conjunto determinado de opciones para elaborar, estructurar y opinar sobre cómo y qué hacer en el proyecto.

Los participantes inician con un conjunto de recursos ya sea personal o dinero, se presentan cinco tarjetas de riesgo, cada una representada en la Figura 2

1. Proyecto de tarjetas.
2. Tarjetas de sorpresa.
3. Las tarjetas de perdón.
4. El riesgo
5. La mitigación de tarjeta.

Los jugadores en cada turno pueden hacer una de dos cosas: Realizar un proyecto de paso o Mitigar una situación de riesgo.

El objetivo del juego es mejorar el aprendizaje y la toma de decisiones con la simulación de un proyecto de desarrollo de software propuesto [48].

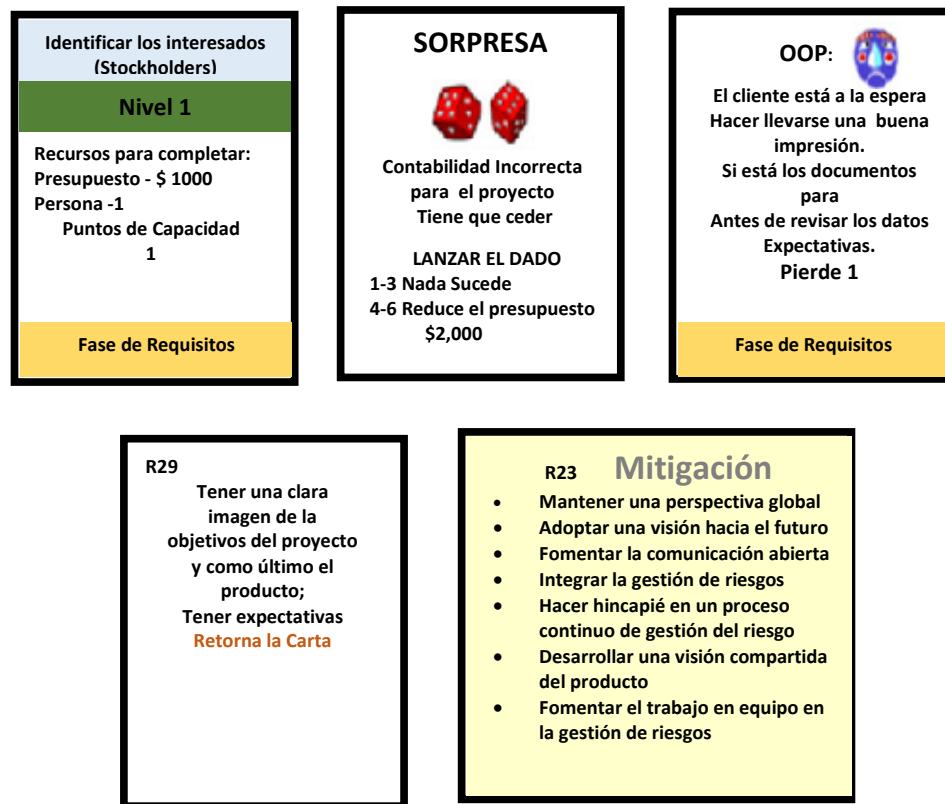


Figura 2: Ejemplo de las 5 Tarjetas de Riesgos [48].

### 4.3 Juego PoV

PoV-Game [30] es una aplicación de juego, mediante cartas, que busca concientizar a los participantes en la importancia de lograr acuerdos entre los diferentes puntos de vista de los actores participantes de una aplicación de software, además busca resaltar el resultado que se genera al unir las funciones de cada uno de los actores de manera consistente, planteando infinitas soluciones del sistema, que tiene un problema en el desarrollo de un software; el fin es procurar reconocer el alcance de una aplicación y seleccionar la información apropiada con el fin de lograr la satisfacción de los interesados del sistema.

La estructura del juego consiste en que 129 fichas de juego, están distribuidas de la siguiente manera:

- 18 actores (3 de cada uno).
- 54 procesos (2 de cada una).
- 51 objetos (6 de cada uno) identificadas con el color amarillo.
- Disposición de comodines (2 de cada tipo) identificadas con el color rosado.

Cada carta tiene un valor asignado el cual se usará para determinar el jugador que inicie la partida y en algunos casos, el ganador del juego. Los valores asignados son los siguientes: verbos: 1 punto, objetos: 2 puntos, actores: 3 puntos y comodines: 4 puntos.

Para lograr una diferenciación visual de las cartas y su contenido se utilizan los colores de la Figura 3. El tablero permite que todos los jugadores puedan leer fácilmente las palabras indicadas, además las señalizaciones permiten observar el orden temporal correcto en que deben realizarse las acciones para lograr el pago de la nómina, la estructura de juego consiste en que los participantes armen correctamente nueve frases que componen algunos de los procesos que se deben llevar a cabo a la hora de realizar el pago de la nómina.

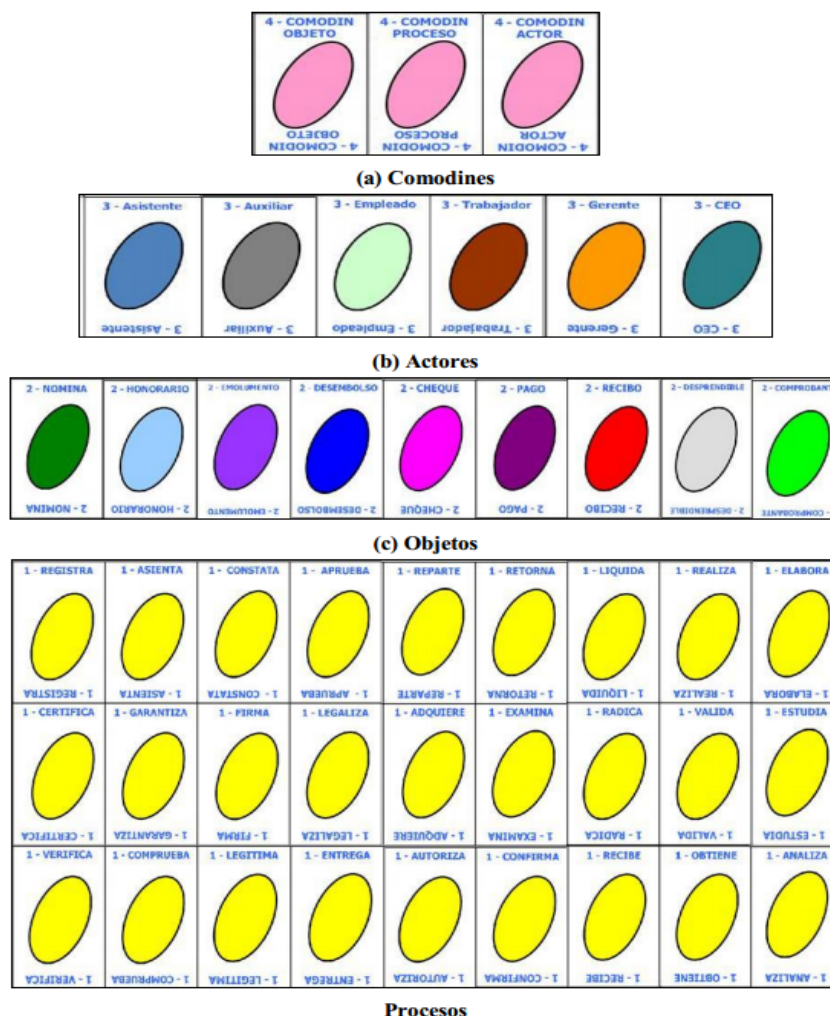


Figura 3: Cartas de juego en PoV GAME [30].

#### 4.4 Origami para Desarrollo de Software

“El juego del desarrollo de software”, está estructurado y elaborado con el objetivo es construir cajas de origami que estén marcadas con uno de los siguientes grupos de letras: SO, FT, WA o RE, cada una de las letras están representa en un módulo, como se observa en la Figura 4. Cada módulo debe cumplir con un conjunto de reglas definidas al principio del juego.

A cada grupo se le entrega una hoja con instrucciones representadas gráficamente, con el propósito de armar las cajas (ver Figura 5), esta hoja representa la materia prima junto con los cuatro grupos de letras descritos en la figura anterior y una hoja de control que tiene la posibilidad de recopilar la información del juego para determinar el ganador.

El director del juego, verifica el cumplimiento de las normas y solo él puede responder preguntas a sólo uno de los integrantes de cada grupo, el director termina la construcción y realiza el conteo de los módulos elaborados correctamente y las “compra”, al final recopila la información de cada empresa y obtiene el balance en términos de pérdidas o utilidades. El grupo con mayores utilidades o menores pérdidas será el ganador.

#### 4.5 Especificación de requisitos con HELER

Cuervo et al. en [51] presentan la realización de herramienta HELER (Herramienta Libre para la Especificación de Requisitos) una aplicación de carácter académico, libre y monousuario, para ambiente Windows y licencia GPL además desarrollada en java. Su arquitectura está dada por el patrón de diseño



Figura 4: Hoja de materia Prima [49].

Modelo Vista Controlador, ofrece soporte a las actividades de Ingeniería de Requisitos y entendimiento del problema, enmarcada dentro del Proceso Unificado con base a 5 módulos: proyecto, stakeholder, actores, casos de uso, y requisitos.

#### 4.6 Experiencia de SimulES

El juego del diálogo de deducción de “requisitos” simula de manera práctica y dinámica las condiciones de desarrollo de software en un entorno competitivo; aproximadamente en dos horas, los participantes están a cargo del desarrollo de una aplicación de software, con requisitos específicos establecidos previamente por el cliente, este juego consta de dos fases y cada rol tiene definido un conjunto de normas y especificaciones sobre lo que se debe realizar en cada etapa del juego; además se tiene un tiempo asignado para la realización de cada ciclo del juego y finalmente se determina el ganador, que será aquel equipo que genere mayores utilidades en el desarrollo de la aplicación, incluyendo la documentación presentada en [29].

Para la deducción de requisitos Zapata & Carmona en [52], proponen un modelo de diálogo para la ingeniería de software basado en requisitos, esta es una técnica para recolección, procesamiento y especificación de los requisitos de los interesados en el desarrollo de una aplicación de software con base a preguntas durante una entrevista, aplicado a un caso de estudio [52].

Monsalve et al. en [53] muestran cómo la elección y la aplicación oportuna de estrategias pueden llevar a la evolución y mejora de los sistemas, cuyo objetivo

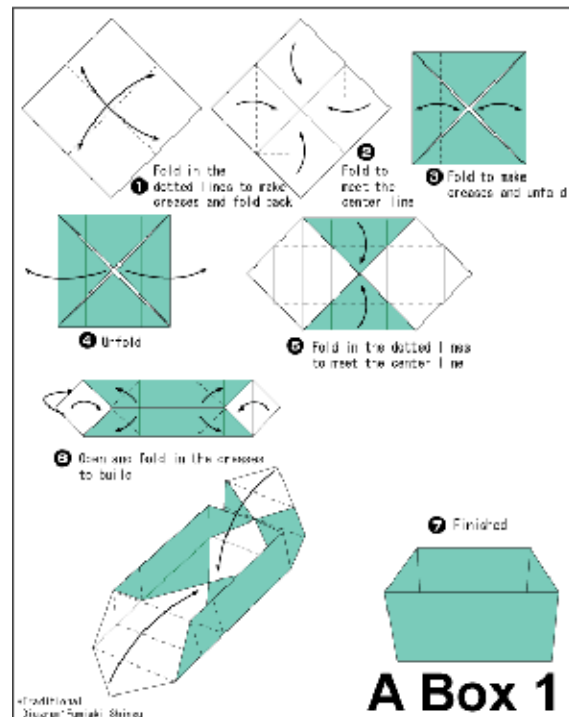


Figura 5: Instrucciones para el armado de origami de cubo [50].

es expresar a través de las técnicas de elicitación de requisitos como puede ser concebida su evolución por medio de un juego de cartas educacional SimulES. Este juego cuenta con un modelo situacional como fuente de información y lo deriva para un modelo intencional, adiciona conceptos de evolución de software e interacción entre jugadores al ser un juego multiusuario [53].

En SimulES el estudiante asume el rol de gerente de proyecto y debe lidiar con el presupuesto del proyecto, contratar ingenieros, despedir ingenieros, construir los diferentes artefactos requeridos para el proyecto, entre muchas otras actividades.

En la Figura 6 se puede observar el proceso que se surge durante el juego, al inicio de la jugada se elige el proyecto que deberá ser construido durante el juego, además se debe de elegir las acciones de los artefactos propios del producto software, en cada jugada se tratan los conceptos y tratamiento de problemas usados y relacionados a los conceptos y problemas típicos en la ingeniería de software. Las estrategias abordadas para encontrar elementos de evolución en el juego SimulES fueron observación y cuestionarios.

Tabla 2: Aprendizaje en cuatro fases [57] .

Paso	Descripción
<b>Atención</b>	Aprender algo requiere atención, déficit en ella perjudican el aprendizaje.
<b>Retención</b>	Revisión de la información, codificándola y relacionándola con la información ya almacenada.
<b>Reproducción</b>	Comparación con la representación conceptual del individuo y reproducción del comportamiento.
<b>Motivación</b>	Las consecuencias de la observación informan a los observadores de su valor y estos a su vez tienen razones valederas para observar el modelo.

#### 4.7 Otras Experiencias Exitosas

Los desarrollos actuales han mostrado la importancia de los procesos de captura, definición, validación e implementación en la ingeniería de requisitos [54]. En este sentido, se han efectuado estudios y se ha encontrado que una de las debilidades del desarrollo de software se encuentra comúnmente en el análisis de un problema; para esto se necesita buscar aproximaciones concretas aplicando los modelos que permitan mejorar la consistencia, la completitud, viabilidad en la comprensión del sistema y la gestión de los cambios [55].

Existen varios problemas para la enseñanza en las aulas de las técnicas de entrevistas para la definición de requisitos. De acuerdo a Oliveros [56], una de ellas es la dificultad de ejecutar una práctica real: las técnicas son meramente descritas y en la mejor de las situaciones practicadas en un caso simplificado; otra dificultad por parte de personas de formación tecnológica es la subestimación de las técnicas “blandas” que requiere la elicitación de requerimientos, esta subestimación en muchos casos no se limita a los alumnos: se especula que una sólida formación técnica es suficiente para el alumno asegurar el éxito de un proyecto de software .

Par abordar el problema, tuvo en cuenta cada uno de los pasos identificados por Bandura [57] en el proceso de aprendizaje por observación (ver Tabla 3), quien desarrolló la experiencia basado en las cuatro fases de aprendizaje usando la técnica de requisitos: entrevista a dos grupos de estudiantes y obtuvo muy buenos resultados.

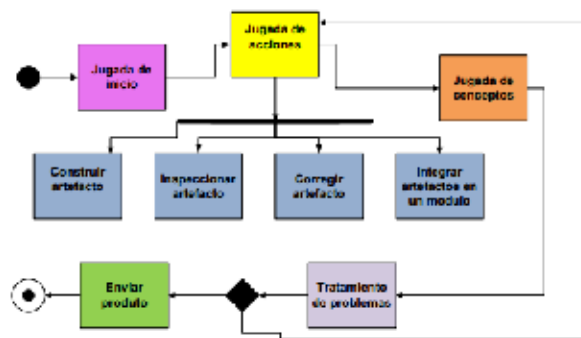


Figura 6: Dinámica de SimulES [53].

#### 4.8 Juegos Aplicables a la Enseñanza de la Ingeniería de Requisitos.

A continuación se estructura la aplicación de juegos en la ingeniería de requisitos:

Zapata & Awad [29] proponen un juego para la ingeniería de requisitos a partir de roles y orientado al desarrollo de una aplicación de software basados en proyectos. Su fin esencial es simular aspectos en el cumplimiento de requisitos, la especialización de funciones, la completitud de la documentación, el trabajo en equipo, etc.

González et al. en [58] formulan el diseño y aplicación de juegos para la enseñanza de ingeniería de software a nivel de pregrado en la universidad de Medellín, presentando un conjunto de lúdicas implementadas y diseñadas en la asignatura “Ingeniería de Información” realizado en tres fases:

- Video casero sobre catástrofes de software.
- Los empresarios en el aula.
- Concurso para la asimilación de conceptos básicos de la Ingeniería de Requisitos.

Los resultados obtenidos le permitieron concluir que las estrategias basadas en lúdicas son útiles en el proceso de enseñanza-aprendizaje, debido a que el estudiante alcanza ser un sujeto activo, logrando generar mayor recordación de conceptos en el tiempo y el desarrollo de capacidades adicionales, lo que realmente ayuda al alumno aprender a partir de juegos [58].

Baker presenta [59] una simulación para la especificación de los requisitos en la ingeniería de software

con el fin de entregar una aplicación de software con Juego de cartas, usado para ejemplificar el proceso de desarrollo de software. Hace énfasis en la fase de implementación, donde los programadores se encuentran con inconvenientes de tipo humano, técnico o de cambios en el alcance inicial de un proyecto

Los jugadores tienen el reto de seguir las prácticas adecuadas de ingeniería de software a fin de evitar consecuencias adversas que podrían provocar su caída por detrás de su rival durante la competencia.

Al completar su proyecto, los jugadores deberán poner las cartas sobre la base del ciclo de vida del modelo en cascada, que se muestra en la Figura 7.

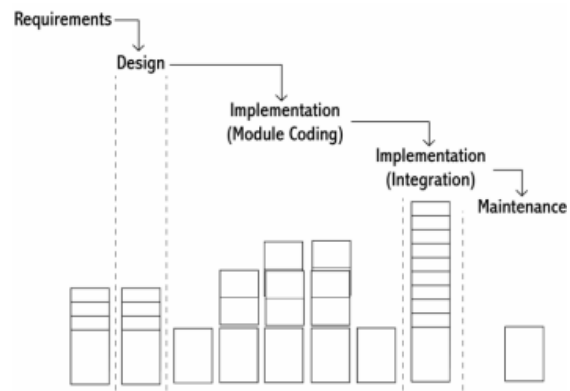


Figura 7: Fases y zonas en el juego problemas y programadores [59].

### 5. ANÁLISIS DE LAS EXPERIENCIAS

En la tabla 4 se muestra una síntesis de los estudios presentados hasta el momento y se realiza una clasificación por autor, año de publicación y Propuesta

con un énfasis especial en el aspecto enseñanza en la ingeniería, enseñanza en la ingeniería de software, enseñanza en la ingeniería de requisitos en el desarrollo de software.

Tabla 4: Síntesis estudios presentados.

Autor y año	Propuesta
<b>Wankat &amp; Oreovicz, [25].</b>	Presentaron un conjunto de estrategias didácticas para ingeniería en general, en la enseñanza incluyen las clases magistrales y los proyectos prácticos, basados en juegos.
<b>Marqués [35].</b>	Plantea un ciclo de desarrollo para software educativo de programas en diez fases y hace una descripción detallada de las actividades y recursos fundamentales para cada una de las etapas.
<b>Mariño et al, [38].</b>	Desarrollaron un software interactivo orientado a la enseñanza de un método de programación por camino crítico.
<b>Baker [59].</b>	Presenta una simulación para la especificación de los requisitos en la ingeniería de software con el fin de entregar una aplicación de software con Juego de cartas, usado para ejemplificar el proceso de desarrollo de software.
<b>Anaya [34].</b>	Propone una visión de la enseñanza en la ingeniería de software como apoyo al mejoramiento de las empresas con un fin: la integración de factores técnicos, gerenciales y organizacionales permitiendo mejorar la práctica del desarrollo en las organizaciones como principios y estrategias.
<b>Gayo et al [36].</b>	Describen una experiencia, desarrollada en una asignatura utilizando herramientas colaborativas en el desarrollo de software libre utilizando la herramientas Sourceforge, creado un proyecto común entre todos los estudiantes, con el objetivo de facilitar un aprendizaje basado en proyectos.
<b>Guitart et al, [37].</b>	Estructuran y hacen una elección del modelo de evaluación como caso práctico para asignaturas de ingeniería del software, partiendo de un planteamiento inicial del proceso de evaluación, que debe de ser coherente con los objetivos de aprendizaje.
<b>Díaz et al, [43].</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estructuraron elementos teórico-metodológicos con el fin de guiar la elaboración de software con fines educativos, haciendo referencia a una guía metodológica, con la que se persigue propiciar un enfoque crítico, reflexivo, interdisciplinario e integrador, de los conceptos clave en el desarrollo de software educativo.</li> </ul>
<b>Taran [48].</b>	La Universidad de Carnegie Mellon desarrolló un juego para la enseñanza de los conceptos básicos de la gestión de riesgos en el proceso de desarrollo de software, para el programa de Ingeniería, con el objetivo de afianzar la toma de decisiones.

Autor y año	Propuesta
Ruiz [33].	Afirma la importancia y el papel que juega la ingeniería del software en la informática y argumenta que es necesaria una reforma en los contenidos en la manera de enseñar y aprender.
Zapata & Awad [29].	Proponen un juego para la ingeniería de requisitos a partir de roles y orientado al desarrollo de una aplicación de software basados en proyectos.  Simular aspectos en el cumplimiento de requisitos, en un entorno competitivo.
Zapata & Duarte [44].	Crearon un juego de la consistencia como herramienta didáctica para usar en las aulas de clase, que le permite al estudiante afianzar, estructurar, analizar los conocimientos sobre modelado, métodos de desarrollo de software, trabajo en equipo y comunicación en la ingeniería de software.
Zapata & Carmona [60].	Estructuran un modelo de diálogo para la ingeniería de software basado en requisitos, esta es una técnica para recolección, procesamiento y especificación de los requisitos de los interesados en el desarrollo de una aplicación de software con base a preguntas durante una entrevista, aplicado a un caso de estudio.
Cuervo et al. [51].	Presentan la realización de herramienta HELER (Herramienta Libre para la Especificación de Requisitos) 5 módulos: proyecto, stakeholder, actores, casos de uso, y requisitos.
Zapata, Calderón & Rivera, [61].	Crearon un juego PoV-Game, es una aplicación de juego, mediante cartas, que busca concientizar a los participantes en la importancia de lograr acuerdos entre los diferentes puntos de vista de los actores participantes de una aplicación de software.
Godoy [26].	Hace una revisión de las contribuciones de Roger C. Schank en [97] y propone desarrollar actividades en un ambiente virtual. Este autor afirma que el estudiante solo aprende a través de intentar hacer cosas que requieran conocimiento y no escuchando a un docente narrar reglas del oficio.
González et al. [58].	Proponen el diseño y aplicación para la enseñanza de ingeniería de software. "Ingeniería de Información" realizado en tres fases:
	1. Video casero sobre catástrofes de software.
	2. Los empresarios en el aula.
	3. Concurso para la asimilación de conceptos básicos de la Ingeniería de Requisitos.

Las investigaciones encontradas hasta la fecha se han realizado sobre las diferentes estrategias de enseñanza en la ingeniería de software, existe caso de éxito aplicado en aula de clase como valor añadido al proceso de enseñanza- aprendizaje, haciendo una búsqueda más profunda se encontró que hay caso de éxito en investigaciones donde evidencias resultados y análisis realizados sobre la importancia de utilizar estrategias didactas para enseñar Ingeniería de Software donde permite responder a necesidades de formación.

Es importante destacar la tendencia y significado que ha venido dando los docentes de universidades en Colombia para enseñar ingeniería de software con estrategias de enseñanza aprendizaje que sea didáctico con el objetivo de que los estudiantes puedan identificar y entender el problema, entender las causas que originan el problema, identificar a los involucrados en el sistema, definir los límites del sistema, el mantenimiento, la calidad y la documentación de diseño entre otros [15]

## 5. CONCLUSIONES

En este artículo se han presentado las investigaciones más significativas en torno a la enseñanza y aprendizaje en ingeniería de software. Algunas de estas investigaciones presentan y demuestran la importancia de incorporar en el aula de clase como apoyo a los cursos, la aplicación de estrategias didácticas para la enseñanza en Ingeniería de Software.

Se ha validado la hipótesis según la cual es fundamental para el desarrollo de nuevas metodologías identificar que estrategias de aprendizaje se pueden aplicar y que temáticas presentan los estudiantes dificultad para aprender, con base a esto se puedan abordar y estructurar como estrategias enseñanza-aprendizaje dentro del aula de clase, para garantizar una formación efectiva a estudiantes con habilidades y tipos de aprendizaje diferentes.



## REFERENCIAS

- [1] M. Arias, "La ingeniería de requerimientos y su importancia en el desarrollo de proyectos de software." *InterSedes: Revista de las Sedes Regionales*, 6 (10)., 2005.
- [2] E. Monsalve, V. Werneck, & J. Leite, "Evolución de un Juego Educacional de Ingeniería de Software a través de Técnicas de Elicitación de Requisitos," in *Proceedings of XIII Workshop on Requirements Engineering (WER'2010)*, Cuenca, Ecuador, 2010, pp. 12–23.
- [3] L. M. Montoya, "Definición de un método para el proceso de enseñanza de elicitación de requisitos, basado en lúdicas.," Tesis Magistral en Ingeniería de Software, Universidad de Medellín, Medellín (Colombia), 2013.
- [4] M. V. Zelkowitz, A. C. Shaw, & J. D. Gannon, *Principles of software engineering and design*. Prentice-Hall Englewood Cliffs, 1979.
- [5] T. Gilb & S. Finzi, *Principles of software engineering management*, vol. 4. Addison-Wesley Reading, MA, 1988.
- [6] B. W. Boehm, "Software engineering economics," *IEEE Transactions on Pioneers and Their Contributions to Software Engineering*, pp. 99–150, 2001,.
- [7] R. S. Pressman & W. S. Jawadekar, "Software engineering," New York 1992, vol. McGraw-Hill, New York, NY (USA), ISBN:0070507902, 1987.
- [8] F. J. Zarazaga-Soria, M. I. Alonso-Galipienso, "La Ingeniería del Software en el currículo del Ingeniero en Informática," *Novática Rev. la Asoc. Técnicos Informática*, N° 161, pp. 43–50, 2003.
- [9] R. S. Pressman, *Ingeniería del Software: Un enfoque práctico*, McGraw-Hill. Mikel Angoar, 1997.
- [10] R. S. Pressman, "Ingeniería del Software." McGraw-Hill Interamericana-México. Disponible en: <http://awl.com/cseng/otseries> , 670p, 2006.
- [11] I. Sommerville, *Ingeniería del software*, Pearson Ed. Madrid: Pearson Educación S.A., 2005, pp. 1–677.
- [12] IEEE Computer Society Committee, *IEEE Computer Society model program in computer science and engineering*. IEEE Computer Society, 1983.
- [13] A. Geraci, F. Katki, L. McMonegal, B. Meyer, J. Lane, P. Wilson, J. Radatz, M. Yee, H. Porteous, & F. Springsteel, *IEEE standard computer dictionary: Compilation of IEEE standard computer glossaries*. IEEE Press, 1991.
- [14] I. Villanueva, J. Sánchez, & Ó. Pastor, "Elicitación de requisitos en sistemas de gestión orientados a procesos.," in *WER*, 2005, pp. 38–49.
- [15] I. Sommerville & G. Kotonya, *Requirements engineering: processes and techniques*, Pearson Ed. John Wiley & Sons, Inc., 1998, Disponible en: <http://books.google.com.co/books/about/Ingenier%C3>
- [16] L. Jiang & A. Eberlein, "Selecting Requirements Engineering Techniques Based on Project Attributes--A Case Study," *14th Annual IEEE International Conference and Workshops on the Engineering of Computer-Based Systems (ECBS'07)*, 2007, pp. 269–278.
- [17] K. Pohl, *Requirements engineering: fundamentals, principles, and techniques*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2010.
- [18] A. M. Davis, *Software requirements: objects, functions, and states*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ (USA), 1993. ISBN:0-13-805763-X
- [19] P. Loucopoulos & V. Karakostas, *System requirements engineering*. McGraw-Hill, Inc., 1995.
- [20] J. Beltrán Llera, "Procesos, estrategias y técnicas de aprendizaje," Editor. Síntesis, SA Madrid, 1993.
- [21] J. Beltrán, *Procesos, estrategias y técnicas de aprendizaje*. Síntesis, Madrid (España), 1996.
- [22] J. M. Rodas, "Investigación sobre métodos de enseñanza-aprendizaje," *Boletín Electrónico*. Univ. Rafael Landívar. Disponible en: [http://www.academia.edu/1646623/INVESTIGACION\\_SOBRE\\_METODOS\\_DE\\_ENSEÑANZA-APRENDIZAJE](http://www.academia.edu/1646623/INVESTIGACION_SOBRE_METODOS_DE_ENSEÑANZA-APRENDIZAJE)

- [23] C. López, “Aprendizaje Organizacional,” 2003. Disponible en: <http://www.gestiopolis.com>.
- [24] C. Monereo, M. Castelló, M. Clariana, M. Palma, & M. L. Pérez, “Estrategias de enseñanza y aprendizaje,” Editor. Grao, Barcelona, Vol 1, pp. 1–185, 1997.
- [25] P. C. Wankat & F. S. Oreovicz, *Teaching engineering*. McGraw-Hill New York, 1993.
- [26] L. A. Godoy, “Una revisión del programa de investigación sobre aprendizaje activo en un ambiente simulado desde la perspectiva de la educación en ingeniería,” *Latin American and Caribbean Journal on Engineering Education*, vol. 3 (2), 2013.
- [27] R. Schank, “Aprendizaje Virtual: Un enfoque revolucionario para formar equipos de trabajo altamente capacitados.” México DF, McGraw-Hill, 1997.
- [28] R. C. Schank & C. Cleary, *Engines for education*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc, 1995, p. Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associate.
- [29] C.M. Zapata-Jaramillo, G. Awad-Aubad, “Requirements Game: Teaching Software Project Management,” *CLEI Electronic Journal*, vol. 10 (1), 2007.
- [30] C. M. Zapata-Jaramillo, S. M. Villegas, & F. Arango, “Reglas de consistencia entre modelos de requisitos de UN-Metodo,” *Revista Universidad Eafit*, Vol. 42 (141), pp. 40–59, 2012.
- [31] C. M. Zapata-Jaramillo, A. Gelbukh, F. Arango, A. Hernández, & J. L. Zechinelli, “UN-Lencep: Obtención automática de diagramas UML a partir de un lenguaje controlado,” *Avances en la Ciencia de la Computación*, pp. 254–259, 2006.
- [32] C. M. Zapata-Jaramillo & F. Arango, “Alineación entre metas organizacionales y elicitación de requisitos del software,” *Dyna*, vol. 143, pp. 101–110, 2004.
- [33] F. La Ruiz, “Enseñanza de la Ingeniería del Software en el marco del Espacio Europeo de Educación Superior,” Ponencia en el II Congreso Español de Informática (CEDI), 2007, pp. 1–20.
- [34] R. Anaya, “Una visión de la enseñanza de la ingeniería de software como apoyo al mejoramiento de las empresas de software,” *Revista Universidad Eafit*, vol. 42 (141), pp. 60–76, 2012.
- [35] P. Marqués, “Metodología para la elaboración de software educativo,” Barcelona (España). Editor. Estel, 1995.
- [36] J. E. Labra-Gayo, D. Fernández-Lanvin, J. Calvo-Salvador, & A. Cernuda-del-Río, “Una experiencia de aprendizaje basado en proyectos utilizando herramientas colaborativas de desarrollo de software libre.” XII Jornadas de Enseñanza Universitaria de la Informática, Disponible en: <http://di002.edv.uniovi.es/~labra/FTP/Papers/LabraJenui06.pdf>, 2006.
- [37] I. Guitart, M. E. Rodríguez, J. Cabot, & M. Serra, “Elección del modelo de evaluación: caso práctico para asignaturas de ingeniería del software,” *Actas las XII Jornadas Enseñanza Univ. Informática*, Jenui, pp. 191–198, 2006. Disponible en: [http://bioinfo.uib.es/~joemiro/aenui/procJenui/Jen2006/prDef0035\\_96a3be3cf2.pdf](http://bioinfo.uib.es/~joemiro/aenui/procJenui/Jen2006/prDef0035_96a3be3cf2.pdf)
- [38] S. I. Mariño, M. V. López, & M. F. Golobisky, “Un software interactivo orientado a la enseñanza del Método de Programación por Camino Crítico,” VII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación, 2001.
- [39] K. E. Kendall & J. E. Kendall, *Análisis y diseño de sistemas*, Prentice Hall & Pearson Educación, México DF, 2005, 714p.
- [40] J. L. Whitten, V. M. Barlow & L. Bentley, *Systems analysis and design methods*. McGraw-Hill Professional, 1997.
- [41] D. Buckingham, “Educación en medios,” *Alfabetización, Aprendizaje y Cultura*, vol. 1, pp. 1–331, 2005.
- [42] S. W. M. Overmars & K. Poels, “Singlemedium-versus multimedia campaigns: exposure effects on implicit versus explicit memory, brand attitude and purchase intention,” *Tijdschr. VOOR Commun.*, vol. 41 (2), 104p. 2013.
- [43] M. G. Díaz-Antón, M. Pérez, A. Grimmán, & L. Mendoza, “Propuesta de una metodología de desarrollo de software educativo bajo un enfoque de calidad sistémica,” *Univ. Simón Bolívar, Caracas, Venez.*, vol. 1, 2006.

- [44] C. M. Zapata-Jaramillo & M. Duarte, "El juego de la consistencia: una estrategia didáctica para la Ingeniería de Software," *Revista Técnica Ingeniería de la Universidad del Zulia*, Vol. 31 (1), pp. 1–10, 2008.
- [45] B. Boehm, "A view of 20th and 21st century software engineering," in *Proceedings of the 28th international conference on Software engineering*, 2006, pp. 12–29.
- [46] R. E. Fairley, "Educational issues in software engineering," in *Proceedings of the 1978 annual conference*, 1978, pp. 58–62.
- [47] G. González-Calderón, C. M. Zapata-Jaramillo & R. A. Manjarres-Betancur, "Un juego para la enseñanza de métodos de desarrollo de software" *Undécima Conferencia Iberoamericana en Sistemas, Cibernética e Informática: CISCI 2012 Sistemas, Cibernética E Informática. Memorias Volumen I, International Institute Of Informatics And Systemics*, p.67 - 72 , 2012.
- [48] G. Taran, "Using games in software engineering education to teach risk management," in *Software Engineering Education & Training*, 2007. CSEET'07. 20th Conference on, 2007, pp. 211–220.
- [49] R. Cano, D. Astrid, et al., "Una propuesta de juego no tecnológico para la enseñanza de puntos de vista en el desarrollo de software," *Tesis de Grado en Ingeniería de Sistemas*, Universidad Nacional de Colombia, Medellín (Colombia), 2009.
- [50] Anónimo, "Origami," 2013. Disponible en: <http://en.origami-club.com/>
- [51] M. Callejas-Cuervo, L. Y. Castillo-Estupiñán, & R. M. Fernández-Álvarez, "Heler: Una herramienta para la ingeniería de requisitos automatizada", *Entramado* (ISSN 1900-3803), Vol. 6 (2), pp. 184-200, 2010
- [52] C. M. Zapata & N. Carmona, "Un modelo de diálogo para la educación de requisitos de software," *Dyna*, vol. 164, pp. 209–219, 2010.
- [53] C. M. Zapata & G. Giraldo, "El juego del diálogo de educación de requisitos", *Revista de Avances en Sistemas e Informática*, vol. 6 (1), pp. 105–113, 2009.
- [54] E. Monsalve, V. Werneck, & J. Leite, "Evolución de un Juego Educativo de Ingeniería de Software a través de Técnicas de Elicitación de Requisitos," in *Proceedings of XIII Workshop on Requirements Engineering (WER'2010)*, Cuenca, Ecuador, 2010, pp. 12–23.
- [55] E. Monsalve, V. Werneck, & J. Leite, "Evolución de un Juego Educativo de Ingeniería de Software a través de Técnicas de Elicitación de Requisitos," *Proceedings of XIII Workshop on Requirements Engineering (WER'2010)*, Cuenca, Ecuador, 2010, pp. 12–23.
- [56] M. S. Tabares, "UNA REVISIÓN DE MODELOS Y SEMÁNTICAS PARA LA TRAZABILIDAD DE REQUISITOS," *Revista EIA* (ISSN 1794–1237), Número 6, p. 33–42, 2006.
- [57] A. Oliveros, J. A. Zuñiga, R. Wehbe, S. del V. Rojo, & F. Sardi, "Enseñanza de elicitación de requerimientos," *XVIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, 2012.
- [58] A. Bandura & D. C. McClelland, "Social learning theory," *Gen. Learn. Corp. Libr. Congr. Cat. Card Number 75-170398*, vol. 1, 1977.
- [59] Á. M. C. González, P L. González, P M. Gómez, "Diseño y aplicación de juegos para la enseñanza de ingeniería de software a nivel de pregrado en la Universidad de Medellín," "WEEF 2013 - Innovación en Investig. y Educ. en Ing. factores claves para la Compet. Glob.", 2013.
- [60] A. Baker, E. Oh Navarro, & A. Van Der Hoek, "An experimental card game for teaching software engineering processes," *Journal of System Software*, vol. 75 (1), pp. 3–16, 2005.
- [61] C. M. Zapata & N. Carmona, "A Dialog Model For Software Requirements Elicitation," *DYNA*, vol. 77 (164), pp. 209–219, 2010.
- [62] C. M. Zapata, G. G. Calderón, & D. Rivera, "PoV-game: puntos de vista mediante juegos," *Revista de Ingeniería Universidad de Medellín*, vol. 11, no. 20, pp. 115–126, 2012.

## SEGURIDAD ENERGÉTICA Y PROTECCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS

### ENERGY SECURITY AND CRITICAL INFRASTRUCTURE PROTECTION

**Gabriel Jaime Correa-Henao, PhD**

*Facultad de Ingenierías  
Fundación Universitaria Luis Amigó  
Medellín, Colombia  
gabriel.correahe@amigo.edu.co*

**José María Yusta-Loyo, PhD**

*Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad de Zaragoza  
Zaragoza, España  
jmyusta@unizar.es*

(Recibido el 20-05-2013 Aprobado el 21-06-2013)

**Resumen.** En los últimos años se ha intensificado la preocupación de todos los países y gobiernos por la seguridad del abastecimiento energético, y particularmente por la protección de las infraestructuras críticas para el suministro de energía. A los marcos de referencia internacionales de la Directiva 2008/114/CE de la UE y el Plan Nacional de Protección de Infraestructuras de EEUU de 2009, se suma en España la reciente aprobación de la Ley 8/2011 y del Real Decreto 704/2011 sobre identificación y protección de infraestructuras críticas.

En este artículo se muestran, en el marco de estas referencias, distintas estrategias internacionales de organización de la protección de infraestructuras. También se propone un marco conceptual para la identificación de amenazas en infraestructuras eléctricas mediante mapas de riesgos interconectados.

**Palabras Clave:** Seguridad, riesgos, energía, infraestructuras.

**Abstract.** In recent years, concerns on energy supply security have raised up for many countries and governments, and particularly on energy critical infrastructure protection. The international frameworks of the EU Directive 2008/114/EC and the U.S. National Infrastructure Protection Plan since 2009, is now accompanied by the recent approval in Spain of Act 8/2011 and Royal Decree 704/2011 on the identification and protection of critical infrastructures.

In this article, on behalf of such references, different international strategies for infrastructure protection management are shown. A conceptual framework for risks identification in electric infrastructure through interconnected risk maps is also proposed.

**Keywords:** Security, risk, energy, infrastructure.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los gobiernos consideran la seguridad del abastecimiento como uno de los principales objetivos de su política energética. No es difícil encontrar en los últimos años esfuerzos institucionales en muchos países del mundo enfocados en el análisis de su seguridad energética desde diferentes puntos de vista, así como en la necesidad de mejorar su protección, con el ánimo de garantizar la seguridad nacional, la actividad económica, la salud pública, entre otros asuntos.

En el marco de esta definición, se hace evidente la estrecha relación entre la seguridad global de la infraestructura energética con los otros sectores de infraestructuras críticas de la economía y de estos con la sociedad. La infraestructura crítica constituye el sistema nervioso central de la economía en una nación. No es posible alcanzar las metas de sostenibilidad energética, los objetivos económicos, ni el desarrollo social, si se manifiestan vulnerabilidades y riesgos en redes de infraestructura como las del transporte, comunicaciones y energía.

Tanto la Comisión Europea como el Departamento de Seguridad Nacional de los Estados Unidos de América y otros, han desarrollado una preocupación creciente en los últimos años sobre la seguridad de sus infraestructuras, a consecuencia de las nuevas amenazas internacionales. Como resultado, en el año 2005 se publicó en Bruselas el Libro Verde “Programa Europeo para la Protección de Infraestructuras Críticas” [1]. Posteriormente, la Comisión Europea aprobó la Directiva 2008/114/CE del Consejo, de 8 de diciembre de 2008, sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas y la evaluación de la necesidad de mejorar su protección, mediante la cual se puso en marcha el Programa Europeo para la Protección de Infraestructura (PEPIC) [2]. Por su parte, en 2009 se publicó y se puso en marcha el Plan Nacional de Protección de Infraestructuras de Estados Unidos (NIPP) [3]. En el caso particular de España, mediante la Ley 8/2011 [4] se legisla el cumplimiento de la Directiva 2008/114/CE y se delega en el Centro Nacional para la Protección de las Infraestructuras Críticas (CNPIC) la coordinación y supervisión de los planes y agentes involucrados en la protección de las infraestructuras críticas nacionales y transnacionales.

Entre las infraestructuras objeto de análisis y protección, las redes energéticas ocupan un papel principal

en todos los instrumentos de seguridad citados, dado que la energía es el motor económico que sustenta la actual sociedad moderna. Para lograr el objetivo de proteger la infraestructura energética crítica en cualquier país es preciso involucrar todos los componentes de esta en un programa completo de gestión de riesgos, que se inicia con un análisis de vulnerabilidades y evaluación de riesgos, y se completa con la aplicación de medidas de mitigación de amenazas.

Precisamente el interés estratégico asociado a la seguridad energética de las naciones constituye la motivación de este artículo, en el que se presenta una metodología cualitativa para la identificación de amenazas a la seguridad de la infraestructura eléctrica. Además, se contribuye a la discusión sobre las diferentes definiciones y enfoques sobre los conceptos de seguridad energética, infraestructura crítica y recursos clave. Se presenta también una revisión exhaustiva sobre experiencias internacionales, entre las que se destacan los programas europeos de protección de infraestructura (PEPIC) y el programa implementado actualmente por el gobierno de los EEUU (NIPP), que constituyen la referencia internacional en la protección de infraestructuras críticas. Se realiza además la presentación del nuevo marco legal en España, incluyendo una breve descripción de la Ley 8/2011, del Real Decreto 704/2011 y del organismo encargado de coordinar los planes españoles, el CNPIC.

## 2. SEGURIDAD ENERGÉTICA Y PROTECCIÓN DE INFRAESTRUCTURA CRÍTICA

La literatura relacionada con el aseguramiento energético es extensa y basada en gran parte en fuentes abiertas. Una revisión de las publicaciones especializadas proporciona información que relaciona la definición de “seguridad del abastecimiento energético” con áreas como: indicadores y estado del arte sobre el suministro energético, diversificación de fuentes energéticas, técnicas para toma de decisiones, infraestructura crítica y recursos clave, geopolítica y pensamiento militar, entre otras.

El concepto de suministro energético abarca diferentes enfoques, que además pueden ser analizados en diversos escenarios. Así, la definición clásica de “seguridad del suministro energético” basada en la provisión de suficiente cantidad de energía a precio asequible, necesita de la incorporación en los tiempos actuales de un nuevo mapa conceptual, que incluya

estabilidad de los precios, diversificación de fuentes energéticas, economía de las inversiones, seguridad física de las infraestructuras, reservas y almacenamiento, equilibrio político y poder militar, eficiencia energética, mercados, sostenibilidad, entre otros [5].

Tradicionalmente el enfoque de la seguridad energética se ha concentrado sobre todo en los accidentes y en los desastres naturales. A partir del 11 de septiembre 2001, las autoridades y también la industria han tenido que considerar la amenaza de un daño intencional en un grado mucho mayor que antes [6]. Como consecuencia de las nuevas amenazas, la visión sobre la seguridad energética en el actual contexto geopolítico internacional se relaciona directamente con las estrategias de defensa nacional y de estabilidad económica, vinculadas al funcionamiento de determinadas infraestructuras.

Entre los enfoques más recientes de la “seguridad del suministro energético” se encuentran aquellos relacionados con la vulnerabilidad de infraestructuras críticas [7], un término que está recibiendo cada vez más atención, y que concuerda con las definiciones establecidas tanto por la Comisión Europea en el Libro Verde [1] y en la Directiva 2008/114/CE [2], como por el gobierno de Estados Unidos en su programa de seguridad de infraestructuras [3], [8]. El término de infraestructura crítica es definido como aquel elemento, sistema o parte de este, situado en un Estado, y que es esencial para el mantenimiento de funciones sociales vitales, la salud, la integridad física, la seguridad, y el bienestar social y económico de la población, y cuya perturbación o destrucción afectaría gravemente a un Estado al no poder mantener esas funciones.

La literatura en general coincide en definir al sistema energético de un país como una red interconectada y compleja. La interrupción en una parte de la infraestructura puede causar perturbaciones en otras partes del sistema [9].

La Figura 1 esquematiza, a modo de ejemplo, cuán entrelazados con la infraestructura energética de una nación se encuentran los recursos clave y los servicios de distribución de gas o telecomunicaciones [10], indispensables para mantener el desarrollo y funcionamiento de los sistemas que mueven la actividad de un país.

En consecuencia, los gobiernos, entidades reguladoras y expertos de la industria han enfocado su aten-

ción en el estudio de las vulnerabilidades del sistema de suministro energético, ante ataques intencionales, accidentes o desastres naturales [11]. La identificación de las amenazas debidas a la acción de personas malintencionadas requiere procedimientos distintos a las de fenómenos naturales (huracanes, terremotos, olas de frío, incendios y otros desastres).

Evidentemente el tema de la seguridad energética se contempla como uno de los asuntos de mayor importancia en las políticas nacionales. Los gobiernos tienen un papel esencial en la protección de las infraestructuras, así como en la prevención y gestión de crisis relacionadas con el suministro energético, tanto si se trata de infraestructuras gestionadas directamente por el Estado, bien si están en manos de empresas privadas [7].

En los países de la OCDE, la gran mayoría de los activos relacionados con los sistemas de infraestructura crítica son propiedad de organizaciones privadas. Cerca del 80% de estas son operadas directamente por empresas privadas, en el caso del suministro de energía eléctrica [12]. Algunas excepciones las constituyen el suministro de agua, las instalaciones gubernamentales o los servicios de emergencias, propiedad habitualmente de los estados o de entidades mixtas.

### 3. PLANES DE PROTECCIÓN DE INFRAESTRUCTURA

El concepto de infraestructura crítica abarca a todos aquellos activos que son tan vitales para cualquier Estado, que su destrucción o degradación tendría un efecto debilitante sobre las funciones esenciales del gobierno, la seguridad nacional, la economía nacional, o la salud pública [13]. La interrupción de un solo sector de la infraestructura crítica, a causa de ataques terroristas, desastres naturales o daños provocados por el hombre, es probable que tuviera efectos en cascada sobre otros sectores [14].

Los enfoques que los gobiernos y las organizaciones internacionales realizan sobre la protección de infraestructuras no son siempre coincidentes. Las abundantes fuentes de información disponibles demuestran que los países en Norteamérica, en América Latina, la Unión Europea y Australia/Nueva Zelanda son aquellos donde se han realizado mayores avances en la planificación de la protección de las infraestructuras críticas.

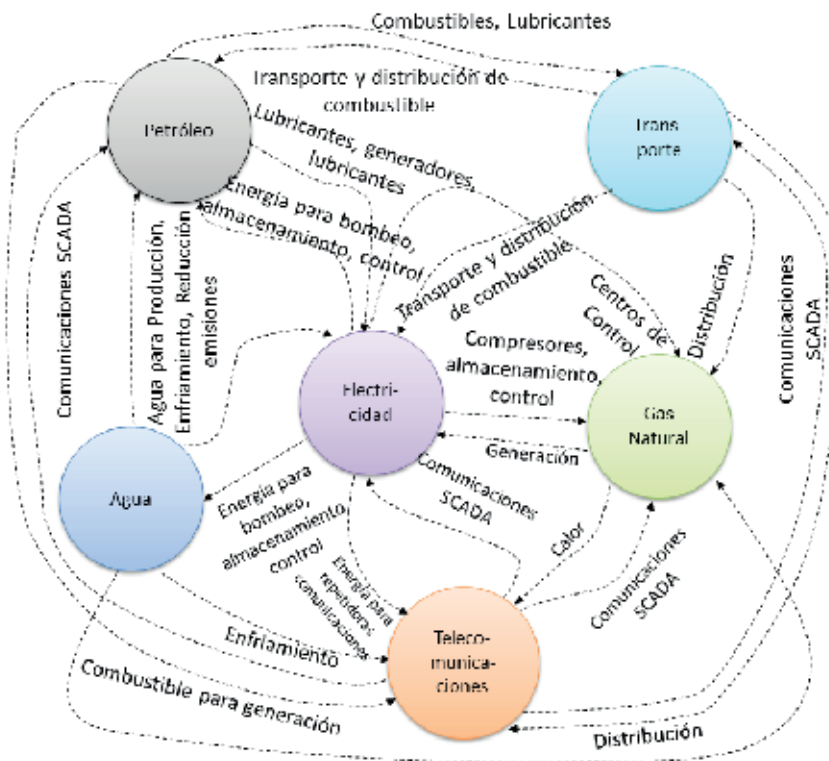


Figura 1: Ejemplo de interdependencia entre el sistema energético y otras infraestructuras críticas

**Según el USA Patriot Act de 2001:** las infraestructuras críticas están compuestas por aquellos sistemas y sus activos, ya sean físicos o virtuales, tan vitales para los Estados Unidos que la inhabilitación o la destrucción de estos sistemas y sus activos tienen un alto impacto en la seguridad económica nacional, en la salud pública, en la seguridad nacional, o en cualquier combinación de estas cuestiones [15].

**Según la Directiva 2008/114/CE de la Unión Europea:** las infraestructuras críticas se definen como todo elemento, sistema o parte de este situado en los Estados miembros que es esencial para el mantenimiento de funciones sociales vitales, la salud, la integridad física, la seguridad, y el bienestar social y económico de la población y cuya perturbación o destrucción afectaría gravemente a un Estado miembro al no poder mantener esas funciones [2].

**De acuerdo con la Ley Española 8/2011 sobre protección de infraestructuras críticas:** están constituidas por aquellas instalaciones, redes, sistemas y equipos físicos y de tecnología de la información sobre las que descansa la operación de los servicios públicos esenciales, cuyo funcionamiento

es indispensable y no permite soluciones alternativas, por lo que su interrupción o destrucción tendría un grave impacto sobre los servicios públicos esenciales, los cuales a su vez son requeridos para el mantenimiento de las funciones sociales básicas, la salud, la seguridad, el bienestar social y económico de los ciudadanos, o el eficaz funcionamiento de las Instituciones del Estado y de las Administraciones Públicas [4, 16].

A pesar de que a finales de los años 90 se identificó la posibilidad de un ataque cibernético a infraestructuras clave, solo a partir del 11-S se encontró la necesidad urgente de definir estrategias e iniciativas concretas de seguridad. Los acontecimientos de principios del siglo XXI, que afectaron notablemente a la opinión pública, en EEUU y en la Unión Europea, con motivo de los atentados terroristas en Nueva York (11 de septiembre de 2001), en Madrid (11 de marzo de 2004) y Londres (7 de julio de 2005), pusieron de manifiesto el riesgo de atentado terrorista contra las infraestructuras. En todos los casos, los gobiernos de EEUU y de la UE coinciden en que la respuesta debe ser rápida, coordinada y eficaz ante las nuevas amenazas [17].

Tanto los países que conforman la Unión Europea, como los Estados Unidos de América, constituyeron comités y mesas de trabajo sobre prevención, preparación y respuesta a los ataques terroristas, y como resultado, en el año 2005 se publicó en Bruselas el Libro Verde “Sobre un Programa Europeo para la Protección de Infraestructuras Críticas” [1]. Posteriormente, en diciembre de 2008 la Comisión Europea aprobó la directiva 2008/114 [2]. Por su parte, en los EEUU se aprobó en 2009 el Plan Nacional de Protección de Infraestructuras [3].

Estos programas proporcionan tanto a los gobiernos como al sector privado la oportunidad de aprovechar la experiencia colectiva para definir más claramente los sistemas de alertas en infraestructuras críticas, su protección, la planificación, así como las actividades de continuidad y fiabilidad de estas infraestructuras. Dichos programas de protección de infraestructura se concentran en los sectores de energía, transportes, tecnologías de la información y comunicaciones.

### 3.1 NIPP: PROGRAMA DE PROTECCION DE INFRAESTRUCTURAS DE ESTADOS UNIDOS

El NIPP (National Infrastructure Protection Plan) es un plan para las infraestructuras esenciales en Estados Unidos que proporciona un marco global y unificado para la protección de Infraestructuras Críticas y Recursos Claves (IC/RC), a través de entidades federales, estatales, locales y el sector privado [18], incluidos los sectores específicos, el Estado, y los socios del sector privado en materia de seguridad.

En el NIPP se identificaron tres áreas específicas de interés: las interdependencias entre los sectores, la seguridad cibernética, y el carácter internacional de las amenazas sobre las infraestructuras críticas [9].

El marco de gestión de riesgos, el NIPP define seis etapas bien diferenciadas: establecimiento de objetivos de seguridad; identificación de activos, sistemas, redes y funciones; evaluación del riesgo; priorización de acciones; ejecución de programas de protección; y medición de la efectividad. Adicionalmente, se proporciona un marco de retroalimentación y de mejora continua, flexible y adaptable a las situaciones de riesgo de cada sector. El esquema de este plan se presenta en la Figura 2.

Desde la perspectiva de cada sector de actividad, y dentro de la gestión de riesgos, en la etapa del **establecimiento de los objetivos de seguridad** se de-

fine la posición que se desea alcanzar en materia de seguridad. La pérdida de vidas, el impacto económico o en la seguridad nacional deben considerarse en el momento de formular los objetivos de seguridad.

La **identificación de recursos, sistemas, redes y funciones** consiste en la elaboración de un inventario completo que contenga información básica sobre estos asuntos en el país, y que pueda utilizarse para determinar los recursos, sistemas o redes que se clasifiquen como “críticos” en el ámbito nacional, estatal o local de acuerdo al perfil de riesgo más reciente.

En la etapa de **evaluación de riesgos** se deben emplear metodologías verosímiles de valoración, de manera que se ofrezcan resultados razonablemente completos mediante un proceso cuantitativo, sistemático y riguroso.

Para la etapa de **priorización de acciones**, el NIPP propone trabajar con los socios en materia de seguridad y establecer prioridades a partir de las evaluaciones de riesgo. De esta manera, se identifica dónde es más apremiante la reducción del riesgo y se determinan las medidas de protección. Este punto requiere una comparación de los niveles relativos de riesgo de los sectores y recursos disponibles, junto con las opciones para lograr los objetivos de seguridad establecidos. Las medidas de protección se aplican donde sea posible reducir el riesgo, resultando en una mejor relación coste-beneficio.

En la etapa de **implementación de los programas de protección**, las medidas de protección están dirigidas a reducir el riesgo mediante la detección de posibles atentados, reducción del atractivo de los recursos, sistemas o redes, mitigación de la gama de posibles atentados o atención para una recuperación eficaz de los servicios afectados.

Finalmente, la etapa de **medición de la efectividad** se establece a partir de un sistema de indicadores para aportar información sobre el logro de objetivos específicos de seguridad, definidos en [3].

Los indicadores ofrecen una base para establecer la responsabilidad de los agentes participantes, documentar los procesos de análisis desarrollados, facilitar diagnósticos, promover una gestión eficaz y reexaminar metas y objetivos en el ámbito nacional y local.



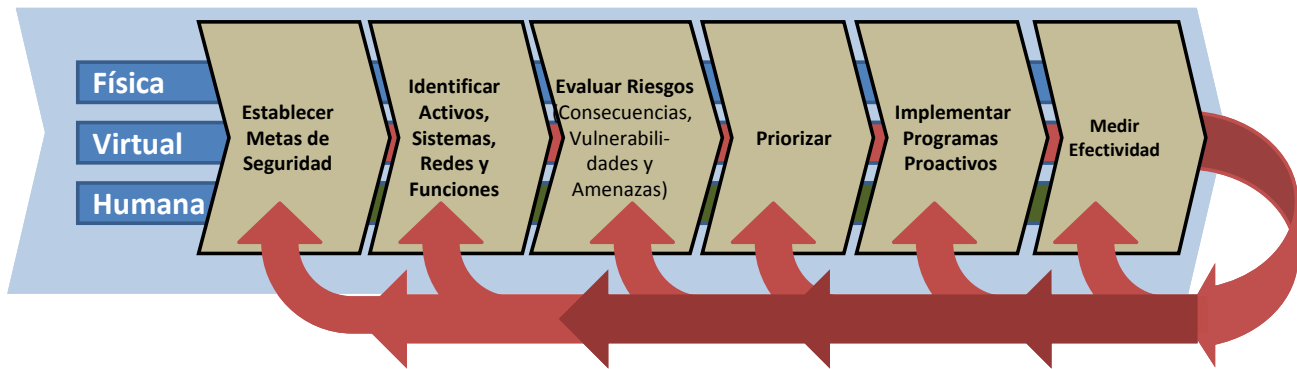


Figura 2: Marco de mejora continua para la protección de Infraestructuras Críticas y Recursos Clave [3].

### 3.2 PEPIC: PROGRAMA EUROPEO PARA LA PROTECCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS

El objetivo general del PEPIC es mejorar la protección de las infraestructuras críticas de la Unión Europea. Este objetivo se alcanzará mediante la aplicación de la legislación europea presentada en las directivas y recomendaciones de la Comisión Europea [19]. El marco legislativo del PEPIC consta de los siguientes elementos [20]:

- Un procedimiento de identificación y designación de las infraestructuras críticas europeas y un enfoque común para evaluar la necesidad de mejorar su seguridad.
- Medidas destinadas a facilitar la aplicación del PEPIC, entre las que figuran un plan de acción, una red de alerta relativa a las infraestructuras críticas (CIWIN), la creación de grupos de expertos de protección de las infraestructuras críticas, procedimientos para compartir información acerca de las infraestructuras, definición y análisis de interdependencias.
- Ayuda a los Estados miembros, a petición de estos, en cuanto a la seguridad de las infraestructuras críticas nacionales y el diseño de planes de intervención.
- Medidas financieras complementarias y, en particular, el programa específico “Prevención, preparación y gestión de las consecuencias del terrorismo y de otros riesgos en materia de seguridad” para el período 2007-2013, que facilitará nuevos medios de financiación de medidas relacionadas con la protección de infraestructuras críticas.

Tanto el programa de Estados Unidos (NIPP) como el de la Unión Europea (PEPIC) definen las áreas críticas en las que deben centrarse los esfuerzos para la prevención y la protección de las infraestructuras. La Tabla 1 resume el listado de infraestructuras críticas definidas por cada uno de ambos programas.

La visión presentada por el NIPP es más amplia, dado que abarca una mayor cifra de sectores en los que se identifican infraestructuras críticas. Aunque la aproximación inicial realizada por la Comisión Europea en el Libro Verde [1] apuntaba inicialmente a cubrir un buen número de infraestructuras distintas, finalmente la Directiva 2008/114 [2] se enfocó básicamente en los sectores de energía y transporte.

### 3.3 OTRAS EXPERIENCIAS INTERNACIONALES

En casi todos los países existen objetivos políticos de protección de sus infraestructuras esenciales. En la mayor parte, se han establecido comités y grupos de trabajo, cuyo mandato incluye análisis de escenarios, evaluación de amenazas y establecimiento de sistemas de alerta temprana.

Cada país cuenta con una organización acorde con su cultura. Sin embargo, la mayoría presenta una organización vertical para la protección de sus infraestructuras críticas, que es dirigida desde el más alto nivel del gobierno [21].

**Australia:** la *Estrategia Nacional de Protección de Infraestructura Crítica* provee los principios generales para tal fin, describe las principales tareas y asigna las responsabilidades para su aplicación. La estrategia define, en el caso de este país, a la infraestructura crítica nacional como “aquellas instala-

**Tabla 1: Listado de los Sectores de Infraestructuras Críticas, según los programas del NIPP (EEUU) y de la Directiva 2008/114 de la Unión Europea**

IDENTIFICACIÓN MACROSECTORES (EEUU)	IDENTIFICACIÓN MACROSECTORES (UNIÓN EUROPEA)	
Agricultura y Alimentos	Energía	Electricidad
Banca y Finanzas		Petróleo
Comunicaciones		Gas
Instalaciones militares y de defensa	Transportes	Carreteras
Energía		Ferrocarriles
Tecnologías de la Información		Aviación
Monumentos e Íconos nacionales		Vías navegables interiores
Sistemas de Transporte		Transporte Marítimo y puertos
Agua potable y plantas tratamiento		

ciones físicas, cadenas de proveedores, tecnologías de la información y redes de telecomunicaciones que si fueran destruidas, degradadas o no estuvieran disponibles por un período extenso de tiempo, podrían provocar un impacto significativo en el bienestar social y económico de la nación, o afectar la capacidad de Australia para conducir la defensa nacional y seguridad de la nación” [22].

La Estrategia se diseña a partir de la metodología contenida en el Estándar Australiano AS/NZS 4360:1999, una guía genérica para la implementación del proceso de gestión del riesgo, que comprende el contexto, la identificación, el análisis, la evaluación, el tratamiento, la comunicación y la monitorización de los riesgos en empresas y corporaciones [23]. La estrategia se aplica no solo a todos los niveles del gobierno, sino también a los propietarios y operadores de las infraestructuras.

El principal mecanismo empleado en Australia para el intercambio de información relevante relacionada con la protección de las infraestructuras críticas entre el gobierno y el sector privado es la *Trusted Information Sharing Network for Critical Infrastructure Protection*, establecida en el año 2004 y compuesta por un grupo de analistas de nueve sectores específicos que cubren las áreas de banca y finanzas, comunicaciones, energía, servicios de emergencia, cadenas de alimentos, salud, transporte y lugares de alta concentración de personas.

El Gobierno de Australia juega un papel importante en la protección de las infraestructuras críticas por medio de su agencia *National Infrastructure Information*, en la que están representados los propietarios y operadores de infraestructuras críticas austra-

lianias, a quienes se responsabiliza de asegurar sus activos y aplicar técnicas de gestión de riesgos a sus procesos.

**Canadá:** actualmente se encuentra en desarrollo la *Estrategia de Protección a la Infraestructura Crítica Nacional*, en la que se da gran importancia a la promoción de una gestión integrada del riesgo de las infraestructuras críticas, incluyendo componentes físicos y cibernéticos, aplicados tanto en el sector público como en el privado. Dado que el intercambio de información es un elemento esencial para la protección y aseguramiento de las infraestructuras críticas, se ha propuesto el mecanismo de las Actas de Gestión de Emergencias para facilitar el intercambio de información relativo a emergencias, incluyendo avisos de amenazas, instalaciones vulnerables, planes de continuidad de actividades y demás.

La política de seguridad de Canadá está contenida en el documento *Securing an Open Society: Canada's National Security Policy*. El objetivo de esta política es asegurar que el gobierno está preparado para enfrentar y responder a diversas amenazas de seguridad como actos terroristas, enfermedades infecciosas, desastres naturales, ataques cibernéticos a infraestructura crítica [24]. Por otro lado, la organización *North American Electric Reliability Corporation* (NERC) promueve un programa conjunto de protección de infraestructuras de la red eléctrica de América del Norte (EEUU y Canadá), en el que se establecen normas de obligado cumplimiento, evaluaciones de riesgos, difusión de información crítica mediante alertas a la industria y la sensibilización sobre cuestiones clave de seguridad.

**España:** en el país ibérico se ha puesto en marcha el *Plan Nacional de Protección de Infraestructuras* y se ha constituido el *Centro Nacional de Protección de Infraestructuras Críticas* [25], organismo que tiene como misión principal la coordinación de las actividades de los agentes implicados en la protección de las infraestructuras críticas, tanto en el sector público como el privado, y la elaboración de planes generales de protección, así como planes específicos de cada sector. El CNPIC es el órgano director y coordinador de cuantas actividades relacionadas con la protección de las infraestructuras críticas tiene encomendadas la Secretaría de Estado de Seguridad del Ministerio del Interior, al cual está adscrito.

En coordinación con el CNPIC se ha impulsado también la creación del CCN-CERT, que es un órgano gubernamental con capacidad de respuesta a incidentes de Seguridad de la información del *Centro Criptológico Nacional* (CCN), dependiente del *Centro Nacional de Inteligencia* (CNI). Se constituyó a principios de 2008, estando presente desde entonces en los principales foros internacionales en los que se comparten objetivos, ideas e información sobre la seguridad de forma global [26].

El CNPIC ha orientado claramente sus esfuerzos a la protección de las infraestructuras críticas desde un punto de vista holístico, de acuerdo a la tendencia de integración de la seguridad física con la seguridad cibernética.

Los planes de protección de infraestructura crítica articulan sus políticas a partir de la normativa establecida en la Ley 8/2011 [4] y el Real Decreto 704/2011 [16], que puede ser considerada una de las legislaciones más completas en el ámbito internacional referida a este tema.

**Francia:** la coordinación interministerial en materia de defensa y de seguridad nacional es realizada mediante la *Secretaría General de la Defensa y de la Seguridad Nacional* (Secrétariat General de la Défense Nationale –SGDSN-, [27]), servicio del Primer Ministro que trabaja en estrecha relación con la Presidencia de la República y que asiste al Jefe del Gobierno en el ejercicio de sus responsabilidades en materia de defensa y de seguridad nacionales.

En ese ámbito, la SGDSN asume la secretaría de los consejos de defensa y de las reuniones interministeriales de alto nivel celebradas bajo la presidencia del Jefe de Estado, del Primer Ministro o de sus principales colaboradores.

La SGDSN se ocupa, igualmente, de ciertas funciones permanentes o misiones puntuales, confiadas a los servicios del Primer Ministro en razón de su naturaleza interministerial o de la evolución institucional. Más allá de la permanencia de sus misiones fundamentales, la SGDSN en estos últimos años ha conocido una ampliación sensible de su campo de acción a los retos de seguridad nacional en el sentido más extenso: se sitúa hoy en el punto de convergencia del conjunto de las cuestiones relacionadas con la seguridad interior y exterior de Francia. El SGDSN ha generado el Libro Blanco sobre Defensa y Seguridad Nacional, que es una iniciativa que nace a partir de la Directiva Europea 2008/114. Adicionalmente, se han constituido algunos órganos como el *Centre opérationnel de la sécurité des systèmes d'information* (COSSI) y se ha desarrollado el Plan PIRANET para la prevención y la protección contra ataques informáticos.

**Países Bajos:** el gobierno de los Países Bajos ha constituido el *Centro Nacional de Asesoría sobre Infraestructuras Críticas* (*Nationaal Adviescentrum Vitale Infrastructuur*, [28]), organismo que tiene conocimiento y experiencia en la seguridad de infraestructuras esenciales y el objetivo de compartir estos con empresas privadas y entidades públicas de los sectores involucrados. En los Países Bajos, NAVI ofrece servicios de soporte para análisis de riesgo y asesoría en seguridad, buenas prácticas y contactos internacionales. Adicionalmente, se ha constituido en Holanda el grupo GOVCERT.nl que, tomando la metodología CERT, ha propuesto un conjunto de medidas para proteger la infraestructura crítica de sistemas de información [29].

En Holanda el intercambio de información se realiza en diferentes foros, entre otros en las reuniones periódicas del *National Crisis Centre*. La retroalimentación entre el gobierno y el sector privado es una parte integral de la gestión de riesgo en este país. Existe un acuerdo entre el gobierno y los grandes operadores de infraestructuras críticas, mediante el cual estos últimos se encuentran sometidos a la obligación de informar sobre las interrupciones o fallos que puedan presentar, a partir de ciertos niveles de severidad, los sistemas que administran.

**Países Latinoamericanos:** los gobiernos de los países latinoamericanos han encargado generalmente la protección de las infraestructuras críticas a los operadores de los sistemas y redes. Esta tarea se realiza siempre a través de una fuerte relación con

las autoridades civiles y militares, con el fin de garantizar la protección de los activos y las redes que componen la infraestructura. La mayoría de los planes de protección de infraestructuras críticas en los países latinoamericanos se basan en los marcos de gestión de riesgos conocidos, ya sea el estándar australiano [23] o la norma ISO 31000 [30].

Sin embargo, a partir del año 2008 ha surgido una notable preocupación, especialmente en el área de la seguridad de las redes y sistemas de tecnologías de la información, para cuya protección se opta por seguir los ejemplos y recomendaciones de organizaciones y expertos internacionales (ONU, OEA, OTAN, ITU) para luchar contra ciberataques y contra el cibercrimen [29].

Las políticas para la protección de la infraestructura de información se focalizan en dos aspectos: internet y telecomunicaciones, de conformidad con la metodología CERT/CSIRT (Computer Emergency Response Team) que es un nombre dado a los grupos de expertos que se encargan de incidentes de seguridad informática. El CERT/CSIRT es un término genérico que se refiere a una parte esencial de los centros de coordinación nacionales que involucran a las juntas de gobierno y las empresas en la seguridad cibernética. Los dos sectores no pueden ser separados ya que están íntimamente ligados, y los intereses de los proveedores de internet y telecomunicaciones para operar redes seguras están interrelacionados [31].

Entre las principales iniciativas de los países latinoamericanos se encuentra la organización de grupos de trabajo adscritos a los Ministerios de Defensa, en países como Brasil [32] y Colombia [33], pioneros en la implementación de estrategias contra ataques informáticos. Otros países como Chile, México y Venezuela, se encuentran aún en proceso de análisis y conformación de los CERT gubernamentales.

**Reino Unido:** el gobierno británico ha creado el *Centro de Protección de la Infraestructura Nacional* (*Centre for the Protection of National Infrastructure*, [34]). Dentro de esta iniciativa se presentan nueve sectores de infraestructura crítica –comunicaciones, servicios de emergencia, energía, finanzas, alimentos, gobierno, salud, transporte y agua –y cada uno incluye recursos y servicios que son esenciales en todos los niveles de la sociedad. CPNI es una organización interdepartamental, con recursos de la industria, la academia y una serie de departamen-

tos y organismos oficiales. Entre estos, se incluye el Servicio de Seguridad, el CESG (autoridad técnica nacional del Reino Unido para el aseguramiento de la información) y otros departamentos ministeriales responsables de los sectores de infraestructura nacional.

En general, los programas nacionales de protección de infraestructuras constituyen el marco de referencia, que se complementa con la aplicación de modelos para la gestión de riesgos para los que se emplea tanto la recopilación de datos de los activos, las interrelaciones entre las infraestructuras, así como el uso de enfoques prioritarios para abarcar todos los subsistemas de la cadena de valor.

### 3.4 MARCO LEGAL PARA LA PROTECCIÓN DE INFRAESTRUCTURAS CRÍTICAS EN ESPAÑA

Con la aprobación de la Ley 8/2011 de 28 de abril de 2011, se establecen en España medidas para la protección de las infraestructuras críticas [4], y se da cumplimiento a la transposición a la legislación nacional de la Directiva 2008/114/CE [35]. La Ley crea el Centro Nacional para la Protección de las Infraestructuras Críticas (CNPIC), órgano adscrito al Ministerio del Interior por medio del cual se coordinan y se supervisan las actividades de los agentes implicados en la protección de las infraestructuras críticas, se elaboran los planes generales de protección y los planes específicos de cada sector, fomentando las relaciones entre el sector público y privado y la cooperación internacional, y facilitando el intercambio de información y conocimiento a todos los niveles.

En la Ley se incorporan las definiciones de la Directiva 2008/114/CE, que incluyen la clasificación de activos estratégicos nacionales y transnacionales, los organismos y los sectores estratégicos. La Ley brinda un marco eminentemente organizativo, especialmente en lo concerniente a la composición, competencias y funcionamiento de los órganos e instrumentos que integran el Sistema de Protección de las Infraestructuras Críticas. Los agentes de dicho sistema se indican a continuación [4]:

- La Secretaría de Estado de Seguridad del Ministerio del Interior.
- El Centro Nacional para la Protección de las Infraestructuras Críticas (CNPIC).

- Los Ministerios y organismos integrados en el Sistema, incluidos en el anexo de la Ley.
- Las Comunidades Autónomas y las Ciudades con Estatuto de Autonomía.
- Las Delegaciones del Gobierno en las Comunidades Autónomas y en las Ciudades con Estatuto de Autonomía.
- Las Corporaciones Locales, a través de la asociación de Entidades Locales de mayor implantación a nivel nacional.
- La Comisión Nacional para la Protección de las Infraestructuras Críticas.
- El Grupo de Trabajo Interdepartamental para la Protección de las Infraestructuras Críticas.
- Los operadores críticos del sector público y privado, responsables de las inversiones o del funcionamiento diario de una instalación, red, sistema, o equipo físico o de tecnología de la información.

En desarrollo y ejecución de la mencionada Ley, se aprueba el Reglamento de Protección de las Infraestructuras Críticas mediante Real Decreto 704/2011 del 20 de mayo de 2011, con la finalidad de desplegar los instrumentos de planificación y ejecución de los programas de protección [16]:

**Plan Nacional de Protección de las Infraestructuras Críticas:** elaborado por la Secretaría de Estado de Seguridad, está dirigido a mantener seguras las infraestructuras españolas que proporcionan los servicios esenciales a la sociedad.

**Planes Estratégicos Sectoriales:** son los instrumentos de estudio y planificación con alcance en todo el territorio nacional que permiten conocer cuáles son los servicios esenciales proporcionados a la sociedad, el funcionamiento general de estos, las vulnerabilidades del sistema, las consecuencias potenciales de su inactividad y las medidas estratégicas necesarias para su mantenimiento.

**Planes de Seguridad del Operador:** correspondientes a la documentación en la que se definen las políticas generales de los operadores críticos para garantizar la seguridad del conjunto de instalaciones o sistemas de su propiedad o gestión. Por ejemplo, el principal operador en transporte de electricidad es la empresa Red Eléctrica de España S.A.

**Planes de Protección Específicos:** correspondientes a la documentación donde se definen medidas concretas por los operadores críticos para garantizar la seguridad integral (física y lógica) de sus infraestructuras críticas.

**Planes de Apoyo Operativo:** son aquellas medidas concretas por las Administraciones Públicas en apoyo de los operadores críticos para la mejor protección de las infraestructuras críticas.

Como complemento necesario para el desarrollo eficaz de la legislación y de la estrategia nacional para la protección de las infraestructuras críticas, el CNPIC está diseñando una serie de estándares o líneas de acción, así como guías de “buenas prácticas” para compartir con las empresas estratégicas nacionales. Entre otras, el CNPIC tiene las siguientes obligaciones [25]:

- La custodia, el mantenimiento y actualización del Plan de Seguridad de Infraestructuras Críticas y el Catálogo Nacional de Infraestructuras Estratégicas, que contiene la información completa, actualizada, contrastada e informáticamente sistematizada relativa a las características específicas de cada una de las infraestructuras estratégicas existentes en España.
- La recogida, análisis, integración y valoración de la información procedente de instituciones públicas, servicios policiales, sectores estratégicos, y de la cooperación internacional.
- La valoración de la amenaza y análisis de riesgos sobre las instalaciones estratégicas.
- El diseño y establecimiento de mecanismos de información, comunicación y alerta.
- Soporte de Mando y Control en una Sala de Operaciones, cuya puesta en marcha se prevee ante situaciones de activación del nivel que se determine del Plan de Protección de Infraestructuras Críticas.
- Supervisión de los procesos de elaboración de planes de intervención en materia de infraestructuras críticas y participar en la realización de ejercicios y simulacros.
- Supervisión y coordinación de los planes sectoriales y territoriales de prevención y protección que deban activarse en los diferentes supuestos de riesgo y niveles de seguridad

que se establezcan, tanto por las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad como por los propios responsables de las operadoras.

- La elaboración de protocolos de colaboración con personal, con organismos ajenos al Ministerio del Interior, y con empresas propietarias y gestoras de infraestructuras estratégicas.
- Supervisión de proyectos y estudios de interés en la protección de infraestructuras críticas, así como la coordinación en programas financieros y subvenciones procedentes de la Unión Europea.

El CNPIC es responsable de administrar los sistemas de gestión de la información y comunicaciones que se diseñen en el ámbito de la protección de las infraestructuras críticas; deberá contar para ello con el apoyo y colaboración de los agentes del sistema y de todos aquellos otros organismos o entidades afectados [16]. El CNPIC ha orientado claramente sus esfuerzos a la protección de las infraestructuras críticas desde un punto de vista integrado. En el sector privado, el CNPIC mantiene contactos con los propietarios y operadores de infraestructuras críticas, para lo cual se emplea el sistema de información HERMES como herramienta para mantener comunicación permanente entre todos los actores involucrados en los planes [36].

#### 4. CADENA DE VALOR DE INFRAESTRUCTURAS ELÉCTRICAS

Los riesgos asociados a los sistemas eléctricos no están localizados solamente en la etapa de producción de electricidad; afectan en general a todas las etapas de la cadena de valor: generación, transporte, distribución y comercialización de la electricidad. En la Figura 3 se presenta un esquema de los subsistemas que componen la cadena de valor de los sistemas eléctricos.

Particularmente, la red de transporte de energía eléctrica es la parte de la cadena de valor del sistema de infraestructura eléctrica constituida por los elementos necesarios para llevar hasta los puntos de consumo y a través de grandes distancias la energía eléctrica generada en el subsistema de generación.

Para ello, los niveles de energía eléctrica producidos deben ser transformados, elevándose su nivel de tensión. Un ejemplo del sistema de transporte de

electricidad lo constituye en España el sistema de líneas y subestaciones de 220 y 400 kV, cuyo principal operador es Red Eléctrica de España S.A. [37].

Desde el punto de vista de la infraestructura, la red cuenta con algunos nodos críticos en los cuales el sistema requiere ser suficientemente seguro como para permitir una interrupción controlada en caso de un suceso no previsto. En otras circunstancias, los nodos críticos tienen que ser tan robustos como para garantizar el funcionamiento autónomo durante horas, días, semanas o incluso más tiempo, en caso que se requiera. En consecuencia, el reforzamiento del sistema de infraestructura eléctrica implica la realización de actividades que se extiendan más allá y con mayor profundidad que las acciones tradicionales.

Aunque es indudable la necesidad de proteger la red de mayor escala, es decir, la red de transporte en alta tensión, también requieren cuidado las redes de distribución, que por medio de un extenso conjunto de instalaciones permiten el suministro eléctrico a todos los consumidores. En el caso español, por ejemplo, la red de transporte suma más de 50.000 Km de líneas eléctricas, pero las redes de distribución superan los 500.000 Km [38]. Es importante tener presente que la tarea de protección de estas infraestructuras tan extensas y numerosas debe realizarse en la medida que sea viable técnica y económicamente. Las redes eléctricas siempre han sido vulnerables y quienes precisan el aseguramiento de sus necesidades energéticas por cuestiones estratégicas adoptan habitualmente soluciones basadas en recursos disponibles in-situ [39]. Entre otras, las instalaciones militares se dotan habitualmente de suministros eléctricos alternativos y autónomos que les garanticen respaldo al abastecimiento energético en caso de fallo de la fuente principal de suministro.

El aumento de los requerimientos de seguridad en Europa y Norteamérica coincide también con una época de mejora continua de los servicios públicos, en el que las empresas operadoras están preocupadas por incrementar la fiabilidad de sus actividades de suministro para maximizar su beneficio. Sin embargo, teniendo en cuenta que se trata de una infraestructura tan vasta, es imposible garantizar la seguridad física de las redes eléctricas al 100% [40]. En general, se detecta una alta vulnerabilidad del sistema eléctrico en aquellos nodos de la red donde un fallo pueda propagarse en cascada y causar apagones en una región o en uno o varios países. El

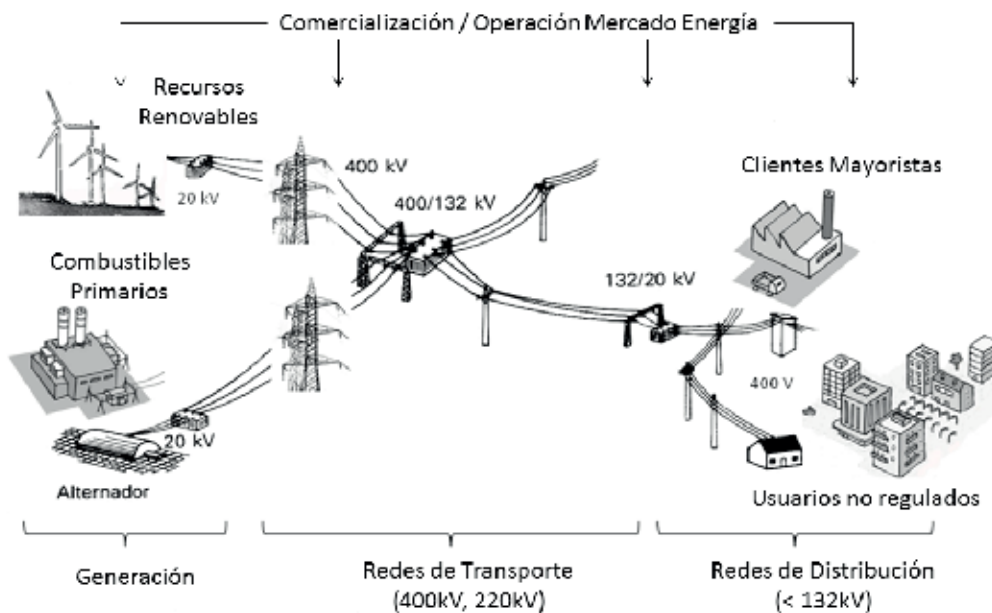


Figura 3: Subsistemas de la cadena de valor del sistema eléctrico

nivel de amenaza, sin embargo, es difícil de valorar, hasta que se alcancen grados mayores de coordinación entre los sectores público y privado involucrados en el sistema eléctrico.

### 5. IDENTIFICACIÓN DE RIESGOS EN INFRAESTRUCTURAS ELÉCTRICAS

La infraestructura energética alimenta la economía en cualquier nación. Sin un suministro de electricidad estable, la salud y el bienestar se ven amenazados y la economía del país no puede funcionar. Esta infraestructura se puede dividir en tres grandes segmentos interrelacionados: electricidad, petróleo y gas natural. El sector eléctrico concentra una importante cantidad de estudios y análisis, dada la alta interdependencia de todos los sectores de actividad con las infraestructuras de suministro de electricidad.

Para el caso concreto de las infraestructuras del sector eléctrico, se pueden emplear los procesos del marco de gestión del riesgo aplicables a las infraestructuras críticas: Identificación de Amenazas, Evaluación de Riesgos, Priorización de Acciones, Implementación de Programas y Medición de Efectividad.

El primer paso consiste en la identificación de riesgos y amenazas al sistema de infraestructura. Constituye la piedra angular de la actuación en la protección de infraestructuras críticas, ya que los criterios para la selección de las posibles amenazas y el análisis detallado de sus componentes de riesgo serán determinantes en la calidad del proceso de gestión de riesgos en infraestructuras. La identificación de riesgos es la etapa fundacional de cualquier proceso de gestión de riesgos, y es previa a la valoración, definición e implementación de acciones para mitigarlos.

En un marco de gestión de riesgos, el proceso de identificación se enfoca en detectar cuáles son las fuentes principales de riesgo [23, 41]. En resumen, el propósito al realizar el proceso de identificación de riesgos se limita a un ejercicio cualitativo, mediante el cual se definen los posibles riesgos en el sistema, y se obtiene un listado completo de riesgos y sus componentes aplicable a la cadena de valor y al ciclo de vida de la red de infraestructura [42].

Una revisión del estado del arte de las herramientas y metodologías para la identificación de riesgos permite concluir que la aplicación sistemática de una metodología debe seleccionar activos críticos, verificar interdependencias e impactos económicos y sociales de los riesgos, desde el punto de vista organizacional, empresarial y gubernamental [21].

La identificación de riesgos por medio de las herramientas y metodologías citadas tiene aplicación en los subsistemas de la cadena de valor de la infraestructura eléctrica, con especial énfasis en la prevención de amenazas sobre los siguientes aspectos:

- Activos, edificios, equipos y sedes de las empresas propietarias/operadoras de la infraestructura eléctrica.
- Plantas de generación eléctrica.
- Redes de transporte y de distribución.
- Interdependencias con otros sectores de infraestructura crítica.
- Nodos críticos de la red eléctrica.
- Regulaciones y políticas que impactan la operación del sistema.
- Impacto sobre la población afectada.

La definición de medidas de protección será una actividad posterior a la identificación y evaluación de las amenazas, su impacto y probabilidad. Estas medidas son elementos de defensa desplegados para que las amenazas no causen daños [36].

Una de las técnicas que permite un enfoque integral más completo del análisis de la vulnerabilidad de un sistema de infraestructura son los **mapas de riesgos** [21, 43]. Esta técnica permite descubrir y analizar las amenazas a las que están expuestas las infraestructuras. A partir del mapa de riesgos se construye el inventario de componentes de riesgos, asociados tanto a la red eléctrica como al entorno de la organización que la gestiona.

Pero, ¿hasta qué punto es factible aplicar la metodología de mapas de riesgos? Tanto el mapa de riesgos, como las componentes, necesitan del conocimiento íntimo de la organización. Existirán riesgos que afecten a toda la cadena de valor, y a cada nivel de la organización. A modo de ejemplo, un modelo de mapa de riesgos se puede aplicar a un activo específico de la red de infraestructura, como puede ser una subestación eléctrica (menor nivel de abstracción, en el ámbito operativo), o a la organización completa (mayor nivel de abstracción, en el ámbito estratégico) [44].

Para la construcción de un mapa de riesgos es indispensable recoger y gestionar gran cantidad de información, lo que a menudo es difícil dada la inexis-

tencia, la inaccesibilidad y la falta de fiabilidad de muchos de los datos necesarios.

El *mapa de riesgo* permite simplificar el número de categorías que agrupan las componentes de riesgo, lo cual implica la identificación de los incidentes tanto internos como externos a un sistema de infraestructura crítica. Se distinguen las siguientes categorías de riesgos, aplicables al sistema de infraestructura crítica [44, 45]:

- **Cumplimiento e Indicadores:** están relacionados con las amenazas provenientes de la expedición de políticas, leyes y regulaciones y su impacto en el desarrollo económico y social de la región o nación en la que se implanta la infraestructura.
- **Activos y Finanzas:** se derivan de la volatilidad de los mercados y de la economía, que pueden afectar el normal funcionamiento y/o la expansión de las redes de infraestructura eléctrica. También se incluyen los riesgos relacionados con la cartera de cobros pendientes, y la imposibilidad de obtener los fondos necesarios para atender el pago de las obligaciones contraídas o para apalancar el crecimiento del sistema de infraestructura eléctrica.
- **Entorno:** riesgos relacionados con aspectos jurídicos, políticos, sociales, fenómenos naturales, entre otros, que afectan las operaciones y el normal funcionamiento de la red de infraestructura eléctrica.
- **Operacionales:** aquellos que afectan los procesos, sistemas, personas y cadena de valor dentro del sistema de infraestructura eléctrica. Pueden corresponder a fallos en la ejecución de actividades, deficiencia o ausencia de procedimientos, y fallos en la gestión del capital humano, tecnológico y administrativo, que afectan el funcionamiento y el crecimiento de la red de infraestructura.
- Además, la conveniencia de indicar el origen técnico o no técnico de un riesgo, permitirá definir posteriores responsabilidades en su tratamiento, según se propone a continuación [5]:
- **Amenazas de tipo técnico.** Incluyen los riesgos financieros y los riesgos operacionales; también, aquellas amenazas ocasionadas como consecuencia de los sistemas, los procedimientos, las decisiones y las actuaciones de personas que puedan afectar al sistema de infraestructura.



- **Amenazas de tipo no-técnico.** Incluyen los riesgos de entorno, los riesgos estratégicos y los riesgos de asignación de recursos; además, aquellos que se materializan como consecuencia de factores ajenos a la red de infraestructura, tales como: fenómenos naturales, situaciones sociopolíticas, acciones de terceros, decisiones de autoridades administrativas, regulatorias, entre otras.

Un riesgo puede afectar una organización, un sistema o un activo. De acuerdo al nivel de abstracción organizacional (desde un nivel estratégico y global, hasta un nivel operativo y de detalle), el mapa de riesgos puede variar, para adaptarse a cada caso.

La elaboración de un mapa de riesgos para infraestructura eléctrica recopila todos los requerimientos establecidos al comienzo del presente artículo. En la figura 7 se muestra un mapa de riesgos genérico, aplicado al sistema de infraestructura crítica del sector eléctrico [44].

En este mapa de riesgos interconectado, el grosor de la línea indica la fuerza de las interconexiones o relación entre los riesgos. Asimismo, la proximidad entre los componentes de los riesgos es mayor cuanto más interconectados se encuentran.

Para efectuar el estudio detallado de cada uno de los riesgos del mapa es preciso realizar la identificación de sus componentes. Aunque el propósito de este artículo se limita al establecimiento de un marco conceptual, es importante anotar que, en términos prácticos, las organizaciones operadoras y/o propietarias de sistemas de infraestructura eléctrica, dentro de su sistema de gestión de riesgo, realizan el desglose en forma de componentes [46-48]. Para el caso particular de los 21 riesgos establecidos para la red de infraestructura eléctrica, se ha determinado un listado de 141 componentes de riesgos, que pueden consultarse en [44, 49].

En el marco de la gestión de riesgos, la propuesta metodológica de identificación con mapas de riesgos tiene aplicabilidad integral en el caso de organizaciones integradas verticalmente (es decir, que la misma empresa desarrolla los negocios de generación, transporte, distribución y comercialización de energía). Si no hay integración vertical, es preferible identificar los riesgos por separado, según afecten cada elemento de la cadena de valor [50].

Es evidente que los riesgos no pueden ser eliminados totalmente, y que algún nivel de riesgo debe ser aceptado por la sociedad, existiendo siempre un balance entre costes y seguridad.

## 6. CONCLUSIONES

La seguridad, la prosperidad económica y bienestar social en cualquier país dependen de un complejo sistema de infraestructuras interdependientes. Particular atención reciben aquellas relacionadas con la infraestructura eléctrica y su cadena de valor, tanto en el ámbito organizacional como de los activos físicos que componen la infraestructura.

Como respuesta a la necesidad de aplicar planes de protección de infraestructura, inspirados en las múltiples iniciativas internacionales de la última década y en la reciente legislación española aprobada en 2011, es preciso iniciar programas de gestión de riesgos que garanticen la aplicabilidad de dichos planes. Un primer paso consiste en la identificación de riesgos y amenazas al sistema de infraestructura, sobre la que se edifique el proceso de protección de infraestructuras críticas.

Para la identificación de amenazas en el sistema eléctrico se sugiere la utilización de la técnica de mapas de riesgos, que permite un análisis integral en el entorno completo de la organización que gestiona las infraestructuras. Un mayor nivel de detalle en esta actividad requiere la determinación de componentes de riesgos, preferiblemente definiendo su categorización (riesgos operacionales, de entorno, financieros e indicadores de calidad y cumplimiento), así como su impacto en la cadena de valor del sistema de infraestructura.

Las actividades que dan continuidad a la identificación de riesgos, como la evaluación y la priorización de acciones, permiten completar el proceso de gestión de riesgos de las infraestructuras, desplegando en última instancia los elementos de defensa para que las amenazas no causen daños.

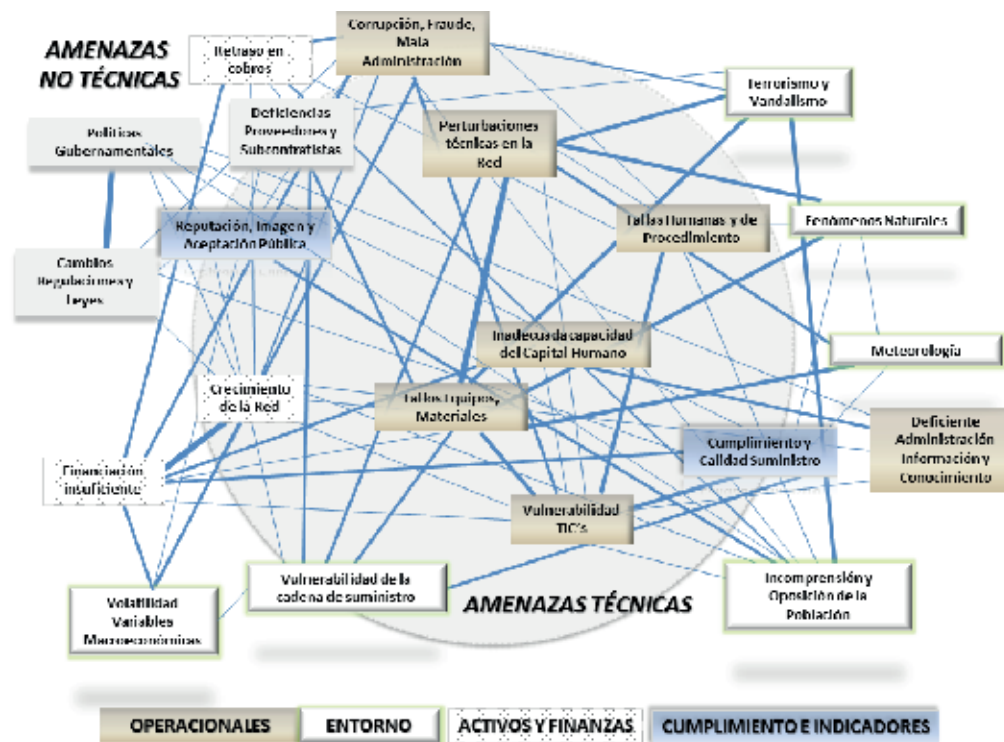


Figura 4: Propuesta de mapa de riesgos e interdependencias aplicado a la red de infraestructura crítica en el sector eléctrico

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1]. Comisión Europea, “Libro Verde: Sobre un Programa Europeo para la Protección de Infraestructuras Críticas”. *Comisión de las Comunidades Europeas*, Bruselas (Bélgica). 2005, 28p. Disponible en: <http://www.proteccioncivil.net/Documentos%20pdf/LIBRO%20VERDE%20SOBRE%20UN%20PROGRAMA%20EUROPEO%20PARA%20LA%20PROTECCI%C3%93N%20DE%20INFRAESTRUCTURAS%20CR%C3%8DTICAS.pdf>

[2]. Consejo Europeo. “Sobre la identificación y designación de infraestructuras críticas europeas y la evaluación de la necesidad de mejorar su protección”, Directiva 114 CE/2008, *Diario Oficial de la Unión Europea*, Bruselas (Bélgica), 2008, 24p. Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:345:0075:0082:ES:PDF>

[3]. NIPP, “National Infrastructure Protection Plan”, Washington DC (USA): *U.S. Department of Home Security*, 2009, 175 p.. Disponible en: <http://www.dhs.gov/publication/nipp-2013-partnering-critical-infrastructure-security-and-resilience>

[4]. BOE, “Ley 8/2011, por la que se establecen medidas para la protección de las infraestructuras críticas.” Madrid (España), *Boletín Oficial del Estado del Reino de España*, 2011, 11p.

[5]. J.M. Yusta, “Amenazas a la seguridad del suministro energético español. Inteligencia y seguridad”. *Revista Inteligencia y Seguridad*, N° 6, 2009, .pp. 223-252.

[6]. Giroux, J. “A Portrait of Complexity: New Actors and Contemporary Challenges in the Global Energy System and the Role of Energy Infrastructure Security”. Capítulo Libro *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, Wiley. Edición 1, pp 33–56. doi: 10.2202/1944-4079.1034

[7]. B. Morel, I. Linkov, D. A. Belluck, R. N. Hull, S. L. Benjamin, J.Alcorn, I. Linkov, “Environmental Security, Critical Infrastructure and Risk Assessment: Definitions and Current Trends,” *Environmental Security and Environmental Management: The Role of Risk Assessment*. Springer Netherlands, vol. 5, pp. 1-16, 2006.

- [8]. US Dept Home Security, "Critical infrastructure and key resources sectors" *U.S. Department of Homeland Security*, 2012. Disponible en: <http://www.dhs.gov/critical-infrastructure-and-key-resources-support-annex>
- [9]. T. Consolini, "Regional security assessments: A strategic approach to securing federal facilities," Tesis Magistral en *Safety Naval Post-graduate School*, Monterrey, CA (USA), 2009, 103p.
- [10]. L. Ness, "Securing Utility and Energy Infrastructures". Wiley Interscience. Washington DC (EEUU), 340p, 2006.
- [11]. E. Michel-Kerjan "New Challenges in Critical Infrastructures: A US Perspective". *Journal of Contingencies and Crisis Management*, Vol. 11, N° 3, p. 132-141, 2003.
- [12]. J.M. Arroyo "Análisis de Vulnerabilidad en Sistemas de Potencia", Artículo de trabajo, 2010, Disponible en: [http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee/arquivos/down\\_materiaiscursos/2008\\_nataliajose/9\\_analisis\\_vulnerabilidad.pdf](http://www.dee.feis.unesp.br/lapsee/arquivos/down_materiaiscursos/2008_nataliajose/9_analisis_vulnerabilidad.pdf)
- [13]. R. Hull, D. Belluck, & Lipchin, C. "A framework for multi-criteria decision making with special reference to critical infrastructure: policy and risk management working group summary and recommendations" Capítulo Libro: *Ecotoxicology, Ecological Risk Assessment and Multiple Stressors*. Springer, pp. 355-370, 2006,
- [14]. A. Löschel, U. Moslener, D. Rübhelke, "Indicators of energy security in industrialised countries", *Energy Policy*, pp. 1665-1672, 2010.
- [15]. US Dept Energy Office, "Energy Infrastructure Risk Management Checklists for Small and Medium Sized Energy Facilities", Washington DC (USA): *U.S. Department of Energy, Office of Energy Assurance*, 26p, 2002.
- [16]. BOE, "Real Decreto 704/2011, por el que se aprueba el Reglamento de protección de las infraestructuras críticas.", Madrid (España), *Boletín Oficial del Estado del Reino de España*, 2011, 18p.
- [17]. CIEP, "Study: EU Energy Supply Security and Geopolitics", Clingendael International Energy Programme, La Haya (Holanda), 2004, 281p. Disponible en: <http://www.clingendaelenergy.com/publications/publication/study-eu-energy-supply-security-and-geopolitics>
- [18]. US Dept Home Security, "Directive 7: Critical Infrastructure Identification, Prioritization, and Protection," U.S. Department of Homeland Security, 2003.
- [19]. V. Costantini, F. Gracceva, A. Markandya, G. Vicini, "Security of energy supply: Comparing scenarios from a European perspective," *Energy Policy*, pp 210-226, 2007.
- [20]. Comisión Europea, "Síntesis de la legislación de la UE: Lucha contra el terrorismo". Comisión de las Comunidades Europeas, Bruselas (Bélgica). 2006, 30p. Disponible en: [http://europa.eu/legislation\\_summaries/justice\\_freedom\\_security/fight\\_against\\_terrorism/l33260\\_es.htm](http://europa.eu/legislation_summaries/justice_freedom_security/fight_against_terrorism/l33260_es.htm).
- [21]. J. M. Yusta, G. J. Correa, and R. Lacal-Arán-tegui, "Methodologies and applications for critical infrastructure protection: State-of-the-art," *Energy Policy*, vol. 39, pp. pp. 6100-6119, 2011.
- [22]. CSIRO, Informatics and Statistics, "CIPMA: Critical Infrastructure Protection Modeling and Analysis." Clayton (Australia): CSIRO Mathematics, Informatics and Statistics, 2008. Disponible en: <http://www.csiro.au/partnerships/CIPMA.html>.
- [23]. AS/NZS, "Estándar Australiano de Administración del Riesgo," AS/NZS 4360, 1999, 36 p.
- [24]. H. M. Abdur Rahman, "Modelling and Simulation of Interdependencies between the Communication and Information Technology Infrastructure and other Critical Infrastructures," Tesis Doctoral en: *Electrical and Computer Engineering*, University of British Columbia, Vancouver (Canadá), 2009, 163p.
- [25]. CNPIC, "Centro Nacional de Protección de Infraestructuras Críticas en España.", Madrid (España), 2010. Disponible en: <http://www.cnpic-es.es/cnpic>
- [26]. CCN-CERT, "Centro de Incidentes del Centro Seguridad de la Información del Centro Criptológico Nacional", Madrid (España), 2011.
- [27]. CCN-CERT, "Centro de Incidentes del Centro Seguridad de la Información del Centro Criptológico Nacional", Madrid (Spain), 2011. Disponible en: [www.sgdn.gouv.fr](http://www.sgdn.gouv.fr)
- [28]. NAVI, "Nationaal Adviescentrum Vitale Infrastructuur.", Amsterdam (Holanda), 2011: Disponible en: <http://www.navi-online.nl>

- [29]. A. Zielstra, "GOVCERT: Cybercrime Information Exchange. in Cybersecurity and Critical Infrastructure Protection". 2010. Madrid (España). Disponible en: <http://www.cipre-expo.com/speakers/annemarie-zielstra>
- [30]. ISO, "Norma ISO 31000, para la Gestión de Riesgos.", International Standard Organization, Geneve (Switzerland), 2010. Disponible en: [http://www.iso.org/iso/iso\\_catalogue/catalogue\\_tc/catalogue\\_detail.htm?csnumber=43170](http://www.iso.org/iso/iso_catalogue/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=43170)
- [31]. Alberts, C., et al., "CERT/CSIRT: Computer Security Incident Response Team", *Carnegie Mellon University*: Pittsburgh, PA (EEUU), 2004. Disponible en: <http://www.cert.org/resilience/publications/index.cfm>
- [32]. CERT.br, "Centro de Estudos, Resposta e Tratamento de Incidentes de Segurança no Brasil", Brasilia (Brasil), 2011. Disponible en: [www.cert.br](http://www.cert.br)
- [33]. CERT-CCIT, "Centro de Coordinación Informática Colombia.", Bogotá (Colombia), 2011. Disponible en: [www.cert.org.co](http://www.cert.org.co)
- [34]. CPNI, "Centre for the Protection of National Infrastructure" Londres (Reino Unido), 2011. Disponible en: [www.cpni.gov.uk](http://www.cpni.gov.uk)
- [35]. European Commission, "European Network and Information Security Agency", *Official Journal of the European Communities*, Bruselas (Bélgica), 2005, 12
- [36]. CCN-CERT, "Centro de Incidentes del Centro Seguridad de la Información del Centro Criptológico Nacional", Madrid (España), 2011. Disponible en: [http://www.cii-murcia.es/informas/abr05/articulos/Analisis\\_gestion\\_riesgos\\_seguridad\\_sistemas\\_informacion.php](http://www.cii-murcia.es/informas/abr05/articulos/Analisis_gestion_riesgos_seguridad_sistemas_informacion.php)
- [37]. REE. "Mapas de la red eléctrica de transporte", *Red Eléctrica de España S.A.*: Madrid (España), 2013.
- [38]. G. J. Correa and J. M. Yusta, "Structural vulnerability in transmission systems: Cases of Colombia and Spain," *Energy Conversion and Management*, vol. 77, pp. 408-418, 2013.
- [39]. P. Curtis, "Maintaining Mission Critical Systems in a 24/7 Environment". IEEE Press Series on Power Engineering, ed. J.W. Sons. Rosenwood, MA (EEUU), 2007, 484p.
- [40]. C. Martenson, "The Crash Course", 2009. Disponible en: <http://www.chrismartenson.com>
- [41]. ICONTEC, "Norma Técnica Colombiana para 5254 la Gestión de Riesgos," Instituto Colombiano de Normas Técnicas, 2004, 44p
- [42]. J. Johansson, "Risk and Vulnerability Analysis of Interdependent Technical Infrastructures" Tesis Doctoral en Industrial Electrical Engineering, University of Lund (Sweden), 189p, 2010.
- [43]. AON, "Global Risk Management Survey," Chicago, IL (USA): *Aon Corporation*, 2010
- [44]. G.J., Correa, J.M. Yusta, & R. Lacal-Aránzategui, "Using interconnected risk maps to assess the threats faced by electricity infrastructures". *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, Vol. 6, N° 4, 2013, pp. 197-216.
- [45]. B. López, D. Arboleda, "Integración del manejo de riesgo e incertidumbre en la planeación financiera de empresas de transmisión de energía.", *Revista CIER*, Montevideo (Uruguay), Vol. 54, 2010, pp. 80-88,
- [46]. JP-Morgan, "Corporate Metrics," *J.P. Morgan & Co Technical Document*, New York, NY (USA), 1999.
- [47]. ISAGEN "Mapa de Riesgos ISAGEN". *Documentos ISAGEN*, 2013. Disponible en: [www.isagen.com.co](http://www.isagen.com.co)
- [48]. ISA. "Política para la gestión integral de riesgos grupo empresarial ISA". Documentos ISA, 2013. Disponible en: <http://www1.isa.com.co/irj/go/km/docs/documents/ContenidoInternetISA/ISA>
- [49]. G. Correa, "Identificación y Evaluación de Amenazas a la Seguridad de Infraestructuras de Transporte y Distribución de Electricidad," Tesis Doctoral en Energías Renovables y Eficiencia Energética, Universidad de Zaragoza, Zaragoza (España), 238p, 2012
- [50]. CNA, "Powering America's Defense: Energy and the Risks to National Security". *Bipartisan Policy Center, the Energy Foundation, and the Grayce B. Kerr Foundation*: Washington, DC (EEUU), 2013. Disponible en: <https://www.cna.org/reports/energy>

## GUÍA PARA AUTORES

### Tipología de artículos para la revista

Cada uno de los artículos de la revista es evaluado por pares académicos con reconocida experiencia en el área a la cual pertenece el artículo enviado para su consideración en publicación. Los autores pueden presentar para publicación las siguientes tipologías, definidas por los organismos de indexación de las revistas científicas para reconocer la calidad de la publicación.

La revista otorga prelación para la publicación de artículos de tipo 1, 2 y 3.

1. Artículo de investigación científica y tecnológica. Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos terminados de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y es.
2. Artículo de reflexión. Documento que presenta resultados de investigación terminada desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. Artículo de revisión. Documento resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.

Otro tipo de artículos pueden ser considerados para publicación en la revista, dependiendo de su originalidad y aporte al conocimiento, según lo considere el comité científico, el comité editorial y el comité de árbitros de cada número. Entre ellos se cuentan:

4. Artículo corto. Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren de una pronta difusión.
5. Reporte de caso. Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Incluye una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos.
6. Revisión de tema. Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.
7. Cartas al editor. Posiciones críticas, analíticas o interpretativas sobre los documentos publicados en la revista que, a juicio del Comité Editorial, constituyen un aporte importante a la discusión del tema por parte de la comunidad científica de referencia.
8. Editorial. Documento escrito por el editor, un miembro del comité editorial o un investigador invitado, sobre orientaciones en el dominio temático de la revista.

## Envío de manuscritos

Los aspectos de forma deben seguir las normas básicas que la revista establece a la hora de redactar el informe o trabajo, en aspectos esenciales como los titulares, el tamaño de los párrafos, las citas bibliográficas, las nomenclaturas, la proporción de tablas y figuras, la presentación de los resultados o las citas bibliográficas. En este caso también se recomienda a los autores que se ajusten a la normativa. Es necesario poner especial cuidado en la organización y la estructura del trabajo, el estilo de redacción, la presentación de los resultados en tablas y figuras, y en la correspondencia entre las referencias citadas y las enumeradas al final del trabajo. Además, conviene no olvidar el ajuste del lenguaje a un entorno internacional, propio de la comunidad científica y profesional, más allá de los modismos propios del país o del área en la que se produzca el artículo.

Los autores deberán remitir los manuscritos de los artículos a través de la plataforma de la revista, a la cual se accede a través de <http://www.funlam.edu.co/lampsakos>, siguiendo las instrucciones que se indican en la plantilla oficial de la revista, consistente en los siguientes requerimientos mínimos:

### Utilizar plantilla oficial de la revista.

Los manuscritos pueden ser escritos en español o inglés, cuartillas tamaño carta (21.59 cm × 27.94 cm) y márgenes de 2 cm en cada lado.

### Máxima extensión del artículo.

7.000 palabras.

### Formato de párrafos

Letra Arial, tamaño 10, espacio doble en columna sencilla.

### Resumen.

Entre 150 y 250 palabras, en español e inglés. Incluir 3 a 5 palabras clave en orden alfabético, con su equivalencia en inglés.

### Numeración de títulos y encabezados.

En listas multiniveles con números arábigos hasta el subnivel 3.

### Cuerpo del manuscrito.

Incluir introducción, metodología y desarrollo evidenciando el aporte al área de ingeniería, es y trabajos futuros.

## Citaciones y referencias.

Numeración bibliográfica según formato IEEE. Todas las citas en el manuscrito deben estar anotadas en las referencias bibliográficas; en consecuencia, no deben existir referencias bibliográficas aisladas que no estén citadas dentro del cuerpo del manuscrito.

## Proceso de evaluación y arbitraje

Los artículos para la revista *Lámpsakos* se someten a consideración del Comité de árbitros para cada edición. Al momento de enviar su manuscrito, la revista puede solicitarle sugerencias para la conformación del mencionado comité de evaluación, con la condición de que el proceso de dictamen para cada edición exige anonimato.

En primer lugar, los artículos recibidos serán objeto de una evaluación preliminar por parte de los miembros del Comité editorial, quienes determinarán la pertinencia de la publicación.

Una vez establecido que el artículo cumple con los requisitos temáticos, además de los requisitos formales indicados en estas instrucciones, será enviado a dos pares académicos externos, quienes determinarán en forma anónima: a) publicar sin cambios, b) publicar cuando se hayan cumplido correcciones menores, c) publicar una vez que se haya efectuado una revisión a fondo y d) rechazar. En caso de discrepancia entre ambos resultados, el texto será enviado a un tercer árbitro, cuya decisión definirá su publicación.

El proceso de dictamen se efectúa por pares académicos especialistas bajo la modalidad doble ciego. Cada par académico revisará la calidad, originalidad, relevancia y valor práctico del trabajo.

La notificación de aceptación o rechazo del artículo se realizará vía e-mail. El informe será emitido a los autores durante el mes siguiente al envío del manuscrito. Los resultados del proceso de dictamen académico serán inapelables en todos los casos.

En general, los aspectos de fondo más valorados serán la coherencia y la relevancia de la colaboración para el avance del conocimiento académico y profesional de la ciencia. Es necesario tener presente que cada tipología de trabajo tiene su propia estructura textual y conceptual, en función del aporte y de los posibles lectores.

## Derechos de autor

La revista *Lámpsakos* requiere a los autores que concedan la propiedad de sus derechos de autor, para que su artículo y materiales sean reproducidos, publicados, editados, fijados y comunicados y transmitidos públicamente en cualquier forma o medio, así como su distribución en el número de ejemplares que se requieran y su comunicación pública, en cada una de sus modalidades, incluida su puesta a disposición del público a través de medios electrónicos, ópticos o de cualquier otra tecnología para fines exclusivamente científicos, culturales, de difusión y sin fines de lucro. Cada artículo se acompaña de una *declaración de originalidad* en la que se especifique que no ha sido publicado y que no se someterá simultáneamente a otras publicaciones antes de conocer la decisión del comité editorial.

## Originalidad y divulgación de artículos

Los trabajos publicados en la revista, sin excepciones, se acogen a las normas del Copyleft y Creative Commons, ya que la publicación es de libre distribución para el conocimiento y podrá ser reproducida por cualquier medio, haciendo mención de la fuente. El autor o autores autorizan a la revista y a la Institución para editar y divulgar/publicar el artículo por cualquier medio nacional y/o internacional, impreso o electrónico.

El autor o autores aceptan las políticas editoriales y los lineamientos de la guía. Los artículos son producto de un proceso de investigación de los autores y han sido valorados previamente por colegas expertos antes de ser presentados a publicación.

Las opiniones y afirmaciones que aparecen en la publicación reflejan exclusivamente los puntos de vista de sus autores y no comprometen necesariamente las políticas y pensamiento de la FUNLAM, la Facultad de Ingenierías o la revista *Lámpsakos*.

## GUIDE FOR AUTHORS

### Typology of articles for the journal

Each of the papers in the journal is evaluated by academic peers with recognized experience in the area on which the article belongs. Authors may submit their manuscripts for publication, according to the following typologies, defined by indexing agencies of scientific magazines that recognize the quality of the publications. (Publindex, Colciencias - Colombia)

The magazine gives priority to the publication of articles of type 1, 2 and 3.

1. Article of scientific and technological research. Document that presents, in detail, the original results of completed research projects. The structure generally contains four important parts: introduction, methodology, results and s.
2. Article of reflection. Document that presents finished research results from an analytical, interpretative or critical, on a specific topic, using original sources.
3. Review article. Document resulting from a completed investigation, which analyze, systematize and integrate the results of research published or unpublished, in a field of science or technology, in order of accounting for the progress and development trends. It is characterized by a careful literature review of at least 50 references.

Another kind of articles can be considered for publication in the magazine, depending on their originality and contribution knowledge according to the scientific committee and the editorial board of referees committee of each number. Among them are:

4. Short article. Brief document that presents original results preliminary or partial of a scientific or technological research, which usually requires a quick diffusion.
5. Case report. Document that presents the results of a study on a particular situation in order to make known the technical and methodological experiences considered in a specific case. Includes commented systematic review of the literature on analogous cases.
6. Topic Review. Document resulting from a critical review of the literature on a particular topic.
7. Letters to the Editor. Critical positions, analytical or interpretative on documents published in the magazine, which in the opinion of the Editorial Committee are an important contribution to the discussion of the topic by the scientific community of reference.
8. Editorial. Document written by the editor, editorial committee member or a guest researcher on guidelines in the thematic domain of the magazine.



## Requirements of manuscripts

The aspects of form must follow the basic rules that the journal has established for authors when writing their manuscripts, in essential aspects as the titles, the size of paragraphs, quotations, nomenclatures, the presentation of results, the proportion of tables and figures. Authors should also conform to the rules of quotation of references. Special care is required in the organization and structure of the manuscript, as well as the writing style, the presentation of the results in tables and figures, and the correspondence between the references cited and listed at the end of work. Moreover, authors must not forget about the language settings according to the international environment, typical of scientific and professional community.

Authors should refer their manuscripts of articles through the journal's platform, which may be accessed on the address <http://www.funlam.edu.co/lampsakos>, following the instructions in the official template magazine, consisting of the following minimum requirements:

### Use official magazine template

Manuscripts may be written in Spanish or English language, letter or A4 sized pages (21.59 cm x 27.94 cm) and 2 cm margins on each side.

### Maximum length of the article

7000 words.

### Paragraphs formatting

Arial letter, size 10, double-spaced in single column.

### Abstract

Between 150 and 250 words in both Spanish and English languages. Include 3-5 keywords in alphabetical order, with their equivalent in Spanish.

### Numbering of titles and headers

In multilevel lists with Arabic numerals to the sub-level 3.

### Body of manuscript

It includes Introduction, Development Methodology and evidencing the contribution to engineering, s and future work.

## Citations and bibliographic references

Numbering according to IEEE format. All citations in the manuscript must be listed in the references. There should not be isolated references that are cited in the body of the manuscript.

## **Evaluation process and arbitration**

The articles for the Journal "Lámpsakos" are subjected to consideration of the Committee of referees for each edition. When authors send their manuscript, the journal may solicit suggestions for the creation of that evaluation committee, based upon the fact that in the dictamination process for each edition requires anonymity.

First, the received articles will be subject to a preliminary assessment by the Editorial Committee members, who will determine the relevance of the publication.

Once established the Article complies with the thematic requirements in addition to the formal requirements indicated in these instructions, it will be sent out to external academic peers who determine on an anonymous basis: a) publish without changes, b) publish corrections they have complied with minor corrections, c) publish once having made a thorough review, d) reject. In case of discrepancy between the two results, the text will be sent to a third referee, whose decision will define its publication.

Dictamination process is carried out by academic peers specialists under double-blind mode. Each pair will review academic quality, originality, significance and practical value of the work.

Notification of acceptance or rejection of the article will be via e-mail. The report will be emitted into the authors during the month following the submission of the manuscript. The results of the academic opinion will be final in all cases.

In general, most valued aspects of background will be the consistency and relevance of collaboration in advancing academic and professional knowledge of science. It is necessary to remember that each type of job has its own textual and conceptual structure, depending on the amount and potential readers.

## Copyright

The journal *Lámpsakos* requires granting authors ownership of their copyrights, for their item and materials to be reproduced, published, edited, set and reported and publicly transmitted in any form means, and their distribution in the number of copies required, and public communication, in each of its forms including the making available to the public through electronic, optical or other purpose any technology exclusively scientific, cultural, media and nonprofit. It has the letter of assignment of rights to do so.

## Originality letter

The works published in the magazine, without exception, are welcomed to the rules of Copyleft and Creative Commons, and that the publication is freely distributable for knowledge, and may be reproduced by

any means making mention of the source. The author or authors authorize the magazine and the Institution to edit and disseminate/publish the article by any national and/or international, print or electronic.

Each article is accompanied by a statement of originality in specifying that has not been published and not simultaneously submitted to other publications before knowing the decision editorial committee.

The author or authors accept the editorial policies and guidelines of the guide. Their articles are the result of a research of the authors and has been previously assessed by expert colleagues before acceptance for publication.

The opinions and affirmations accepted for publication reflect exclusively the points of view of their authors and do not necessarily compromise the policies and thinking of either Fundación Universitaria Luis Amigó, the Faculty of Engineering or the journal *Lámpsakos*.