

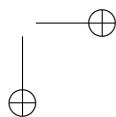
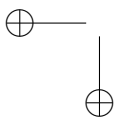
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA Ingeniería

Volumen 22 • Número 3 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2017



REVISTA Ingeniería

Volumen 22 · Número 3 · Año 2017 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

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

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

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

EDITOR

Sergio A. Rojas, PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

COMITÉ EDITORIAL

Sarah Greenfield, PhD.
Faculty of Technology of
Monfort University,
Reino Unido

Diego Cantor, PhD.
University of Western Ontario
Robarts Research Institute, Canadá

Jose Marcio Luna, PhD.
Perelman School of Medicine,
University of Pennsylvania, Estados Unidos

José Luis Villa, PhD.
Universidad Tecnológica de
Bolívar, Colombia

Luz Esperanza Bohorquez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Carlos Andrés Peña, PhD.
Institute for Information and Commu-
nication Technologies - Haute Ecole
d'Ingénierie et de Gestion du Canton
de Vaud, Suiza

Iván Santelices Malfanti, PhD.
Universidad del Bío-Bío,
Chile

Carlos Eduardo Moreno, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Víctor Hugo Grisales, PhD.
Universidad Nacional de
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

COMITÉ CIENTÍFICO

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de Colombia

Marco Aurelio Alzate, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Germán Méndez, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Ana María Peña, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Rodrigo Herrera, MSc.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Diego Pardo Ayala, PhD.
Agile and Dexterous Robotics
Lab - ETHZ (Zurich)

Edwin Rivas, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

Henry Alberto Diosa, PhD.
Universidad Distrital Francisco
José de Caldas, Colombia

DIRECTIVAS

Carlos Javier Mosquera S.
Rector (E)

Nelson Libardo Forero Chacón, PhD.
Director Centro de Investigación
y Desarrollo Científico

Roberto Ferro Escobar, PhD.
Decano de la Facultad de Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Carolina Suárez R., MSc.
Gestora Editorial

Jenny Alexandra Jimenez, MSc.
Corrección de Estilo

Julian Arcila-Forero, MSc.
Diagramación **L^AT_EX**

Editorial Kimpres
Impresión

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Bladimir Bacca Cortes, PhD.
Universidad del Valle, Colombia

Juan David Marín Jiménez, PhD(c).
Universidad Nacional de Colombia

Eduyn López-Santana, PhD(c).
Universidad Distrital F. J. de C.
Colombia

Deicy Alvarado, PhD.
Universidad Distrital F. J. de C. Colombia

Angela Marcela Mejía Fajardo, PhD.
Universidad Militar Nueva Granada,
Colombia

Carlos Celemin Paez, PhD.
Delft University of Technology,
Europa

Pedro Gómez Vilda, PhD.
Universidad Politécnica de Madrid,
España

Olga Lucía Ramos Sandoval, PhD.
Universidad Militar Nueva Granada,
Colombia

Carlos Arturo Lozano-Moncada, PhD.
Universidad del Valle, Colombia

Jesús Carrillo Rodríguez, PhD.
Universidad Externado de Colombia

Marco Alzate, PhD.
Universidad Distrital F. J. de C.
Colombia

Sergio Rivera, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

Diego Fernando Manotas Duque, PhD.
Universidad del Valle, Colombia

Sandra Carvajal Quintero, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

Samuel Montejo Sánchez, PhD.
Universidad Central de Las Villas,
Cuba

Javier Enrique Arévalo Peña, MSc.
Universidad Autónoma de Colombia

Claudia Eugenia Toca Torres, PhD.
Universidad Nacional Autónoma
de México

Hans R. Marquez, MSc.
Universidad Distrital F. J. de C.
Colombia

Edwin Rivas, PhD.
Universidad Distrital F. J. de C.
Colombia

Juan Carlos Figueroa, PhD.
Universidad Distrital F. J. de C.
Colombia

Juan Javier Vesga, PhD.
Universidad Católica de Colombia

Elyn L. Solano Charris, PhD.
Universidad de la Sabana, Colombia

Rodrigo Herrera, MSc.
Universidad Distrital F. J. de C.
Colombia

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Open access



Los textos de los artículos incluidos en esta edición pueden ser utilizados y reproducidos con fines sin ánimo de lucro y dando crédito a los autores. Este trabajo se distribuye bajo la Licencia de Creative Commons

Reconocimiento – No comercial – Sin Obra Derivada 3.0 Unported.

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

COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

La Revista INGENIERÍA no realiza ningún cobro por las postulaciones, evaluación y publicación de los artículos sometidos. La Universidad Distrital Francisco José de Caldas asume los gastos relacionados con el proceso de edición, gestión y publicación. Los Pares Evaluadores realizan su contribución de manera voluntaria y sin retribución económica.

INDIZADA EN



CARATULA

La portada es una alegoría de la paz como un escenario que un país fraccionado tiene el reto de descifrar. Así mismo alude al artículo sobre algoritmos de encriptación de imágenes incluido en esta edición.

Idea creativa y edición gráfica:
Sergio A. Rojas
Diseño gráfico: Julián Hernández.

TABLE OF CONTENTS

Editorial

- Paz, complejidad e ingeniería** 304
Peace, complexity and engineering
Luz Esperanza Bohórquez · Sergio A. Rojas

Electric Engineering

- Integrative Agent as Energy Supplier of Distributed Energy Resources at The Distribution Level** 306
Agente Integrador de Recursos Energéticos Distribuidos como Oferente de Energía en el Nivel de Distribución
Luis Alejandro Arias Barragán · Edwin Rivas Trujillo · Francisco Santamaria

- Application of Analytical Uncertainty Costs of Solar, Wind and Electric Vehicles in Optimal Power Dispatch** 324
Aplicación de Costos de Incertidumbre Analíticos de Energía Solar, Eólica y Vehículos Eléctricos en el Despacho Óptimo de Potencia
Juan Arévalo · Fabian Santos · Sergio Rivera

- Filters Design Method Based on Networks of Transmission Lines for a Single-Phase Topology with BPL Technology** 347
Método de Diseño de Filtros Basado en Redes de Líneas de Transmisión para una Topología Monofásica con Tecnología BPL
Rafael Enrique Balaguera Hernández

Computational Intelligence

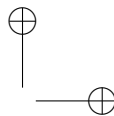
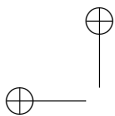
- Acoustic and Language Modeling for Speech Recognition of a Spanish Dialect from the Cucuta Colombian Region** 362
Modelo Acústico y de Lenguaje del Idioma Español para el dialecto Cucuteño, Orientado al Reconocimiento Automático del Habla
Juan Celis · Rodrigo Llanos · Byron Medina · Sergio Sepúlveda · Sergio Castro

Complex Systems

- Automatic Classification of Public Investment Megaprojects in Colombia from a Technical, Organizational and Environmental approach** 377
Clasificación Automática del Avance de Megaproyectos de Inversión Pública en Colombia, desde un Enfoque Técnico, Organizacional y Ambiental
Hugo Ernesto Gutiérrez Vanegas · Miguel Alberto Melgarejo Rey

- Images Encryption Algorithm Using the Lorenz's Chaotic Attractor** 396
Algoritmo de Encriptación de Imágenes Utilizando el Atractor Caótico de Lorenz
Iván Felipe Rodríguez · Edilma Isabel Amaya · César Augusto Suárez · José David Moreno

- Instructions for Authors** 413



Nota Editorial

Paz, complejidad e ingeniería

REVISTA Ingeniería



El espinoso camino que ha significado para el país el acuerdo de paz, con todas sus controversias y altibajos, ha conducido de manera irreversible a un hecho de enorme trascendencia para nuestra historia reciente: la reintegración a la vida civil de un grupo ilegal otrora alzado en armas. Y no es para menos, pues los devastadores daños humanos y materiales que produjo el conflicto que finaliza con dicha desmovilización, deterioró varias generaciones de colombianos durante cerca de seis décadas, con secuelas imposibles de borrar con una firma o un agarrón de manos. Las tantas y diferentes reacciones que ha causado este acuerdo se han visto matizadas de pasiones que han fraccionado aún más a una sociedad de por sí ya fuertemente polarizada.

A pesar de ello, la agenda del acuerdo se ha venido cumpliendo y es ahora su implementación la que nos plantea inmensos retos para poder hacerlo viable, perdurable y armonioso en las diferentes facciones de nuestra sociedad. Se debe comenzar por solventar sus debilidades y fortalecer sus aciertos, hasta encontrar los mecanismos adecuados para su operativización, supervisión y verificación. Se requiere el concurso no solo de los mismos desmovilizados, el gobierno y la oposición, sino también de la industria, los grupos cívicos y ciudadanos, las organizaciones no gubernamentales y por supuesto, la academia. Desde esta última en particular, deberían surgir reflexiones agudas, exámenes acuciosos, iniciativas audaces e investigaciones rigurosas que contribuyan a dar luces sobre el proceso.

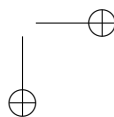
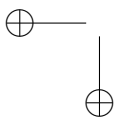
Prevedemos que las Ciencias Sociales, Jurídicas y Económicas tendrán obviamente una participación preponderante en tales iniciativas, pero esperamos también aportes valiosos desde las disciplinas de la Ingeniería puesto que la implementación del acuerdo demandará el desarrollo de infraestructura (construcciones civiles, servicios públicos, tecnologías, empleo, salud, educación, abastecimiento), así como de gestión y análisis de la información para monitoreo y toma de decisiones. Nos corresponde pues responder a la oportunidad de contribuir a descifrar el acertijo de la paz, no la del papel, sino la de la vida cotidiana; una que permee y se adapte a la realidad, a la necesidad, a la expectativa de todas las personas que a fin de cuentas, convivimos en este país. La paz, así como lamentablemente alguna vez lo hizo la violencia, tendrá que encontrar su propia dinámica para lograr instalarse en el aparato social, económico, estatal, cultural, territorial y académico que nos define como nación.

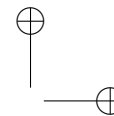
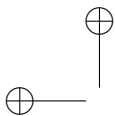
No sería descabellado intuir que esa dinámica de formación de una sociedad pacificada pueda surgir desde perspectivas complementarias originadas en comunidades locales, regionales, nacionales e internacionales. Desde estas orillas los promotores de la paz intervendrían como conjuntos de sistemas interdependientes, asumiendo una variedad de roles y desarrollando una multiplicidad de acciones y agendas simultáneas en numerosas escalas de relaciones sociales y en un entorno altamente conectado. La multiplicidad, simultaneidad e interdependencia de los sistemas socia-

Open access



Citación: L.E. Bohórquez, S. Rojas, "Paz, complejidad e ingeniería", Ingeniería, vol. 22, no. 3, pp. 304-305, 2017.
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12445>





les humanos de esta índole ponen de manifiesto la necesidad de reconocerlos y mejor aún, estudiarlos e intervenirlos desde un paradigma epistemológico alternativo, uno que contraste con los enfoques tradicionales de causalidad lineal; uno donde las redes recursivas, los límites abiertos adaptativos y las configuraciones auto organizadas primen sobre las estructuras rígidas y condiciones de frontera fijas; uno que admita las diversas categorías de complejidad extrema inherentes al fenómeno real de una paz en construcción.

De allí que las ciencias de los sistemas complejos se presenten como una opción llamativa para estudiar dicho fenómeno. Los sistemas complejos se encuentran presentes tanto en los entornos naturales como sociales; se caracterizan por la emergencia de comportamientos colectivos a partir de la interacción entre las partes, y en ausencia de un controlador que determine el comportamiento del todo. En el mundo, el paradigma de los sistemas complejos ha tenido amplia relevancia en el diseño de soluciones de ingeniería aplicables en diversos ámbitos como la computación, la optimización, la gestión empresarial, la ecología de paisaje, la biología de poblaciones, las redes de comunicación y los fenómenos sociales, por mencionar algunos.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, por su parte, ha desarrollado una trayectoria importante de investigación en ingeniería de sistemas complejos. En los últimos años ha presenciado un crecimiento notable en el número e impacto de investigaciones, eventos y publicaciones en la temática. Dentro de los principales campos de investigación abordados se encuentran el procesamiento de imágenes, ingeniería bioinspirada, computación evolutiva, complejidad organizacional, entre otros. En cuanto a eventos académicos se resalta el Encuentro Interuniversitario sobre Complejidad que el grupo ComplexUD ha organizado y liderado de manera continua desde el año 2006, y en el que se han tratado temas sobre auto-organización, sociedad, educación, fractalidad, entre otros.

La madurez alcanzada por estas investigaciones y eventos, se ha visto respaldada simultáneamente con la publicación en la Revista INGENIERÍA de un dossier dedicado a la “Complejidad en Ingeniería”. Con base en lo anterior, vale reconocer la actividad e interés que ha adquirido esta área de estudio en la Universidad y por ello nos complace presentar a partir del presente número una nueva sección denominada “Sistemas Complejos”, que tendrá presencia continua dentro de la Revista y que permitirá divulgar con mayor oportunidad los aportes que al respecto realice la comunidad académica, a la cual desde ya extendemos efusiva invitación a vincularse.

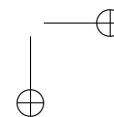
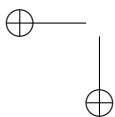
Las ciencias de los sistemas complejos sugieren que los grupos sociales, en particular una sociedad en pacificación, no pueden planificarse, predecirse o controlarse a la manera tradicional de la mecánica clásica. Por eso es erróneo esperar que la adopción de factores clave de éxito logrados en otros acuerdos de paz, o que la imposición de lógicas globales que ignoren dinámicas autóctonas (globalidad *versus* localidad) recetados desde una racionalidad lineal para la Colombia posconflicto, ayuden a propulsar a esta sociedad hacia convivencias menos violentas. Lastimosamente, tal enfoque es exactamente el que un gran número de iniciativas de paz están tomando, cuando se debería incentivar a la comunidad académica a buscar alternativas que partir del aprovechamiento y no de la reducción de la complejidad, permitan ir consolidando un enfoque evolutivo de interacciones armoniosas, mayor cohesión social e igualdad de oportunidades. La paz es un reto que lo amerita.

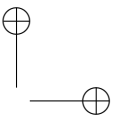
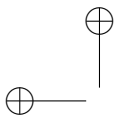
Luz Esperanza Bohórquez, PhD.

Editora Asociada

Sergio A. Rojas, PhD.

Editor General





Case report

Integrative Agent as Energy Supplier of Distributed Energy Resources at The Distribution Level

Agente Integrador de Recursos Energéticos Distribuidos como Oferente de Energía en el Nivel de Distribución

Luis Alejandro Arias Barragán^{1,2,*}, Edwin Rivas Trujillo², Francisco Santamaria²

*¹Universidad Autónoma de Colombia.

²Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Correspondence: lincarias@yahoo.com, erivast@udistrital.edu.co, fsantamariap@udistrital.edu.co

Recibido: 02/12/2016. Modificado: 27/04/2017. Aceptado: 01/06/2017.

Abstract

Context: It has been observed the incipient development of the integration of Distributed Energy Resources (DER) in electricity markets at the distribution level.

Method: DER participation by an integrator agent is proposed. The integrator agent allows DER to participate as suppliers of energy to the network operator and / or the energy market at the distribution level. Sequence diagrams and mathematical formulas were proposed, for fixing the price of energy by relying on a case study.

Results: The results show the feasibility of the integrator agent to participate as a supplier of electricity to the distribution network.

Conclusions: Applications using cloud computing allow users to access information on the DER agent resources in general and to the state of the network demands. Pricing schemes proposed allow DER participation through the integrating agent as a supplier of energy.

Keywords: Integrating agent, Distributed energy resources, Energy market, Distribution network, Virtual power plant.

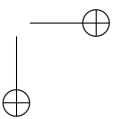
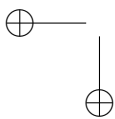
Language: Spanish



Cite this work as: L.A. Arias, E.R. Trujillo, F. Santamaria, "Integrative Agent as Energy Supplier of Distributed Energy Resources at the Distribution Level", Ingeniería, vol. 22, no.3, pp. 306-323, 2017.

©The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.10986>



Resumen

Contexto: Se ha observado el desarrollo incipiente del proceso de integración de los Recursos Energéticos Distribuidos (DER) en los mercados eléctricos a nivel de distribución.

Método: Se propuso la participación de los DER mediante un agente integrador. Dicho agente integrador permite que los DER participen como oferentes de energía para el operador de red y/o para el mercado energético a nivel de distribución. Se han propuesto diagramas de secuencia y formulaciones matemáticas para la fijación del precio de la energía apoyándose en un caso de estudio.

Resultados: Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de que el agente integrador pueda participar como oferente de energía eléctrica para la red de distribución.

Conclusiones: Se señala como la utilización de aplicaciones de computación en la nube posibilitan el acceso de usuarios con DER a la información sobre los recursos del agente en general y el estado de demandas que tiene la red. Los esquemas de tarificación propuestas dinamizan la participación de los DER a través del agente integrador como oferente de energía.

Palabras clave: Agente integrador, Mercado de la energía, Planta virtual de potencia, Recursos energéticos distribuidos, Red de distribución.

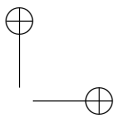
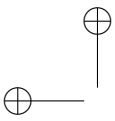
Idioma: Español

1. Introducción

En el contexto actual con la red eléctrica se identifica una tendencia creciente a la incorporación de Recursos Energéticos Distribuidos (DER). Estos se agrupan en: Sistemas de Generación Distribuida (GD), medios de almacenamiento, elementos de compensación, vehículos eléctricos (VE), y programas de Respuesta de la Demanda (RD) [1]–[3].

La integración de DER en las redes eléctricas permite suplir picos de demanda que se presentan en la red, cuando están conectados en redes principales; pueden convertirse en reserva de energía para el área del sistema de potencia, eliminando así las necesidades de sistemas redundantes; ofrecen la oportunidad de exportar energía del sistema a mercados liberalizados de tipo mayorista en generación; y los usuarios poseedores de DER pueden tener tarifas diferenciadas que reduzcan sus pagos [4]. Se encuentran trabajos donde se analiza de manera individual el efecto que un consumidor nodal puede acarrear en la red, una vez se realice una reducción de su consumo de potencia, y donde el énfasis se centra primordialmente en aspectos técnicos de evaluación de los flujos de potencia antes y después de que se presente el evento de deslastre de carga como respuesta al control local que el operador de la red [5].

El proceso de integración de los DER a nivel de distribución se ha abordado desde dos enfoques, el de las empresas de distribución y el de la demanda o el usuario final. En el enfoque desde la empresa de distribución, los DER hacen parte de portafolios de servicios, que son obligatorios por la legislación de muchos países como Estados Unidos, Australia y los pertenecientes a la Comunidad Económica Europea. Del lado de la demanda dicho enfoque se encuentra estrechamente relacionado con la visión de los consumidores del sistema eléctrico. Si los clientes ven una ventaja de ahorro de costos en la sustitución parcial o total de la red eléctrica para la autogeneración, a través de GD, entonces es altamente probable que inviertan en los DER. No obstante tener como único incentivo



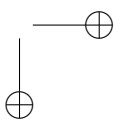
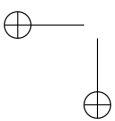
el ahorro en la facturación de los clientes hace que los tiempos de recuperación de inversión sean relativamente largos y la sostenibilidad de los proyectos de inversión de los usuarios en DER sea baja [6]–[8]. Otra parte, no menos importante resulta la injerencia directa de la legislación en apoyo a iniciativas para la masificación de los DER entendiéndose que su solución debe abordarse de manera integral en pro de una factibilidad económica, social y medioambiental, lo cual sin duda redunde en un cambio de la estructura de los mercados energéticos en cuanto a la diversidad de productos que lleguen a ofertarse y los actores que van a intervenir [9].

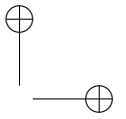
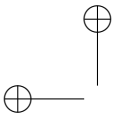
La revisión de la literatura científica muestra un desarrollo incipiente de estrategias de integración de DER del lado de los clientes o usuarios de la red [10]–[14], razón por la cual este trabajo se enfoca en el lado de la demanda, agrupando los DER propiedad de usuarios regulados y no regulados de la red a través de un agente integrador que puede participar como oferente de energía.

La participación como oferentes de energía se da en mercados energéticos que operan generalmente como agrupaciones o por intercambios, encontrándose dos escenarios típicos: El mercado de día anterior Day-Ahead Market (DAM, por sus siglas en inglés) el cual despacha energía con provisiones de tiempo variables de 12 a 36 horas antes y que involucra obligaciones financieras firmes; y el mercado de tiempo real o de balance Balancing Market (BM, por sus siglas en inglés) el cual toma decisiones en intervalos cortos de tiempo, minutos antes del despacho de energía. Este mercado es particularmente relevante, a causa de la imposibilidad de almacenar la energía eléctrica a gran escala, y a la necesidad de equilibrar la oferta y demanda de energía [15].

La estructura de los mercados energéticos se encuentra en una etapa de desarrollo constante debido a los avances en la promoción de los DER, por ejemplo la promoción de los mecanismos de Respuesta a la Demanda (RD) ha permitido que surja un entorno de mercado favorable para el desarrollo de programas de RD, nuevos mecanismos de fijación de precios con inclusión de incentivos a los usuarios y adicionalmente se haya propiciado la expansión de los mercados mayoristas de energía hacia mercados de capacidad y servicios auxiliares [16]. De igual forma los cambios en los mercados energéticos a partir de la masificación de DER ha permitido la entrada de nuevos participantes en el mercado de energía, como agregadores de servicios [17]–[19]. A nivel de distribución se encuentran experiencias de mercados con gran versatilidad en cuanto a planes y tarifas para los usuarios, como es el caso del mercado de Texas en Estados Unidos, donde se cuenta con un mercado minorista en el que diferentes proveedores participan en calidad de proveedores de energía al menudeo (REP - Retail Electric Providers en inglés). Los REP participan en mercados mayoristas de energía como representantes de los usuarios finales, protegiendo los intereses de los mismos ante escenarios de fluctuaciones en el precio de la energía. Estos REP son los agregadores de carga, proveedores de electricidad que conectan a los usuarios finales con el mercado mayorista [20], [21]. El rol de los usuarios si bien se puede calificar como activo se limita a la gestión de su consumo y sus pagos respectivos.

El presente artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: En la sección 2, se realiza la contextualización de la integración de recursos energéticos distribuidos y las estrategias de integración tales como los sistemas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos, Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA, por sus siglas en inglés), las microrredes y las Plantas Virtuales de Potencia (VPP); la sección 3 muestra la estructura propuesta del agente integrador explicando las





funcionalidades de la plataforma de acceso en el espacio de computación en la nube (Cloud Computing en inglés) que apoya el trabajo del agente integrador, y de sus módulos de comercialización, de balance estocástico y de gestión de usuarios; en la sección 4 se explica el lugar donde operará el agente integrador dentro de la cadena energética y dentro de la estructura de gestión del sistema eléctrico colombiano, además de la forma de operación que tendrá dentro de la red. Finalmente, en la sección 5 se realizan conclusiones sobre las potencialidades del agente integrador.

2. Estrategias de integración de DER

Con respecto a la Integración de DER en las redes de distribución, se ha propuesto el desarrollo de herramientas como algoritmos, modelos y estrategias, que responden a funciones-objetivo variables en el tiempo y con criterios de evaluación técnica, económica, social, normativa y medioambiental [22]–[24]. La integración de los DER en redes de distribución juega un papel de gran relevancia en el desarrollo de las mismas, con el propósito de garantizar condiciones normales de operación desde los puntos de vista técnico y económico, así como ante fallos, mantenimientos u otras contingencias de la red [25].

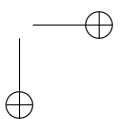
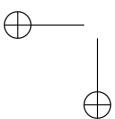
La Agencia Internacional de Energía [26] señala que “la mejor integración de todos los elementos de los sistemas eléctricos hará las operaciones más complejas, pero también mejorará el funcionamiento, la eficiencia y la resiliencia, y optimizará los recursos energéticos y las inversiones”. La integración de los DER en el nivel de distribución se ha tenido en cuenta en la planeación de la red orientada a la reducción de costos, incluyendo a los DER como parte de portafolios energéticos de las empresas de distribución/comercialización [27]–[30].

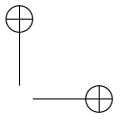
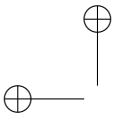
Un aspecto importante en la integración de los DER lo constituye el marco normativo que se encuentra en una dinámica de desarrollo constante dentro de la legislación internacional. Existen tendencias orientadas a la promoción de incentivos regulatorios para la puesta en marcha de soluciones energéticas apoyadas en DER; otras tendencias se centran en los incentivos financieros y económicos para la adquisición de la tecnología y la posterior venta de productos energéticos a partir de DER; finalmente las tendencias menos desarrollada están ligadas a incentivos de tipo social y político [31].

Algunas de las principales estrategias de integración para los DER a nivel tecnológico son los sistemas SCADA, las microrredes y las Plantas Virtuales de Potencia (VPP). A continuación, se realiza breve descripción de las mismas.

2.1. Sistemas SCADA

Los sistemas SCADA son utilizados en labores de gestión, recibiendo datos de dispositivos sensores que monitorean el estado de las subestaciones y dispositivos de protección que pueden alterar sus alcances dependiendo de la conexión o desconexión de elementos GD, ya sea aguas arriba o aguas abajo de los barrajes principales, además resulta imprescindible para índices altos de penetración de GD en la red [2]. Los SCADA son utilizados en la planificación de las redes asignando la potencia eléctrica óptima a cada unidad de generación, lo que minimiza los costes de funciona-





miento de producción. Cuando la producción de energía se realiza gracias a un sistema híbrido con fuentes renovables y convencionales, la reducción al mínimo de los costes funcionales conduce a la minimización de la energía convencional [3], [32].

En la actualidad una buena parte de la gestión de redes que incluyen DER a gran escala y evalúan los impactos de los mismos, se apoya en sistemas SCADA compuestos básicamente por software para la toma de decisiones, interfaces hombre-máquina con módulos de accesibilidad y controles locales y remotos para las comunicaciones, a menudo soportados en redes Ethernet. Los principales objetivos de los SCADA son la vigilancia y el control de la tecnología a partir del seguimiento de los parámetros eléctricos y no eléctricos del sistema híbrido de la producción y el consumo de electricidad a partir de fuentes de energía renovables, el control sobre los elementos de toma de decisiones implementado dentro del sistema de supervisión y el control del sistema [33].

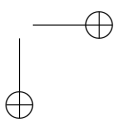
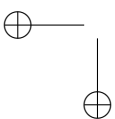
En el proceso de integración de los DER un aspecto importante es el monitoreo y control de los dispositivos de almacenamiento, sus acoples inversores y los parámetros transitorios al momento de conexión y desconexión a la red de dichos inversores. Para la coordinación de estas labores los sistemas SCADA son herramientas que ofrece gran versatilidad y su análisis es abordado en la mayoría de trabajos sobre factores que coadyuvan a la integración de recursos de generación distribuida en las redes [11], [34].

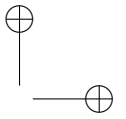
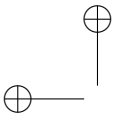
2.2. Microrredes

Algunas soluciones analizan a los generadores distribuidos y sus cargas asociadas como un sub-sistema denominado microrred [35]. Una microrred es un sistema discreto de energía eléctrica a pequeña escala, que consiste en fuentes renovables y tradicionales interconectadas de energía y de almacenamiento con los sistemas de gestión de energía en los edificios inteligentes [12].

En [13] abordan la gestión de la red de distribución que integra DER, por medio de microrredes desde la perspectiva de redes autónomas de energía caracterizadas por alto nivel de penetración de recursos distribuidos de energía, que participan en un mercado de precios en tiempo real. La operación de estas redes autónomas se realiza sin un operador central, y se fundamenta en las redes públicas de comunicación. Las microrredes suelen hacer parte de soluciones integrales para energía no solo de suministro eléctrico, sino también de gas y calefacción [36], [37].

[14], [15] analizan la gestión de la microrred enfocándose en el problema de mantener la sincronización de la microrred una vez esta pasa de modo interconectado a modo aislado, que resulta vital en el momento de evaluar la estabilidad de los puntos de operación en cuanto sea necesaria una reconexión posterior. Para este caso la gestión es soportada en la observancia de las restricciones técnicas para la interconexión de elementos de GD, parte fundamental de los DER, a la red de distribución y que son tratados ampliamente en el protocolo IEEE 1547 [38]. Por último, en cuanto a aspectos técnicos se refiere, debe señalarse como aspecto de relevancia la inclusión de sistemas de comunicaciones y control que brinden a las soluciones de microrredes la posibilidad de continuar en operación ante la existencia de perturbaciones que las aislen de otras microrredes y agentes del sistema durante algún tiempo [39].





Al integrar DER mediante microrredes debe analizarse el impacto de la distribución de costos y beneficios entre los agentes participantes del mercado: el administrador de la microrred, la red eléctrica regulada, los clientes dentro de la microrred y los clientes que están fuera de la microrred. Una herramienta de análisis usada en microrredes es la teoría de juegos cooperativos donde se evalúan diferentes escenarios de sinergia entre los agentes del mercado [17].

2.3. Plantas Virtuales de Potencia - VPP

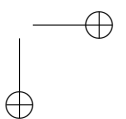
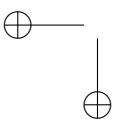
La VPP se define como un nuevo modelo de infraestructura de la energía, consistente en la integración de diferentes unidades de GD en una red de generación de energía controlada por un sistema central de gestión de la energía [19]. La VPP combina fuentes tanto renovables como no renovables de energía, al igual que dispositivos de almacenamiento y usuarios no necesariamente conectados entre sí, que son reunidos para salir al mercado y aparecer como una planta de energía con una salida horaria definida y unas posibilidades propias de generación que le permiten incluso ofertar en un mercado mayorista, siendo incluidos en procesos de despacho horario diario o de mediodía [18]–[20].

[21] presenta un modelo de gestión para la integración de DER, apoyado en VPP analizado a partir de arquitectura de software orientada a servicios. Se proponen tres escenarios: uno inicial donde la VPP se muestra como eje central donde convergen los elementos de DER, que comprenden los elementos de GD, dispositivos de almacenamiento y controladores para cargas puntuales. Luego es propuesto un escenario intermedio, donde se tienen varias VPP auxiliares, que gestionan los DER de cada microrred, y que a su vez son controlados por una VPP central; y un tercer escenario, donde se presenta un sistema de servicios centralizado que involucra los servicios de la VPP y gestiona la información del entorno externo a la red como estado de las troncales adyacentes a cada microrred, el estado meteorológico y sus previsiones para las fuentes de GD y los precios de la energía en tiempo real.

En [40] utilizan las VPP como estrategias de integración para unidades descentralizadas de tipo eólico y fotovoltaico, ofreciendo multiplicidad de servicios para un mercado mayorista de electricidad, abordada mediante un análisis técnico-económico de cada unidad de GD y su consumidor asociado. La versatilidad de las VPP permite que integren, además de usuarios poseedores de DER, elementos de la red como plantas de procesamiento de residuos, permitiendo establecer cluster económicos y energéticos en el marco de proyectos económica, social y medioambientalmente sostenibles [22], [23], [41].

Las VPP facilitan la integración de los DER, permitiendo subsanar en gran medida inconvenientes ligados a la incertidumbre en el comportamiento de los elementos DER como la GD, gracias al manejo paralelo de tecnologías asociadas a sistemas de almacenamiento y mecanismos de RD. La facilidad de adaptación de las VPP permite que participen en mercados de tipo DAM y de tipo BM [24], [42].

Las VPP muestran una gran versatilidad al momento de combinar la utilización de DER tales como GD y RD por cuanto establecen formas de complementariedad para que los recursos se apoyen entre sí, permitiendo garantizar firmeza en las ofertas de energía, cuya exigencia es fundamental en la operación de los mercados energéticos [43]–[45].



En la tabla I, se muestra un cuadro comparativo de los sistemas SCADA, Microrredes y VPP como estrategias de integración de los DER.

Tabla I. Cuadro comparativo de principales estrategias de integración de DER

| Factor | Sistemas SCADA | Microrredes | Plantas Virtuales de Potencia |
|-----------------------|---|--|--|
| Objetivo | Control de dispositivos de GD, ocasionalmente de RD | Control/Integración de DER en la red | Gestión/control e integración de DER |
| Rango de aplicación | Elementos de la red | Sectores locales de la red | Sin restricción |
| Infraestructura | Elementos de control, sensores | Dispositivos AMI, medidores de flujo, tecnología de Comunicaciones | Dispositivos AMI, medidores de flujo, tecnología de Comunicaciones, enlaces con el mercado |
| Operación | Centralizada | Con la red o en forma aislada | Centralizada o descentralizada |
| Enfoque | Eficiencia técnica de elementos de la red | Eficiencia energética de la microrred | Eficiencia energética y económica de la red |
| Elementos funcionales | Control de GD, administración de mecanismos de RD | Control de GD, control de almacenamiento y RD | Coordinación/Control de GD, RD, sistemas de almacenamiento, elementos compensadores, integración de vehículos eléctricos |

3. Estructura del agente integrador

En el escenario actual de la red de distribución, se encuentra un operador de red encargado de manera centralizada de administrar empresas de distribución de energía, las cuales a su vez se encargan de abastecer usuarios representados por sus cargas respectivas. De igual forma, en la red actual se encuentran usuarios con DER que son abastecidos por las empresas de distribución y en ocasiones aparecen como soluciones aisladas de autoabastecimiento. De otra parte, tanto el operador de red como las empresas de distribución/comercialización vinculadas a él, requieren de una serie de servicios auxiliares para garantizar la calidad de la energía que están ofreciendo y a su vez para mantener los parámetros mínimos de estabilidad de la red [25].

En el escenario futuro, los DER que disponen de un nivel de energía suficiente para el autoabastecimiento de usuarios y que tienen además excedentes de energía, se transformarán en proveedores de energía y servicios auxiliares para la red a través del agente integrador, el cual a partir de ahora se denominará planta virtual de potencia a nivel de distribución (DVPP). Un servicio auxiliar se considera como los servicios requeridos que permiten a las áreas de control y entidades de compra-venta operar confiablemente en las interconexiones [46], [47]. En las DVPP, pueden participar DER de usuarios comerciales, industriales y residenciales, tanto de manera individual como colectiva. Este escenario implica que se maneje amplia variedad de flujos de información necesarios para el manejo de plantas y sistemas DER. El intercambio de información entre la DVPP, el operador en el nivel de distribución y el operador del mercado se apoyará en protocolos como el IEC 61850-7-420 [27], como puede verse en la figura 1.

El operador de mercado lleva a cabo el despacho económico y produce un único precio de contado de la electricidad dentro del sistema [28]. El operador de distribución se encarga de la operación

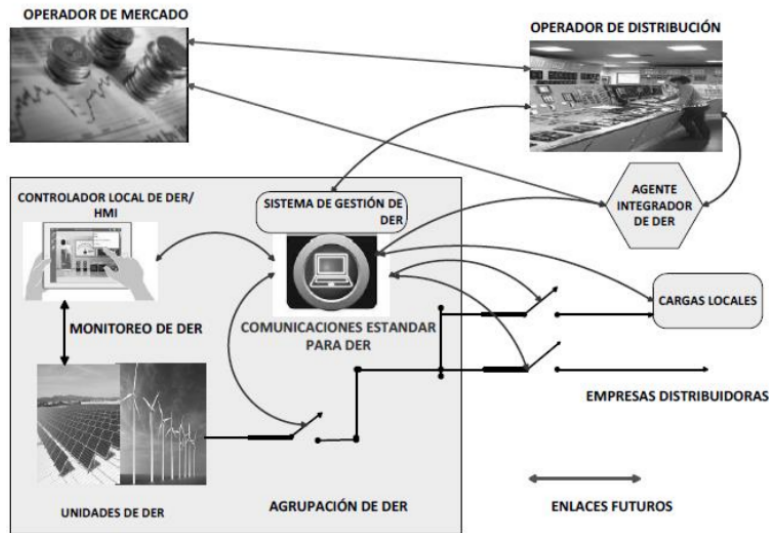


Figura 1. Interacciones de los DER con las operaciones de la red de distribución.

segura del sistema con DER, la implementación de los programas DER en su área de control, el seguimiento directo o indirecto de los sistemas DER, y la garantía de disparo de los DER en caso de emergencia, mientras que en general se garantiza el funcionamiento económico del sistema energético. Los operadores del sistema de distribución también son encargados de dirigir todo el mantenimiento y las actividades de emergencia en el sistema de potencia [29].

El sistema de gestión de DER es el encargado de conmutar los DER tanto en operaciones normales como en regímenes anómalos, de acuerdo a las necesidades de los propietarios de DER y a las obligaciones contractuales hora a hora con el sistema energético. El sistema de gestión administra varios elementos de GD, a través de interfaces hombre máquina (HMI), al igual que la conexión de cargas locales y el envío de flujos de energía hacia las redes del sistema de distribución. La coordinación de operaciones se realiza a través de protocolos estándar de comunicaciones como el IEC 61850 [30], [31].

El agente integrador o DVPP oferta dos tipos de productos energéticos: energía eléctrica y productos auxiliares, que son ofertados en un mercado energético a nivel de distribución. Este artículo se enfoca en la venta de energía. Se plantea que a través del agente integrador los DER participen de manera colectiva en un esquema de integración horizontal, junto a las empresas de distribución/comercialización en la oferta de energía eléctrica. Para la provisión de la energía a ofertar el agente integrador reúne recursos de los elementos de GD y RD.

Como puede observarse en la figura 1, se plantean como enlaces futuros el intercambio de información entre el agente integrador y el operador del mercado, y entre el operador del mercado y el operador del sistema, que deberá reaccionar de manera dinámica ante los cambios y fluctuaciones que el proceso de oferta y demanda de energía determinen.

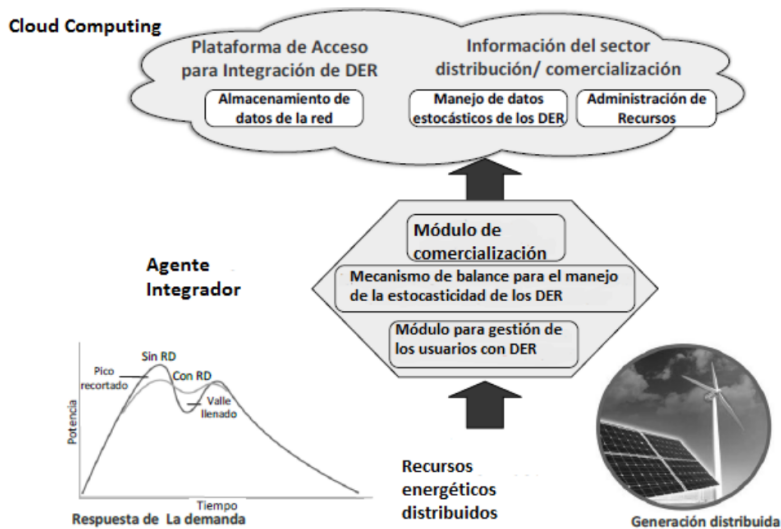


Figura 2. Diagrama básico de la estructura del agente integrador DVPP.

El agente integrador se apoya en una plataforma de acceso virtual en el espacio de *cloud computing* con la cual interactúan de manera permanente agrupaciones de DER, cada uno de los cuales puede ser supervisado por su sistema de gestión. El agente integrador se encuentra compuesto por tres módulos: el módulo de comercialización, el mecanismo de balance para el manejo de la estocasticidad de los DER y el módulo de gestión de los usuarios.

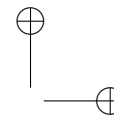
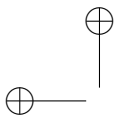
En la figura 2 se muestra un diagrama básico de la estructura del agente integrador DVPP. En la plataforma de acceso en el espacio de *cloud computing* se almacenan datos de la red tales como los flujos de potencia entre diferentes puntos, las demandas habituales de potencia que tienen usuarios en la red y las tarifas con que se esté ofertando la energía para cada tipo de usuario, regulado o no regulado, como se estipula en la legislación colombiana. De igual forma, la plataforma permite el acceso de los usuarios con DER a las tarifas que en tiempo real se estén dando para su tipo particular regulado o no regulado, y para su estrato. En la base de datos que maneja la plataforma se lleva a cabo un registro inicial de usuarios y recursos DER, en el cual indican sus coordenadas, los recursos

con que cuentan, estipulándose el tipo y niveles de potencia, lo cual permite realizar un seguimiento continuo del estado de sus recursos en tiempo real, a través de dispositivos de medición avanzada tipo Advanced Metering Infrastructure (AMI, por sus siglas en inglés) y se realice la evaluación de la estocasticidad del recurso con el fin de prever sus disponibilidades futuras para configurar ofertas de energía para la red.

Tabla II. Usuarios del agente integrador DVPP.

| Id | Coordenadas | Tipo de usuario /Estrato | Tipo de GD y Potencia | Potencia de RD disponibles |
|------|--------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|
| 0001 | Carrera 7 No 42-12 | Regulado / 3 | | |
| 0002 | Calle 43 No 7-42 | No regulado | Fotovoltaica 20 kW | |
| 0003 | Carrera 13 52-12 | No regulado | Fotovoltaica 30 kW | 40 kW |
| 0007 | Calle 61 No 13-34 | No regulado | | 60 kW |
| 0008 | Calle 45 No 19-36 | Regulado/ 1 | Eólica 10 kW | 45 kW |

En la tabla II se muestra un ejemplo con los datos que caracterizan a usuarios poseedores de DER que han accedido a la plataforma, además se muestran entre otros datos: los Id, o identificadores



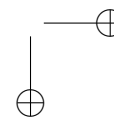
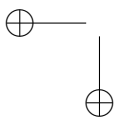
para cada usuario en la base de datos, las coordenadas de ubicación, el tipo de usuarios regulado o no-regulado, y dado el caso se identifica su estrato respectivo. De igual forma se especifica el tipo de recurso DER con que cuenta cada usuario y la potencia nominal con que puede participar en el caso de configurar una oferta, de manera adicional la plataforma recibe datos sobre el estado de potencia en tiempo real, en que los recursos de cada usuario se encuentran, esto con el fin de prever cual es el nivel en el que estará en un tiempo futuro cercano de al menos un día. La previsión del estado de los recursos energéticos con que contará el agente integrador es realizada por uno de sus módulos específicos denominado mecanismo de balance.

Las principales características de los módulos constitutivos del agente integrador se describen a continuación:

Módulo de comercialización de la oferta de energía y servicios auxiliares hacia el nivel de distribución. Este módulo recibe información desde la plataforma a fin de saber qué recursos están disponibles y en qué zonas específicas de la red se encuentran. A su vez el módulo se comunica con el mecanismo de balance que muestra los estados futuros que tendrá un determinado recurso energético en particular los asociados a fuentes renovables de energía dependientes de factores climáticos. Este módulo configura los pactos de interrumpibilidad con los usuarios que poseen RD, estipulando niveles de potencia a desconectar, tiempos de aviso previo, tiempos de duración de la interrupción y número de interrupciones durante un periodo determinado. Finalmente, el módulo tiene enlace directo con el sistema de gestión de DER.

Mecanismo de Balance para el manejo de la estocasticidad de los DER. El módulo se encarga de monitorear y controlar el estado de los elementos de GD y RD. El módulo se encarga de evaluar el estado futuro que tendrá un recurso tipo GD y la disponibilidad de recursos tipo RD de determinado grupo de usuarios en función de sus patrones habituales de consumo. De manera adicional, este módulo coordina la conexión/desconexión de los DER a la red eléctrica. Para el caso concreto, este módulo monitorea la labor de sincronización de las fuentes de GD con la red, y la posterior conexión de las fuentes de GD a los barrajes de la red dispuestos para tal fin. En el caso de RD, el mecanismo envía los avisos previos de eventual desconexión a los usuarios que han indicado el nivel de potencia que pueden interrumpir y una vez reciben la aceptación respectiva proceden a su desconexión durante los tiempos pactados en el módulo de comercialización.

Módulo de gestión de usuarios con DER. Este módulo se encarga de coordinar de manera dinámica la configuración topológica de los usuarios, es decir la forma como se agrupan para ofertar los productos energéticos y para evitar propagación de fallos en la red. En este módulo se pactan los tiempos de permanencia de los usuarios con DER, los tiempos de mantenimiento que deben tenerse en cuenta para elementos de GD y las formas de reparto de las ganancias al configurarse una venta de energía. En el módulo de gestión se maneja un algoritmo de agrupación fundamentado en la teoría de grafos, que ante una petición de energía desde el módulo de comercialización se encarga de segmentar los usuarios con DER para poder ofertar una cantidad de energía determinada. Este algoritmo de segmentación puede a su vez usarse como mecanismo de emergencia ante eventuales fallas de la red a fin de que mediante la segmentación de la red no se propaguen los fallos a todos los elementos.



4. Operación de la DVPP

En la actual estructura de la cadena energética en el nivel de distribución/comercialización y de gestión del sistema eléctrico de Colombia, la DVPP como agente integrador se muestra en las figuras 3 y 4.

La operación de la DVPP se muestra desde la perspectiva de la comercialización de los productos energéticos que se ofertarían tanto al operador de red cercano a la DVPP como al mercado de distribución existente. De allí que el centro de atención en la operación se fije en el módulo de comercialización del agente integrador, aunque debe señalarse que los demás módulos intervienen de manera tanto directa como indirecta.

En la figura 5, se muestra el diagrama de secuencia de la operación de venta de energía que llevaría a cabo el agente integrador o DVPP.

Una vez la DVPP verifica, con ayuda del mecanismo de balance de estocasticidad de los DER, la potencia de los DER que posee y evalúa la sumatoria total de excedentes, determinando la cantidad de energía y el número de horas durante las cuales puede ofertar la energía. Posteriormente, la DVPP, a través del módulo de comercialización, realiza el envío de información a las aplicaciones de Cloud Computing, y de allí al mercado energético, en el nivel de distribución. Por último, se realiza el proceso de pactar el pago entre la DVPP y el mercado.

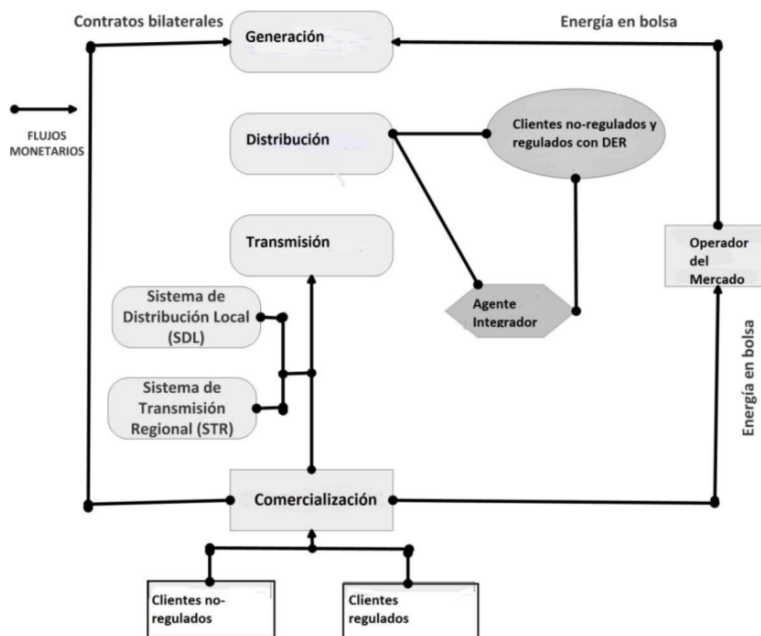


Figura 3. Cadena de producción de energía eléctrica propuesta, incluyendo el agente integrador (Adaptado de [48]).

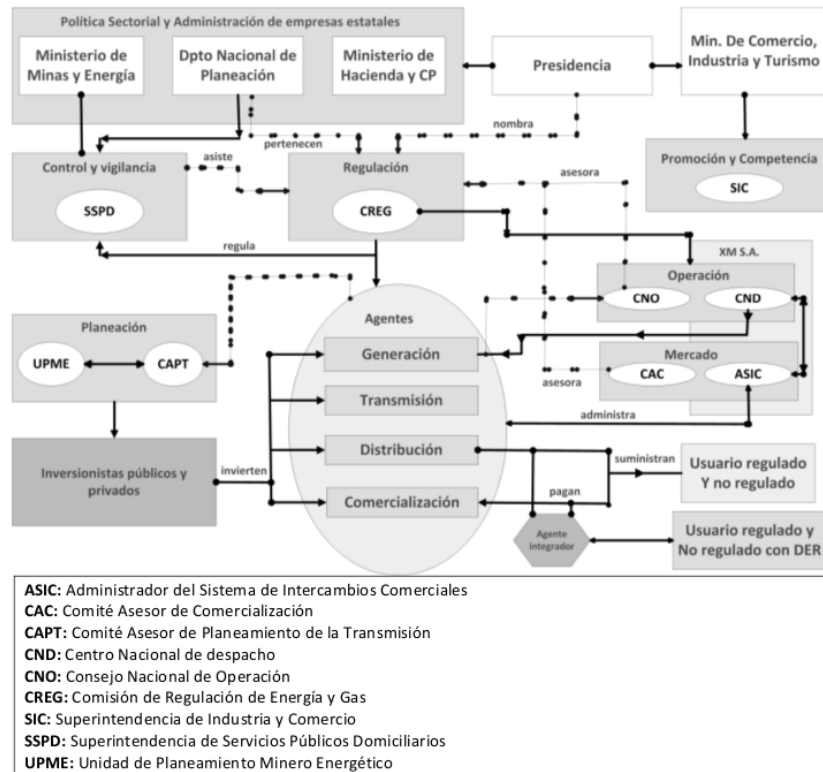


Figura 4. Estructura del mercado eléctrico desde el punto de vista organizacional y de gestión, incluyendo agente integrador de Recursos Energéticos Distribuidos (Adaptado de [49], [50]).

Para negociación del pago de la energía se propone inicialmente que al entregar la DVPP energía al mercado, ésta se pague el precio por kWh que manejan las empresas de distribución habitualmente. Esta situación puede cambiarse en el caso de que para el momento particular negocie bajo un esquema de costo de oportunidad, similar al del mercado mayoristas de generación, por ejemplo cuando existe una sobredemanda que deba cubrir la DVPP [51].

No obstante, se debe tener en cuenta que aspectos normativos que favorecen a los DER como iniciativas de generación limpia, pueden permitirles vender al precio de generación que está determinado por sus tecnologías específicas, incluso si es más alto que el del mercado [8], [52], [53].

Una opción adicional para el pago consiste en que la empresa de distribución que habitualmente abastece a los usuarios con DER, elimine de su facturación de energía los cargos por costo de compra de energía o generación por disponibilidad, confiabilidad, mantenimientos y otros cargos de tipo administrativo, durante un periodo de tiempo equivalente al necesario para pagar por la energía que la DVPP suministró.

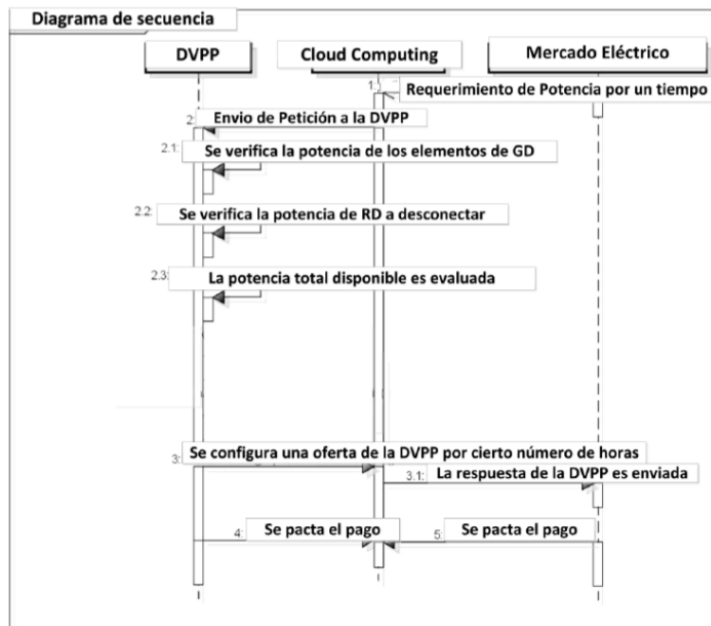


Figura 5. Diagrama de secuencia de la operación de las DVPP con el sistema energético en el nivel de distribución.

Para ilustrar dicha situación se toma como referencia la estructura tarifaria original que es propuesta por la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) [54]–[57], y que utilizan los distribuidores/comercializadores en Colombia, expresada en la ecuación (1).

$$CU_v = G + T + D + C_v + PR + R \tag{1}$$

Donde:

G es el costo de compra de energía – Generación

T es el costo por Uso del sistema de transmisión de energía

D es el costo por uso del sistema de distribución local y transmisión Regional

PR son las pérdidas Reconocidas incluyendo costos de planes de gestión de pérdidas

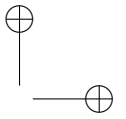
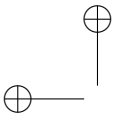
R es el costo de restricciones y servicios asociados con generación

CU_v Es el costo unitario variable, dado en pesos/kWh.

En la ecuación (2) se muestra alternativa de estructura tarifaria que se le cobrará a los usuarios agrupados en la DVPP que ofertó el servicio energético a la empresa de distribución. Es de anotar que el cargo por generación y el de uso por el sistema de transmisión se han eliminado, del que habitualmente hace la CREG [54], [56], [57]

$$CU_{vparaDVPP} = D + C_v + PR + R \tag{2}$$

Donde $CU_{vparaDVPP}$ es el costo unitario de la energía que deben pagar los usuarios agrupados en la DVPP, dado en pesos/KWh.



Una última propuesta, es que la empresa de distribución, que abastece normalmente a los usuarios con DER, aproveche el momento particular en el que una DVPP o varias DVPP, de su zona tengan posibilidad de ofertar energía y entonces adelante tareas de mantenimiento de equipos o redes en general. Como pago por la energía que entrega la DVPP, la empresa de distribución realizará una rebaja en la facturación de los usuarios para los meses siguientes hasta que se pague por la energía suministrada. En este caso en la estructura tarifaria se eliminaría el componente R, asociado al costo de restricciones y servicios asociados a la generación. De esta forma el costo unitario de la energía que deberán pagar los usuarios agrupados en la DVPP queda como aparece en la ecuación (3).

$$CU_{\text{paraDVPP}} = G + T + D + C_v + R \quad (3)$$

La entrega de la energía a la red una vez se ha pactado un precio, requiere que se realice la coordinación de operaciones para la conexión de los elementos de GD, sistemas de almacenamiento y vehículos eléctricos. En este punto debe tenerse en cuenta que el punto de conexión, así como la cantidad de energía que se inyecta a la red deben ser evaluados a fin de evitar el menor impacto en el funcionamiento estable de la red [58]–[60].

Un aspecto relevante en la propuesta es que la demanda de energía que lleguen a suplir las DVPP le permita a las empresas de distribución disminuir costos en particular costos marginales en los cuales incurrir cuando se ven forzadas a solicitar mayores cantidades de energía a los generadores. De la misma forma, para los generadores los costos en aspectos como arranque y la sincronización de operación se reduciría por cuanto ya no tendrán que llamarse de manera intempestiva en escenarios de sobredemanda [61]–[63].

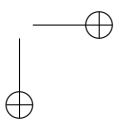
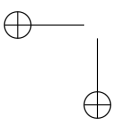
5. Conclusiones

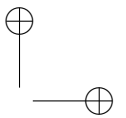
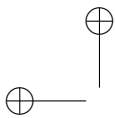
El agente integrador DVPP permite que a través de los DER agrupaciones de usuarios puedan participar como oferentes de energía en un mercado energético a nivel de distribución.

Dentro de los alcances del trabajo propuesto por los autores no se consideran en el momento topologías particulares de conexión de los usuarios en la red. No obstante, ya se han iniciado pruebas en ese sentido para evaluar los efectos en el cambio de perfil de la tensión en la red al momento de realizar desconexión de múltiples usuarios que quieran atender un servicio de disminución de potencia dentro de un programa de RD. De otra parte, la inclusión de las fuentes de GD se evalúa desde el punto de vista de la disponibilidad del recurso y su impacto en la red.

La utilización de las DVPP permite que la red eléctrica pueda de forma dinámica adaptarse a escenarios con inclusión de nuevos oferentes de energía. La inclusión de la DVPP dentro de la cadena energética y la estructura actual de gestión del sistema eléctrico permite que se potencialice la operatividad de todo el sistema energético, permitiendo que los usuarios propietarios de DER entren de manera transparente, para otros usuarios convencionales, en el proceso de oferta de energía a la red.

La utilización de aplicaciones de *cloud computing* destinadas al envío de información entre el mercado, las DVPP, operadores de red y empresas de distribución permite que se dé una integración





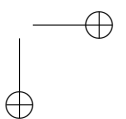
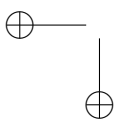
de tipo horizontal entre los diferentes actores de la red, borrando las fronteras entre consumidores y proveedores de servicios energéticos, lo cual redundará en una mejora de criterios de desempeño económico para la red ante situaciones de emergencia como las sobredemandas, y la obtención de precios de la energía más bajos al haber una mayor cantidad de oferentes de energía.

La posibilidad de utilizar diferentes esquemas de pago por la energía que las DVPP ofertan permite que el mercado eléctrico a nivel de distribución se dinamice, e incluso puedan en un momento dado ofertarse servicios a nivel de transmisión y generación.

Algunas de las debilidades y restricciones del trabajo propuesto radican en el cambio de paradigma que deben tener las empresas distribuidoras y de comercialización de energía frente al hecho de que los usuarios tomen una participación activa dentro del negocio del abastecimiento energético y estén inmersos en una dinámica de cambio constante que los ubique de cuando en cuando como consumidores y como proveedores de energía y de servicios.

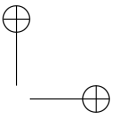
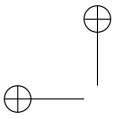
Referencias

- [1] B. Wojszczyk, "Deployment of advanced Smart Grid solutions - Global examples & lessons learned". *Innov. Smart Grid Technol. (ISGT), 2012 IEEE PES*, p. 1, 2012. ↑[307](#)
- [2] N.-K. C. Nair and L. Zhang, "SmartGrid: Future networks for New Zealand power systems incorporating distributed generation". *Energy Policy*, vol. 37, no. 9, pp. 3418–3427, 2009. ↑[307](#), [309](#)
- [3] J. Figueiredo and J. Martins, "Energy Production System Management - Renewable Energy Power Supply Integration with Building Automation System". *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 6, pp. 1120–1126, 2010. ↑[307](#), [310](#)
- [4] N. R. Friedman, *Distributed energy resources interconnection systems: technology review and research needs*. no. September, pp. 1–163, 2002. ↑[307](#)
- [5] N. González-Cabrera, et al. "Nodal user's demand response based on incentive based programs". *J. Mod. ...*, vol. 5, pp. 79–90, 2017. ↑[307](#)
- [6] H. Ren, W. Zhou, W. Gao, and Q. Wu, "Promotion of Energy Conservation in Developing Countries through the Combination of ESCO and CDM: A Case Study of Introducing Distributed Energy Resources into Chinese Urban Areas". *Energy Policy*, vol. 39, no. 12, pp. 8125–8136, 2011. ↑[308](#)
- [7] a Ipakchi, "Issues, Challenges and Opportunities for Utilization of Demand-side Resources in Support of Power System Operations". *Innov. Smart Grid Technol. (ISGT), 2012 IEEE PES*, p. 1, 2012. ↑[308](#)
- [8] E. Mashhour and S. M. Moghaddas-Tafreshi, "Integration of Distributed Energy Resources into Low Voltage Grid: A Market-based Multiperiod Optimization Model". *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 4, pp. 473–480, 2010. ↑[308](#), [317](#)
- [9] M. Hyland, "Restructuring European Electricity Markets e A Panel Data Analysis". *Util. Policy*, vol. 38, pp. 33–42, 2016. ↑[308](#)
- [10] C.-D. Dumitru and A. Gligor, "A Management Application for the Small Distributed Generation Systems of Electric Power Based on Renewable Energy". *Procedia Econ. Financ.*, vol. 15, no. 14, pp. 1428–1437, 2014. ↑[308](#)
- [11] L. I. Dulău, M. Abrudean, and D. Bică, "SCADA Simulation of a Distributed Generation System with Storage Technologies". *Procedia Technol.*, vol. 19, pp. 665–672, 2015. ↑[308](#), [310](#)
- [12] M. Soshinskaya, W. H. J. Crijns-Graus, J. M. Guerrero, and J. C. Vasquez, "Microgrids: Experiences, Barriers and Success Factors". *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 659–672, 2014. ↑[308](#), [310](#)
- [13] K. De Brabandere, K. Vanthournout, J. Driesen, G. Deconinck, and R. Belmans, "Control of Microgrids". *2007 IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, no. June, pp. 1–7, 2007. ↑[308](#), [310](#)
- [14] A. Karabiber, C. Keles, A. Kaygusuz, and B. B. Alagoz, "An Approach for the Integration of Renewable Distributed Generation in hybrid DC/AC microgrids". *Renew. Energy*, vol. 52, pp. 251–259, 2013. ↑[308](#), [310](#)



- [15] O. Palizban, K. Kauhaniemi, and J. M. Guerrero, "Microgrids in Active Network Management - Part I: Hierarchical Control, Energy Storage, Virtual Power Plants, and Market Participation". *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 36, pp. 428–439, 2014. ↑308, 310
- [16] T. Basso and R. DeBlasio, "IEEE Smart Grid Series of Standards IEEE 2030 (Interoperability) and IEEE 1547 (Interconnection) Status". *Grid-Interop*, vol. 2030, no. September, pp. 5–8, 2011. ↑308
- [17] C. Lo Prete and B. F. Hobbs, "A Cooperative Game Theoretic Analysis of Incentives for Microgrids in Regulated Electricity Markets". *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 524–541, 2016. ↑308, 311
- [18] D. Pudjianto, D. Pudjianto, C. Ramsay, C. Ramsay, G. Strbac, and G. Strbac, "Virtual Power Plant and System Integration of Distributed Energy Resources". *Renew. Power Gener. IET*, vol. 1, no. 1, pp. 10–16, 2007. ↑308, 311
- [19] A. a. Bayod-Rújula, "Future Development of the Electricity Systems with Distributed Generation". *Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 377–383, 2009. ↑308, 311
- [20] M. Giuntoli and D. Poli, "Optimized Thermal and Electrical Scheduling of a Large Scale Virtual Power Plant in the Presence of Energy Storages". *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 942–955, 2013. ↑308, 311
- [21] P. B. Andersen, B. Poulsen, M. Decker, C. Traeholt, and J. Ostergaard, "Evaluation of a Generic Virtual Power Plant framework using Service Oriented Architecture". *2008 IEEE 2nd Int. Power Energy Conf.*, pp. 1212–1217, 2008. ↑308, 311
- [22] L. A. Arias, E. Rivas, and C. Vega, *Propuesta de diseño para un centro integral de reciclaje con inclusión de fuentes alternativas de energía*, 2014. ↑309, 311
- [23] M. Schäfer, O. Gretzschel, T. G. Schmitt, and H. Knerr, "Wastewater Treatment Plants as System Service Provider for Renewable Energy Storage and Control Energy in Virtual Power Plants – A Potential Analysis". *Energy Procedia*, vol. 73, pp. 87–93, 2015. ↑309, 311
- [24] K. Dietrich, J. M. Latorre, L. Olmos, and A. Ramos, "Modelling and Assessing the Impacts of Self Supply and Market-Revenue driven Virtual Power Plants". *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 462–470, 2015. ↑309, 311
- [25] A. Gubina, "Ancillary Services in the Distribution Network: Where are the Opportunities?". no. December, 2015. ↑309, 312
- [26] International Energy Agency, "World Energy Outlook 2013". *Agencia Int. Energía*, p. 7, 2013. ↑309
- [27] F. M. Cleveland, "IEC 61850-7-420 Communications Standard for Distributed Energy Resources (DER)". *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, pp. 5–8, 2008. ↑309, 312
- [28] T. Logenthiran, D. Srinivasan, and A. M. Khambadkone, "Multi-agent System for Energy Resource scheduling of Integrated Microgrids in a Distributed System". *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 1, pp. 138–148, 2011. ↑309, 312
- [29] H. K. Zadeh and M. Manjrekar, "A Novel IEC 61850-based Distribution line/cable Protection Scheme Design". *2012 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. ISGT 2012*, pp. 1–6, 2012. ↑309, 313
- [30] M. Wierzbowski and B. Olek, "Integration of the Embedded Generation into Distribution Systems at the Competitive Markets". *Isgt 2014*, pp. 1–5, 2014. ↑309, 313
- [31] H. Dawidczak and H. Englert, "Integration of DER Systems into the Electrical Power System with a Generic IEC 61850 Interface". *Int. ETG-Kongress*, vol. 9, pp. 1–5, 2013. ↑309, 313
- [32] K. Christakou, "Sustainable Energy , Grids and Networks A unified Control Strategy for Active Distribution Networks Via Demand Response and Distributed Energy Storage Systems". *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 6, no. xxxx, pp. 1–6, 2016. ↑310
- [33] C.-D. Dumitru and A. Gligor, "SCADA Based Software for Renewable Energy Management System". *Procedia Econ. Financ.*, vol. 3, no. 12, pp. 262–267, 2012. ↑310
- [34] A. Colmenar-Santos, C. Reino-Rio, D. Borge-Diez, and E. Collado-Fernández, "Distributed Generation: A Review of Factors that can contribute Most to Achieve a Scenario of DG Units Embedded in the New Distribution Networks". *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 59, pp. 1130–1148, 2016. ↑310
- [35] R. H. Lasseter, "Microgrids and Distributed Generation". *J. Energy Eng.*, vol. 133, no. 3, pp. 144–149, 2007. ↑310
- [36] Arias I Ramírez a., chica a., *MicroRed inteligente sustentable de biogás para zona no interconectada*, 2013. ↑310
- [37] M. Bayat, K. Sheshyekani, M. Hamzeh, and A. Rezaadeh, "Coordination of Distributed Energy Resources and Demand Response for Voltage and Frequency Support of MV Microgrids". *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1506–1516, 2016. ↑310
- [38] T. Basso and N. Friedman, "IEEE 1547 National Standard for Interconnecting Distributed Generation : How Could It Help My Facility ?". <http://www.osti.gov/bridge> Available, no. November, p. 9, 2003. ↑310
- [39] J. Lai, H. Zhou, X. Lu, and Z. Liu, "Distributed Power Control for DERs based on Networked Multiagent Systems

- with Communication Delays”. *Neurocomputing*, vol. 179, pp. 135–143, 2016.↑310
- [40] T. Sowa, S. Krengel, S. Koopmann, and J. Nowak, “Multi-criteria Operation Strategies of Power-to-heat- Systems in Virtual Power Plants with a High Penetration of Renewable Energies”. *Energy Procedia*, vol. 46, pp. 237–245, 2014.↑311
- [41] E. C. N. Vega, O. David Florez Cediell, L. A. A. Barragan, and E. Rivas, “Distribution Networks Management System with Multi-target Operations using UML”. *2014 Ieee Andescon*, pp. 1–1, 2014.↑311
- [42] A. G. Zamani, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, “Day-ahead Resource Scheduling of a Renewable Energy Based Virtual Power Plant”. *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 324–340, 2016.↑311
- [43] P. Ringler, D. Keles, and W. Fichtner, “Agent-based Modelling and Simulation of Smart Electricity Grids and Markets – A Literature Review”. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 57, pp. 205–215, 2016.↑311
- [44] A. K. Basu, S. P. Chowdhury, S. Chowdhury, and S. Paul, “Microgrids: Energy Management by Strategic Deployment of DERs—A Comprehensive Survey”. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 9, pp. 4348–4356, 2011.↑311
- [45] N. Etherden, V. Vyatkin, and M. Bollen, “Virtual Power Plant for Grid Services using IEC 61850”. *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 3203, no. c, pp. 1–1, 2015.↑311
- [46] K. R. S. Kashyap and B. D. Reddy, “Ancillary Services And Stability Analysis Of Distributed Generation System”. vol. 3, no. 3, pp. 247–251, 2013.↑312
- [47] S. C. Quintero, “Ancillary Services Review in Electrical Power Systems in deregulated Market”. 2013.↑312
- [48] A. S. Financieros, *Sector de comercialización de energía eléctrica 2014-2015*, pp. 1–5, 2015.↑316
- [49] Unidad de Planeación Minero - Energética (UPME), “Una Visión del Mercado Eléctrico Colombiano”. *Merc. Energía Eléctrica en Colomb. -Análisis Comer. y Estrategias*, pp. 1–110, 2004.↑317
- [50] Unidad de Planeamiento Minero Energético and Banco Interamericano de Desarrollo, *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*. 2015.↑317
- [51] D. A. Arenas, . *Mercado spot de energía y modelo alternativo para la fijación de un precio eficiente*. pp. 1–37, 2014.↑317
- [52] J. Gordijn and H. Akkermans, “Business Models for Distributed Generation in a Liberalized Market Environment”. vol. 77, pp. 1178–1188, 2007.↑317
- [53] M. Junjie, W. Yulong, and L. Yang, “Size and Location of Distributed Generation in Distribution System Based on Immune Algorithm,” . *Syst. Eng. Procedia*, vol. 4, no. 2011, pp. 124–132, 2012.↑317
- [54] CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), *Metodología para la remuneración de la actividad de comercialización de energía eléctrica a usuarios regulados*. Cartilla, 2012.↑318
- [55] CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), *Tarifas de energía eléctrica ARIFAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA (\$ / kWh) reguladas por la comisión de regulación de energía y gas (CREG)*. 2015.↑318
- [56] CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas), *Creg138-2015*. 2015.↑318
- [57] CREG (Comisión de Regulación and de E. y Gas), *Creg240-2015*. 2015.↑318
- [58] J. Hu, A. Saleem, S. You, L. Nordström, M. Lind, and J. Østergaard, “A Multi-Agent System for Distribution Grid Congestion Management with Electric Vehicles”. *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 38, pp. 45–58, 2015.↑319
- [59] K. M. Muttaqi, A. D. T. Le, M. Negnevitsky, and G. Ledwich, “An Algebraic Approach for Determination of DG Parameters to Support Voltage Profiles in Radial Distribution Networks”. *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 3, pp. 1351–1360, 2014.↑319
- [60] T. Soares, F. Pereira, H. Morais, and Z. Vale, “Cost Allocation Model for Distribution Networks considering High Penetration of Distributed Energy Resources”. *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 124, pp. 120–132, 2015.↑319
- [61] D. R. Biggar and M. R. Hesamzadeh, *The Economics of Electricity Markets*. 2014.↑319
- [62] A. Nieto, “Optimizing Prices for Small-scale Distributed Generation Resources: A review of Principles and Design Elements”. *Electr. J.*, vol. 29, no. 3, pp. 31–41, 2016.↑319
- [63] M. Engelken, B. Römer, M. Drescher, I. M. Welpel, and A. Picot, “Comparing Drivers, Barriers, and Opportunities of Business Models for Renewable Energies: A review”. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 795–809, 2016.↑319



Luis Alejandro Arias Barragán

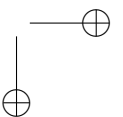
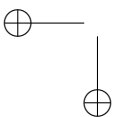
Ingeniero electromecánico, Universidad Politécnica Estatal de Kharkov, Ucrania; magister en Ciencias de la Información y las Telecomunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; doctorando en Ingeniería Universidad Distrital Francisco José de Caldas; docente investigador de la Universidad Autónoma de Colombia durante 5 años en el área de Ingeniería Electromecánica, Universidad Autónoma de Colombia; investigador al grupo GCEM donde realiza estudios sobre integración de Recursos Energéticos Distribuidos.
Correo electrónico: lincarias@yahoo.com

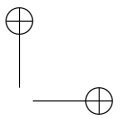
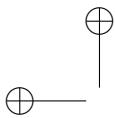
Edwin Rivas Trujillo

Ingeniero Eléctrico, Universidad del Valle; magister en Ingeniería Eléctrica, Universidad del Valle de Cali y Universidad Calos III de Madrid-España; PhD en la Universidad Carlos III, de Madrid, España; docente en el área de Ingeniería Eléctrica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; investigador al grupo GCEM donde realiza estudios sobre compatibilidad electromagnética y redes eléctricas.
Correo electrónico: erivast@udistrital.edu.co

Francisco Santamaría

Ingeniero Electricista; magister en Ingeniería Eléctrica y doctor en Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia; profesor asociado en el proyecto en Ingeniería Eléctrica y el doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; investigador al grupo GCEM donde realiza estudios sobre interferencia electromagnética, vehículos eléctricos y generación distribuida.
Correo electrónico: fsantamariap@udistrital.edu.co





Application of Analytical Uncertainty Costs of Solar, Wind and Electric Vehicles in Optimal Power Dispatch

Aplicación de Costos de Incertidumbre Analíticos de Energía Solar, Eólica y Vehículos Eléctricos en el Despacho Óptimo de Potencia

Juan Arévalo¹, Fabian Santos¹, Sergio Rivera^{*,1}

¹Universidad Nacional de Colombia

*Correspondence: sriverar@unal.edu.co

Received: 08/03/2017. Modified: 05/06/2017-. Accepted: 07/07/2017.

Abstract

Context: Currently, renewable energy sources are playing an important role in counteracting the environmental impact of traditional energy sources. For this reason, system operators must have analytical tools that allow them to incorporate these new forms of energy. In electrical power systems, when incorporating renewable resources such as photovoltaic solar generation, wind power generation or electric vehicles, uncertainty is introduced due to the stochasticity of primary resources.

Method: Uncertainty costs are proposed that incorporate the injected power variability of the main sources of renewable energy (solar and wind) and the consumed power (electric vehicles). Variability is considered by the probability distributions of the primary sources of renewable energy (solar irradiation and wind speed).

Results: The main result of this research is the application of analytical costs of uncertainty. In this way it is possible to modify the cost function of a traditional economic dispatch. Additionally, it is proposed to solve the problem with a heuristic optimization method of economic dispatch of active-reactive power. Finally, a comparison is made with the operating cost of the system without the incorporation of renewable energies.

Conclusions: The proposed model in this article is a potential decision-making tool that power system operators may consider in the operation of the system. The tool is capable of considering the uncertainties of the primary sources of renewable energy. The probability distribution of the primary source forecast is assumed to be known. An opportunity in order to extend the model is to study its applicability to dynamic time horizons, contemplating the constraints of the unit commitment problem.

Keywords: Economic dispatch, Renewable energy, Uncertainty cost.

Language: Spanish.

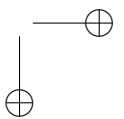
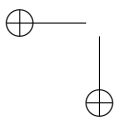
Open access



Cite this work as: J. Arévalo, F. Santos, S. Rivera, "Application of Analytical Uncertainty Costs of Solar, Wind and Electric Vehicles in Optimal Power Dispatch", Ingeniería, vol. 22, no. 3, pp. 324-346, 2017.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.11673>



Resumen

Contexto: Actualmente las fuentes de energía renovables están jugando un importante rol para contrarrestar el impacto ambiental de las fuentes de energía tradicional. Por esto, los operadores del sistema deben contar con herramientas de análisis que le permitan incorporar estas nuevas formas de energía. En los sistemas eléctricos de potencia que incorporan recursos renovables y vehículos eléctricos, se introduce incertidumbre debido a la estocasticidad de los recursos primarios y los patrones de conducción de los vehículos.

Método: Para las incertidumbres señaladas, se proponen costos de incertidumbre que incorporan la variabilidad de potencia inyectada de las principales fuentes de energía renovable (solar y eólica) y la potencia consumida (vehículos eléctricos). La variabilidad es considerada mediante las distribuciones de probabilidad de las fuentes primarias de la energía renovable (irradiación solar y velocidad del viento).

Resultados: El principal resultado de esta investigación es la aplicación de los costos analíticos de incertidumbre. De esta manera es posible modificar la función de costos de un despacho económico tradicional. Adicionalmente se propone solucionar el problema con un método de optimización heurística de despacho óptimo de potencia activa-reactiva. Finalmente, se realiza una comparación con el costo de operación del sistema sin la incorporación de energías renovables.

Conclusiones: El modelo propuesto en este artículo constituye una posible alternativa de toma de decisiones que los operadores de los sistemas de potencia pueden considerar en la operación del sistema que es capaz de considerar las incertidumbres de las fuentes primarias de la energía renovable. Para ello se supone conocida la distribución de probabilidad del pronóstico de la fuente primaria. Como oportunidad de extensión de este estudio se destaca su aplicabilidad a horizontes de tiempo dinámicos, contemplando las restricciones propias de la comisión de unidades.

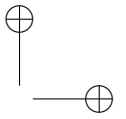
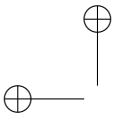
Palabras clave: Costo de incertidumbre, Despacho económico, Energía renovable.

Idioma: Español

1. Introducción

Cuando se incorporan recursos renovables como la generación solar fotovoltaica, generación con energía eólica o vehículos eléctricos, se introduce incertidumbre en cuanto a la disponibilidad de potencia en el sistema, debido a la estocasticidad de los recursos primarios [1]. Dicha incertidumbre es indeseada en la programación del despacho de energía y se identifica como una de las barreras que ha impedido la alta penetración de los recursos renovables en los sistemas de generación.

Con el propósito de asignar un costo a la incertidumbre presentada en los recursos renovables, tradicionalmente se han utilizado simulaciones de Montecarlo [2]–[4]. Si bien tales simulaciones dan resultados que consideran la variabilidad de las fuentes primarias de energía (irradiación solar y velocidad del viento), implican gran número de escenarios a simular [4]. A fin de disminuir el número de escenarios a simular se requiere que los costos de incertidumbre sean modelados con una expresión analítica. En el documento [5] se presenta una propuesta de costos de incertidumbre desarrollada con base en modelos probabilísticos del comportamiento de la velocidad del viento. En [6] se extiende la modelación anterior a vehículos eléctricos. En [1] se desarrolla en detalle la modelación analítica de costos de incertidumbre para el comportamiento de la velocidad del viento y los patrones de manejo de los vehículos eléctricos; además se extiende la modelación a sistemas de generación fotovoltaica, modelando la probabilidad de distribución de la irradiación solar. De esta manera, la propuesta de costos de incertidumbre tiene la finalidad de aumentar la penetración



de los recursos renovables en los sistemas de generación, ya que es una herramienta de planeación del sistema con renovables, sin afectar la disponibilidad de potencia en la demanda y brindando una solución económicamente viable en el despacho económico.

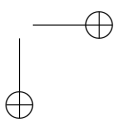
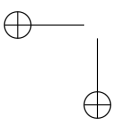
Los costos de incertidumbre requieren modelos probabilísticos de las fuentes primaria de generación renovable, así, en este trabajo se plantean modelos probabilísticos en ubicaciones geográficas del territorio colombiano para generación solar fotovoltaica y generación eólica. Los nodos del sistema con renovables se consideran en puntos estratégicos con alto potencial de irradiancia solar para la generación fotovoltaica y puntos con velocidades de viento altas y constantes para la generación con energía eólica. De esta manera se plantea realizar el despacho óptimo de potencia activa-reactiva para un sistema de potencia que incorpora fuentes de generación renovable, modelados con funciones de costos de incertidumbre. Estos costos de incertidumbre son ecuaciones analíticas no polinómicas ([1]) en función de la potencia programada para los nodos de generación renovable, luego son introducidos como costos de generación en un sistema de potencia que contiene nodos con generación convencional modelados con funciones de costos polinómicas tradicionales.

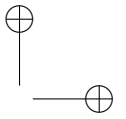
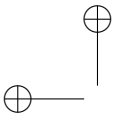
El despacho óptimo de potencia busca minimizar la función de costo total de generación del sistema, que para el presente caso es una función no polinómica y no convexa, ya que se consideran los costos de incertidumbre analíticos. Debido a las propiedades de este problema de optimización (función objetivo no convexa, con restricciones no lineales correspondientes a un sistema de ecuaciones algebraicas para el flujo de potencia) se plantea solucionar el problema con optimización heurística. La otra razón de esta decisión, es que en la formulación del problema se plantean elementos de maniobra (taps de transformadores y capacitores shunt) como variables de decisión discretas. Se decidió implementar el algoritmo de optimización heurístico Differential Evolutionary Particle Swarm Optimization (DEEPSO, por sus siglas en inglés) aplicado al sistema de potencia con fuentes renovables modeladas con funciones de costos de incertidumbre. Tal algoritmo fue el que ganó la competencia internacional IEEE “Application of Modern Heuristic Optimization Algorithms for Solving Optimal Power Flow Problems” de la Power & Energy Society (PES por sus siglas en inglés) [7]. No obstante se pueden utilizar otras técnicas heurísticas.

Este artículo está estructurado de la siguiente manera: inicialmente se exponen la formulación matemática de los costos involucrados en la función de costos a minimizar en el despacho óptimo de potencia en la segunda sección. En la tercera sección se describen las funciones de costos de incertidumbre para cada fuente renovable a implementar. En la cuarta sección se realiza la descripción del sistema de potencia dentro de cual se introducen los nodos con generación renovable, allí se pretende solucionar el problema de despacho económico. En la quinta sección se describe el algoritmo de optimización heurístico implementado para realizar la simulación del despacho óptimo de potencia y finalmente se presentan el análisis de resultados y conclusiones.

2. Planteamiento matemático de función de costos a minimizar

En esta sección se realiza el planteamiento matemático de los costos involucrados en la función de costos totales de generación en un sistema que modela los nodos renovables con la propuesta





de costos de incertidumbre. Para ello se proponen unos costos de penalización, con esta definición se proceden a definir los costos de incertidumbre, se muestra los costos polinómicos de los generadores tradicionales y finalmente se plantea la función objetivo de costo total de generación.

2.1. Costos de penalización

Los costos de penalización son propuestos en [1], [5], los cuales son una adición a los costos operativos de generación de energía y se producen cuando dentro del despacho se programa una potencia $W_{s,i}$ la cual subestima o sobrestima la potencia disponible $W_{av,i}$ en un nodo con recursos renovables.

2.1.1. Costos por subestimar

Son costos de penalización generados cuando la potencia programada $W_{s,i}$ es menor que la potencia disponible $W_{av,i}$ en un recurso renovable.

$$W_{s,i} < W_{av,i} \quad (1)$$

De esta forma se puede definir una función de costos debidos a subestimar la potencia disponible, como:

$$C_{u,i}(W_{s,i}, W_{av,i}) = c_{u,i}(W_{av,i} - W_{s,i}) \quad (2)$$

La función de costos (2) asocia un coeficiente de penalización $c_{u,i}$ por subestimar, el cual debe ser definido por el operador del sistema. Este coeficiente ($c_{u,i}$) corresponde al costo por utilizar la diferencia entre la potencia disponible y la potencia programada (que es el valor de inyección que más le conviene a la red) en otra actividad, como almacenamiento de energía si existe disponible, en vez de utilizarla directamente en la red.

2.1.2. Costos por sobrestimar

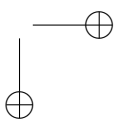
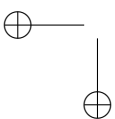
Son costos de penalización generados cuando la potencia programada $W_{s,i}$ es mayor que la potencia disponible $W_{av,i}$ en un recurso renovable.

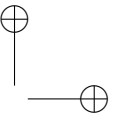
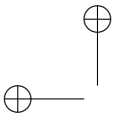
$$W_{av,i} < W_{s,i} \quad (3)$$

De esta forma se puede definir una función de costos debidos a sobrestimar la potencia disponible, como:

$$C_{o,i}(W_{s,i}, W_{av,i}) = c_{o,i}(W_{s,i} - W_{av,i}) \quad (4)$$

La función de costos (4) asocia un coeficiente de penalización $c_{o,i}$ por sobrestimar, el cual debe ser definido por el operador del sistema. Este coeficiente ($c_{o,i}$) corresponde al costo por adquirir la diferencia entre la potencia programada y la potencia disponible, como generadores diesel si existen disponibles en el nodo de generación renovable, de tal manera que se inyecte lo que mas le convenga a la red.





2.2. Costos de incertidumbre

Los costos de incertidumbre se definen como el valor esperado de las funciones de costos de penalización por subestimar (2) y por sobrestimar (4), las expresiones analíticas de costos de incertidumbre aplicados a generación fotovoltaica, eólica y vehículos eléctricos conectados a red se muestran en la sección 3.

2.3. Costos polinómicos

Los generadores de energía convencionales térmicos se modelan por medio de una función de costos polinómica comúnmente de orden dos [8], proveniente de la curva de costo del combustible, de la siguiente forma:

$$C_i(P_{s,i}) = \alpha_i + \beta_i P_{s,i} + \gamma_i P_{s,i}^2 \quad (5)$$

Adicionalmente, los operadores de red de sistemas de los diferentes países pueden tener sus propias funciones de costo para los generadores convencionales que se pueden expresar en forma de polinomios [9].

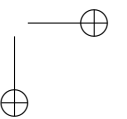
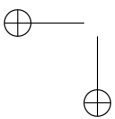
2.4. Costo total de generación

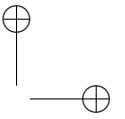
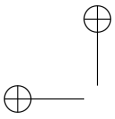
La función de costos totales de generación del sistema, a minimizar en el nuevo problema de despacho económico con función objetivo no convexa, se describe de la forma:

$$\begin{aligned} C_{total} = & \sum_{i=1}^{N_c} C_{c,i}(P_{c,s,i}) \\ & + \sum_{i=1}^{N_{PV}} C_{PV,u,i}(W_{PV,s,i}, W_{PV,i}) + \sum_{i=1}^{N_{PV}} C_{PV,o,i}(W_{PV,s,i}, W_{PV,i}) \\ & + \sum_{i=1}^{N_w} C_{w,u,i}(W_{w,s,i}, W_{w,i}) + \sum_{i=1}^{N_w} C_{w,o,i}(W_{w,s,i}, W_{w,i}) \\ & + \sum_{i=1}^{N_e} C_{e,u,i}(P_{e,s,i}, P_{e,i}) + \sum_{i=1}^{N_e} C_{e,o,i}(P_{e,s,i}, P_{e,i}) \end{aligned} \quad (6)$$

donde:

- N_c es el número total de generadores convencionales.
- N_{PV} es el número total de generadores fotovoltaicos.
- N_w es el número total de generadores eólicos.
- N_e es el número total de nodos con vehículos conectados.
- $P_{c,s,i}$ es la potencia programada en el generador convencional i .
- $W_{PV,s,i}$ es la potencia programada en el generador fotovoltaico i .
- $W_{w,s,i}$ es la potencia programada en el generador eólico i .
- $P_{e,s,i}$ es la potencia programada en el nodo con conexión de vehículos i .
- $W_{PV,i}$ es la potencia disponible en el generador fotovoltaico i .





- $W_{w,i}$ es la potencia disponible en el generador eólico i .
 $P_{e,i}$ es la potencia disponible en el nodo con conexión de vehículos i .
 $C_{c,i}$ es la función de costos del generador convencional i .
 $C_{PV,u,i}$ es la función de costos por subestimar del generador fotovoltaico i .
 $C_{PV,o,i}$ es la función de costos por sobrestimar del generador fotovoltaico i .
 $C_{w,u,i}$ es la función de costos por subestimar del generador eólico i .
 $C_{w,o,i}$ es la función de costos por sobrestimar del generador eólico i .
 $C_{e,u,i}$ es la función de costos por subestimar del nodo con conexión de vehículos i .
 $C_{e,o,i}$ es la función de costos por sobrestimar del nodo con conexión de vehículos i .

En (6) se puede ver que la función de costo total incluye los costos de generación con agentes convencionales y la propuesta de costos de incertidumbre por subestimar y sobrestimar lo disponible en las fuentes renovables; además se omiten los costos de operación directos (o propios de generación) para los agentes renovables, lo cuales no se toman en cuenta dentro de este estudio ya que se considera que el recurso primario es gratis (sol y viento).

3. Costos de incertidumbre: generación solar, eólica y cargas activas (vehículos eléctricos)

En esta sección se describen las funciones de costos de incertidumbre para casos particulares de generación solar, generación con energía eólica y vehículos eléctricos conectados a la red. Inicialmente se desarrollan los modelos probabilísticos de la potencia disponible en estos recursos.

3.1. Descripción de fuentes de energía renovable

Como se define en la sección 2, los costos de incertidumbre son el valor esperado de los costos de penalización, y dado que los costos de penalización son función de la potencia disponible $W_{av,i}$ en el recurso renovable, se debe realizar el modelo probabilístico de la energía primaria para cada recurso primario y luego hallar su expresión en términos de la potencia disponible.

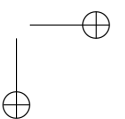
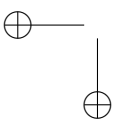
a) Energía solar

- **Función de distribución de probabilidad solar:** el recurso primario de la energía solar fotovoltaica es la irradiancia ([10]), la cual es dependiente de la ubicación geográfica de los paneles. Varias investigaciones se han hecho para hallar la distribución de probabilidad de la irradiancia, como la implementada en [11], en donde una de las funciones de distribución de probabilidad es la Log-normal:

$$f_G(G) = \frac{1}{G\beta\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ln(G)-\lambda)^2}{2\beta^2}} \quad 0 < G < \infty \quad (7)$$

donde:

- $f_G(G)$ es la función de densidad de probabilidad lognormal.
 G es la irradiancia solar.



- λ es la media de la distribución Log-normal.
- β es la desviación estándar de la distribución Log-normal.

- **Potencia de un panel solar fotovoltaico:** la potencia que se desarrolla en un panel fotovoltaico se puede expresar como [12]:

$$W_{PV}(G) = \begin{cases} W_{PVr} \cdot \frac{G^2}{G_r R_c}, & 0 < G < R_c \\ W_{PVr} \cdot \frac{G}{G_r}, & G > R_c \end{cases} \quad (8)$$

donde:

- $W_{PV}(G)$ es la potencia fotovoltaica generada como función de la irradiancia.
- G es la irradiancia solar.
- G_r es la irradiancia estándar en el ambiente.
- R_c es un valor de irradiancia de referencia.
- W_{PVr} es la potencia nominal de salida de la celda fotovoltaica.

Como se observa en la ecuación (8), el panel convierte radiación en potencia de forma cuadrática hasta un punto R_c en el que la expresión comienza a ser lineal.

b) Energía eólica

- **Función de distribución de probabilidad del viento:** la variable que define la energía eólica es la velocidad del viento, que para diferentes ubicaciones geográficas presenta variados comportamientos, sin embargo, en artículos como [5], [13] se ha mostrado que el viento tiene una distribución de probabilidad Weibull, cuyos parámetros dependen de la ubicación geográfica:

$$f_v(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-(v/c)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (9)$$

donde:

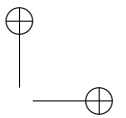
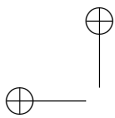
- $f_v(v)$ es la función de densidad de probabilidad para la velocidad del viento.
- v es la velocidad del viento.
- c [$\frac{m}{s}$] factor de escala en un lugar geográfico. Típicamente entre 5-8 [5].
- k factor de forma que también depende de la ubicación geográfica, no tiene dimensiones. Típicamente entre 1-3 [5].

Tomando el factor de forma k como 2 y el factor de escala c como $\sqrt{2}\sigma$ se tiene la distribución Rayleigh:

$$f_v(v) = \left(\frac{v}{\sigma^2}\right) e^{-\left(\frac{v}{\sqrt{2}\sigma}\right)^2}, \quad 0 < v < \infty \quad (10)$$

- **Potencia de un generador eólico:** la potencia generada en función del viento en una turbina eólica está dada por [5]:

$$W_w(v) = \begin{cases} 0, & v < v_i \text{ o } v > v_o \\ \rho \cdot v + \kappa, & v_i < v < v_r \\ W_r, & v_r < v < v_o \end{cases} \quad (11)$$



donde:

$W_w(v)$ es la potencia eólica generada en función de la velocidad del viento.

v es la velocidad del viento.

v_i velocidad de viento de corte inferior del aerogenerador.

v_r velocidad de viento nominal del aerogenerador.

v_o velocidad de viento de corte superior del aerogenerador.

W_r es la potencia nominal del aerogenerador.

Además, en (11) se definen las constantes: $\rho = \frac{W_r}{v_r - v_i}$ y $\kappa = \frac{-W_r v_i}{v_r - v_i}$

c) Energía de vehículos eléctricos conectados a la red

- El uso de carros eléctricos tiene un comportamiento estocástico, dependiente del patrón de conducción de estos vehículos ([14]), y por lo tanto el estado de carga y descarga de sus baterías también lo es. Una de las variables que define la energía disponible en baterías de carros eléctricos, es la distancia que se recorre con el mismo, en [4] se propone una distribución normal para la distancia recorrida en un vehículo eléctrico:

$$f_D(D) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\phi} e^{-\frac{(D-\mu)^2}{2\phi^2}} \quad (12)$$

donde:

$f_D(D)$ es la función de densidad de probabilidad de la distancia recorrida por un vehículo eléctrico.

D distancia recorrida por el vehículo eléctrico.

μ es la media de la distribución.

ϕ es la desviación estándar de la distribución.

El comportamiento normal de la distancia recorrida se ve reflejado en la forma de carga y descarga de las baterías de los vehículos eléctricos. Por tanto la potencia disponible P_e en carros eléctricos se puede definir como:

$$f_{pe}(P_e) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\phi} e^{-\frac{(P_e-\mu)^2}{2\phi^2}} \quad (13)$$

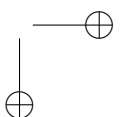
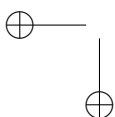
Donde:

$f_{pe}(P_e)$ es la función de densidad de probabilidad de la potencia disponible en baterías de vehículos eléctricos.

Se debe mencionar que (13) puede tomar valores de potencia negativos, caso para el cual las baterías le inyectan potencia a la red.

3.2. Formulas analíticas de costos de incertidumbre

De acuerdo con desarrollo detallado por los autores de este artículo en [1], las funciones analíticas de costos de incertidumbre para las fuentes generación solar fotovoltaica, generación con energía



eólica y vehículos eléctricos conectados a red, después de desarrollar las integrales correspondientes (proceso presentado en [1]), son:

- **Energía solar fotovoltaica:** para el caso de energía solar fotovoltaica, la fórmula de costo de incertidumbre contempla cuatro partes: dos para el caso subestimado, y dos para el caso sobreestimado.

a) Caso subestimado.

$$\begin{aligned}
 E[C_{PV,u,i}(W_{PV,s,i}, W_{PV,i}), A] = & \\
 & \frac{(-1)c_{PV,u,i}W_{PV,s,i}}{2} \left[erf\left(\frac{\left(\frac{1}{2}\ln\left(\frac{W_{Rc}G_rR_c}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) - erf\left(\frac{\left(\frac{1}{2}\ln\left(\frac{W_{PV,s,i}G_rR_c}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) \right] \\
 & + \frac{c_{PV,u,i}W_{PVr} \cdot e^{2\lambda+2\beta^2}}{G_rR_c2} \left[erf\left(\frac{\left(\frac{1}{2}\ln\left(\frac{W_{Rc}G_rR_c}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) - \sqrt{2}\beta\right) - \\
 & erf\left(\frac{\left(\frac{1}{2}\ln\left(\frac{W_{PV,s,i}G_rR_c}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) - \sqrt{2}\beta\right) \right]
 \end{aligned} \tag{14}$$

$$\begin{aligned}
 E[C_{PV,u,i}(W_{PV,s,i}, W_{PV,i}), B] = & \\
 & \frac{c_{PV,u,i}W_{PV,s,i}}{2} \left[erf\left(\frac{\left(\ln\left(\frac{W_{Rc}G_r}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) - erf\left(\frac{\left(\ln\left(\frac{W_{PV,\infty,i}G_r}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) \right] + \\
 & \frac{c_{PV,u,i}W_{PVr} \cdot e^{\lambda+\beta^2/2}}{2 \cdot G_r} \left[erf\left(\frac{\left(\ln\left(\frac{W_{PV,\infty,i}G_r}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) - \frac{\beta}{\sqrt{2}}\right) - erf\left(\frac{\left(\ln\left(\frac{W_{Rc}G_r}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) - \frac{\beta}{\sqrt{2}}\right) \right]
 \end{aligned} \tag{15}$$

b) Caso sobrestimado.

$$\begin{aligned}
 E[C_{PV,o,i}(W_{PV,s,i}, W_{PV,i}), A] = & \\
 & \frac{-c_{PV,o,i}W_{PV,s,i}}{2} \left[1 + erf\left(\frac{\left(\frac{1}{2}\ln\left(\frac{W_{Rc}G_rR_c}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) \right] + \\
 & \frac{c_{PV,o,i}W_{PVr} \cdot e^{2\lambda+2\beta^2}}{G_rR_c2} \left[erf\left(\frac{\left(\frac{1}{2}\ln\left(\frac{W_{Rc}G_rR_c}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) - \sqrt{2}\beta\right) + 1 \right]
 \end{aligned} \tag{16}$$

$$\begin{aligned}
 E[C_{PV,o,i}, (W_{PV,s,i}, W_{PV,i}), B] = & \\
 \frac{c_{PV,o,i}W_{PV,s,i}}{2} \left[erf\left(\frac{\left(\ln\left(\frac{W_{Rc}G_r}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) - erf\left(\frac{\left(\ln\left(\frac{W_{PV,s,i}G_r}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta}\right) \right] + & \\
 \frac{c_{PV,o,i}W_{PVr} \cdot e^{\lambda+\beta^2/2}}{2 \cdot G_r} \left[erf\left(\frac{\left(\ln\left(\frac{W_{PV,s,i}G_r}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta} - \frac{\beta}{\sqrt{2}}\right) - erf\left(\frac{\left(\ln\left(\frac{W_{Rc}G_r}{W_{PVr}}\right) - \lambda\right)}{\sqrt{2}\beta} - \frac{\beta}{\sqrt{2}}\right) \right] & \quad (17)
 \end{aligned}$$

- **Energía eólica:** la fórmula de costos de incertidumbre contempla dos partes, una subestimada y otra sobrestimada.

a) Caso subestimado.

$$\begin{aligned}
 E[C_{w,u,i}(W_{w,s,i}, W_{w,i})] = \frac{c_{w,u,i}}{2} \left(\sqrt{2\pi}\rho\sigma \left(erf\left(\frac{W_{w,s,i} - \kappa}{\sqrt{2}\rho\sigma}\right) \right. \right. & \\
 \left. \left. - erf\left(\frac{W_r - \kappa}{\sqrt{2}\rho\sigma}\right) \right) + 2(W_{w,s,i} - W_r)e^{-\frac{(W_r - \kappa)^2}{2\rho\sigma^2}} \right) & \quad (18) \\
 + \frac{c_{w,u,i}}{2} \left(e^{-\frac{V_i^2}{2\sigma^2}} - e^{-\frac{V_0^2}{2\sigma^2}} \right) (W_r - W_{w,s,i}) &
 \end{aligned}$$

b) Caso sobrestimado.

$$\begin{aligned}
 E[C_{w,o,i}(W_{w,s,i}, W_{w,i})] = c_{w,o,i}W_{w,s,i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{V_i^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{V_0^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{\kappa^2}{2\rho^2\sigma^2}} \right) & \\
 - \frac{\sqrt{2\pi}c_{w,o,i}\rho\sigma}{2} \left(erf\left(\frac{W_{w,s,i} - \kappa}{\sqrt{2}\rho\sigma}\right) - erf\left(\frac{-\kappa}{\sqrt{2}\rho\sigma}\right) \right) & \quad (19)
 \end{aligned}$$

- **Energía de vehículos eléctricos:** la fórmula de costos de incertidumbre contempla dos partes, una subestimada y otra sobrestimada.

a) Caso subestimado.

$$\begin{aligned}
 E[C_{e,u,i}(P_{e,i}, P_{e,s,i})] = \frac{c_{e,u,i}}{2} (\mu - P_{e,s,i}) \left(1 + erf\left(\frac{\mu - P_{e,s,i}}{\sqrt{2}\phi}\right) \right) & \\
 + \frac{c_{e,u,i} \cdot \phi}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\left(\frac{\mu - P_{e,s,i}}{\sqrt{2}\phi}\right)^2} & \quad (20)
 \end{aligned}$$

b) Caso sobrestimado.

$$\begin{aligned}
 E[C_{e,o,i}(P_{e,i}, P_{e,s,i})] = \frac{c_{e,o,i}}{2} (P_{e,s,i} - \mu) \left(erf\left(\frac{\mu}{\sqrt{2}\phi}\right) - erf\left(\frac{\mu - P_{e,s,i}}{\sqrt{2}\phi}\right) \right) & \\
 + \frac{c_{e,o,i}\phi}{\sqrt{2\pi}} \cdot \left(e^{-\left(\frac{P_{e,s,i} - \mu}{\sqrt{2}\phi}\right)^2} - e^{-\left(\frac{\mu}{\sqrt{2}\phi}\right)^2} \right) & \quad (21)
 \end{aligned}$$

4. Descripción del sistema eléctrico de potencia de prueba

En esta sección se presenta la descripción del sistema de potencia, el cual es una versión simplificada del sistema IEEE-118 tomado de [15], donde se incluyen nodos con generación renovable modelados para zonas del territorio colombiano. En la tabla I se muestra la composición general del sistema.

Tabla I. Composición de sistema IEEE 118

| Ítem | Cantidad asociada |
|--|-------------------|
| Generadores convencionales | 43 |
| Generadores fotovoltaicos | 5 |
| Generadores eólicos | 2 |
| Nodos con conexión de vehículos eléctricos | 4 |
| Cargas | 99 |
| Líneas | 177 |
| Taps de Transformadores | 9 |
| Compensadores en paralelo | 14 |

El sistema tiene una potencia base de $100MW$, tensión base de $318kV$, una capacidad de generación instalada de $8,205MW$ y una demanda total de $4,242MW$, en la tabla II se muestra la capacidad instalada según el tipo de generación.

Tabla II. Capacidad de generación por recursos

| | Fotovoltaico | Eólico | Vehículos | Convencional | Total |
|-----------------------------|--------------|--------|-----------|--------------|---------|
| Potencia instalada [MW] | 580 | 660 | 54,4 | 6.911 | 8.205,4 |
| Potencia instalada [%] | 7,7 | 8,0 | 0,6 | 85,92 | 100 |

Como se muestra en la tabla II, el 14% de la capacidad instalada del sistema corresponde a energías de origen renovable y el 86% a energías de origen convencional, lo que para el caso colombiano actual se puede considerar como alta penetración de energías renovables.

4.1. Descripción de nodos con generación fotovoltaica

Para establecer el comportamiento probabilístico de la irradiancia solar modelada con una distribución Log-normal (sección 3), se toman valores de irradiancia media y desviación estándar tomados de datos de la NASA [16], para cinco coordenadas geográficas específicas del territorio colombiano con potencial solar según [17] (Figura 1). En la tabla III se muestran los resultados de este proceso.

En la tabla III:

- β es la desviación estándar de la distribución Log-normal,
- λ es la media de la distribución Log-normal,
- G_r es el valor nominal de la irradiancia en el entorno geográfico,
- R_c es un valor de irradiancia de referencia,

Tabla III. Descripción probabilística de nodos con generación fotovoltaica [16]

| Nodo | Locación | Latitud [°N] | Longitud [°E] | β | λ | G_r [W/m ²] | R_c [W/m ²] |
|------|-----------------|-----------------|------------------|---------|-----------|------------------------------|------------------------------|
| 4 | Pivijay, Mag | 10,57 | -74,47 | 0,38 | 5,27 | 578 | 132 |
| 42 | Uribia, Gua | 12,21 | -72,12 | 0,61 | 6,57 | 539 | 126 |
| 49 | Puerto Col, Atl | 11,02 | -74,84 | 0,50 | 6,25 | 505 | 121 |
| 99 | Maicao, Gua | 11,32 | -72,54 | 0,44 | 5,86 | 576 | 146 |
| 107 | San Diego, Ces | 10,27 | -73,15 | 0,29 | 5,25 | 575 | 131 |

Con base en los resultados obtenidos en la tabla III se plantean las especificaciones de los nodos fotovoltaicos descritas en la tabla IV.

En la tabla IV:

- W_{PVR} potencia activa nominal del recurso fotovoltaico.
- $W_{PV,\infty}$ máxima potencia de salida.
- $C_{PV,u,i}$ costo de penalización debido a subestimar.
- $C_{PV,o,i}$ costo de penalización debido a sobrestimar.

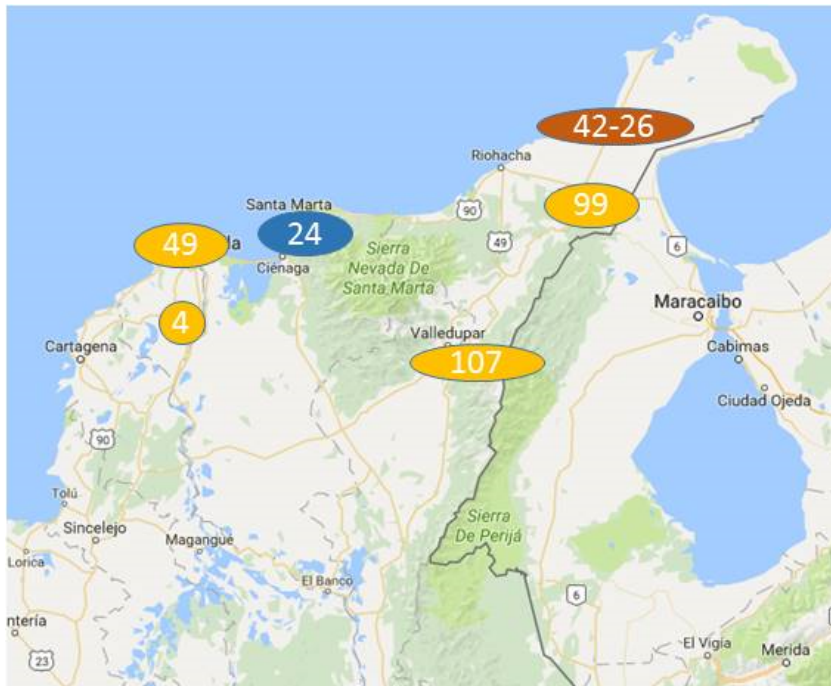


Figura 1. Ubicación geográfica de nodos con generación eólica (azul), nodos con generación solar fotovoltaica (amarillo) y nodos con fuentes solar y eólica (naranja).

Tabla IV. Descripción de nodos con generación fotovoltaica

| Nodo | W_{PVT} [MW] | $W_{PV,\infty}$ [MW] | $c_{PV,u,i}$ [\$/MW] | $c_{PV,o,i}$ [\$/MW] |
|------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| 4, 99, 110 | 40 | 60 | 46 | 76 |
| 42, 49 | 140 | 200 | 46 | 76 |

4.2. Descripción de nodos con generación eólica

Para establecer el comportamiento probabilístico de la velocidad de viento modelado con una distribución Rayleigh (sección 3), se toma el estadístico de valor medio de velocidad de viento a una altura de 10m suministrado por la UPME [18], para dos coordenadas geográficas específicas de la zona norte de Colombia, luego se calcula el parámetro de escala de la distribución Rayleigh σ . En la tabla V se muestran los resultados de este proceso para dos puntos con potencial eólico según [17].

Tabla V. Descripción probabilística de nodos con generación Eólica [18]

| Nodo | Locación | Latitud [°N] | Longitud [°E] | σ [m/s] | v_i [m/s] | v_r [m/s] | v_o [m/s] |
|------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|----------------|----------------|----------------|
| 24 | Santa Marta, Mag | 11,29 | -74,08 | 7,98 | 3 | 8 | 23 |
| 26 | Uribe, Gua | 12,35 | -71,74 | 7,18 | 3 | 8 | 23 |

En la tabla V:

- σ es el parámetro de escala Rayleigh.
- v_i es la velocidad de viento de corte inferior del aerogenerador.
- v_r es la velocidad de viento nominal del aerogenerador.
- v_o es la velocidad de viento de saturación del aerogenerador.

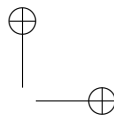
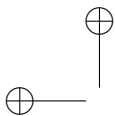
Con base en los resultados obtenidos en la tabla V se plantean las especificaciones de los nodos eólicos descritas en la tabla VI.

Tabla VI. Descripción de nodos con generación Eólica

| Nodo | $W_{w,r}$ [MW] | $W_{w,\infty}$ [MW] | ρ [MW/m/s] | κ [MW] | $c_{w,u,i}$ [\$/MW] | $c_{w,o,i}$ [\$/MW] |
|--------|-------------------|------------------------|--------------------|------------------|------------------------|------------------------|
| 24, 26 | 250 | 330 | 50 | -150 | 70 | 140 |

Donde en la tabla VI representan:

- $W_{w,r}$ potencia nominal del nodo eólico.
- $W_{w,\infty}$ potencia máxima entregada por el nodo eólico.
- ρ constante lineal.
- κ constante independiente.
- $c_{w,u,i}$ costo de penalización debido a subestimar.
- $c_{w,o,i}$ costo de penalización debido a sobrestimar.



4.3. Descripción de nodos con conexión de vehículos eléctricos

La capacidad de potencia agregada de los nodos con vehículos eléctricos conectados a la red se distribuye de forma normal (sección 3) durante el periodo pico del día, en la tabla VII se describen los nodos con conexión de vehículos.

Tabla VII. Descripción de nodos con conexión de vehículos eléctricos

| Nodo | μ [MW] | ϕ [MW] | $P_{e,max}$ [MW] | $P_{e,min}$ [MW] | $C_{e,u,i}$ [\$/MW] | $C_{e,o,i}$ [\$/MW] |
|-----------------|---------------|----------------|---------------------|---------------------|------------------------|------------------------|
| 59, 80, 90, 116 | 6,54 | 0,54 | 13,6 | -8 | 20 | 40 |

En la tabla VI:

| | |
|-------------|---|
| μ | potencia media del nodo con conexión de vehículos. |
| ϕ | desviación estándar. |
| $W_{e,max}$ | potencia mínima del nodo con conexión de vehículos. |
| $W_{e,min}$ | potencia máxima del nodo con conexión de vehículos. |
| $C_{e,u,i}$ | costo de penalización debido a subestimar. |
| $C_{e,o,i}$ | costo de penalización debido a sobrestimar. |

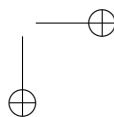
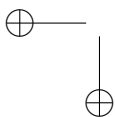
5. Algoritmo de optimización para el despacho económico

Se busca realizar el despacho óptimo de potencia activa y reactiva minimizando la función de costo total de generación (6) aplicando el algoritmo heurístico de optimización DEEPSO implementado en la competencia internacional IEEE-PES Application of Modern Heuristic Optimization Algorithms for Solving Optimal Power Flow Problems [7].

Se decidió utilizar heurística, debido a que la función objetivo al incluir los costos de incertidumbre presentados en la sección 3 es no convexa. Adicionalmente, el problema tiene una serie de variables de decisión continuas y discretas que hacen intratable el problema con *solvers* convencionales de optimización (como GAMS o CPLEX) en lo que se refiere a tiempos de solución y convergencia. Los algoritmos de optimización heurística son desarrollos basados en el comportamiento de procesos naturales, se utilizan comúnmente en problemas de optimización considerados de alta complejidad [19]. Para el caso de sistemas eléctricos de potencia, los procesos de optimización heurística presentan un potencial importante en la búsqueda de solucionar problemas de operación y planeamiento del sistema gracias a su potencial para resolver complejidades matemáticas inherentes relacionadas con alta dimensionalidad, no linealidad, no convexidad, multimodalidad y discontinuidad de los espacios de búsqueda [7].

El algoritmo de optimización involucra 130 variables de decisión continuas y discretas definidas de la forma:

- **Continuas (107 en total):** 42 representan la potencia activa despachada por los agentes convencionales (excluyendo el nodo *slack*), cinco son de la potencia activa despachada por los generadores fotovoltaicos, dos son de la potencia activa despachada por los agentes eólicos,



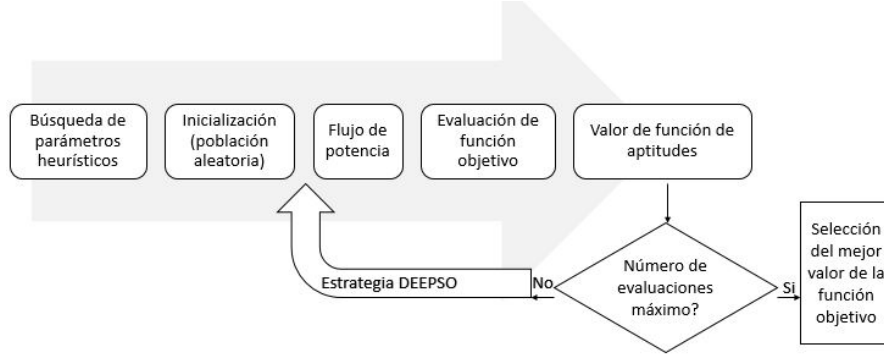


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo heurístico.

cuatro son de la potencia activa en los nodos con conexión de vehículos, 54 variables relacionadas con la magnitud de la tensión en los nodos de generación, las cuales siguen los rangos mínimos y máximos $v_{g,i}^{min} = 0,95$ p.u y $v_{g,i}^{max} = 1,05$ p.u respectivamente.

- **Discretas (23 en total):** nueve representan el radio de *Tap* de transformación con mínimo y máximo de $T_k^{min} = 0,9$ y $T_k^{max} = 1,1$ respectivamente y catorce variables discretas binarias asociadas a los dispositivos de compensación.

En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo que sigue el algoritmo de optimización DEEPSO.

La población inicial y la población actualizada de la estrategia de búsqueda del algoritmo se refieren a las 130 variables de decisión sujetas a valores máximos y mínimos de potencia activa generada, tensión en los nodos PQ, *Taps* de transformación y dispositivos de compensación.

Para la solución en cada flujo de potencia se implementa la herramienta Matpower [20] empleando el modelo típico de análisis en estado estático para sistemas de potencia, luego la evaluación de la función objetivo consiste en determinar el valor de la función de costos de generación C_{total} (ecuación (6)). La función de aptitudes se expresa en (22), la cual es la adición de la función objetivo C_{total} (ecuación (6)) y una función de penalización (*PF*) expresada en (23).

$$f = C_{total} + PF \quad (22)$$

$$PF = \rho \cdot \left[\begin{array}{l} (P_{slack}^{max} - P_{slack})^2 + \\ \sum_{i=1}^{N_g} (Q_{g,i} - Q_{g,i}^{min})^2 + (Q_{g,i}^{max} - Q_{g,i})^2 + \\ \sum_{i=1}^{N_B} (v_{load,i} - v_{load,i}^{min})^2 + (v_{load,i}^{max} - v_{load,i})^2 + \\ \sum_{l=1}^{N_l} (s_l^{max} - s_l)^2 \end{array} \right] \quad (23)$$

La función de aptitudes toma en cuenta las limitaciones de generación de potencia activa en el nodo *slack* P_{slack} , la limitación de generación de potencia reactiva en los nodos de generación $Q_{g,i}$, la limitación de magnitud de la tensión en los nodos de carga $v_{load,i}$ y la restricción de flujo de potencia en cada línea de transmisión s_l , ρ es un factor de penalización fijado en $1E + 7$. N_B es el número de nodos de carga del sistema y N_l es el número de ramas del sistema.

El diagrama de flujo se programa en 100.000 iteraciones para finalmente obtener la solución correspondiente al mejor valor de de la función de aptitudes.

En esta formulación se asume que todas las unidades de generación (convencionales y renovables) se despachan siempre. Es decir, se soluciona el problema en un intervalo de tiempo de operación del sistema. Esta suposición es válida si previamente se ha corrido un problema de despacho dinámico (Unit Commitment) donde se han definido qué unidades están disponible para el intervalo de tiempo bajo estudio [21], [22].

6. Análisis de resultados

A continuación se presentan los resultados de simulación obtenidos para el sistema con inclusión de nodos generación renovable descrito en la sección 4 y se realiza una comparación con los resultados obtenidos para el mismo sistema sin nodos de generación renovable descrito en el estudio [7].

6.1. Sistema con energías renovables

Se obtienen resultados de 31 ejecuciones del algoritmo de optimización donde cada ejecución implica 100000 iteraciones, con 130 variables de decisión (sección 5).

- **Nodos fotovoltaicos:** como se mencionó previamente, se tienen cinco nodos con generadores solares, nodos 4, 42, 49, 99 y 110. Después de realizada la optimización heurística, en la tabla VIII se muestran los resultados de magnitud de tensión y potencia despachada para los nodos con generación fotovoltaica, junto con el costo total de incertidumbre asociado.

En la figura 3 se muestra la curva de costo de incertidumbre en función de la potencia para los nodos con generación solar. Se puede ver que los nodos 42 y 49 despachan potencias mayores a su potencia nominal (140MW) y menores a su potencia máxima (200MW), los nodos 4, 99 y 110 despachan potencias menores a su potencia nominal (40MW) y menores a su potencia máxima (60MW).

Tabla VIII. Resultados de simulación en nodos fotovoltaicos

| Nodo | Potencia [MW] | Tensión [p.u] | Costo [\$] |
|--------------|---------------|---------------|----------------|
| 4 | 15,460 | 1,019 | 307,4 |
| 42 | 181,315 | 1,004 | 2.324,3 |
| 49 | 155,498 | 0,993 | 2.295,6 |
| 99 | 28,878 | 1,014 | 592,9 |
| 110 | 14,817 | 0,991 | 228,6 |
| Total | | | 5.748,8 |

- **Nodos eólicos:** se tienen dos nodos con generadores eólicos, nodos 24 y 26. Después de realizada la optimización heurística, en la tabla IX se muestran los resultados de magnitud de

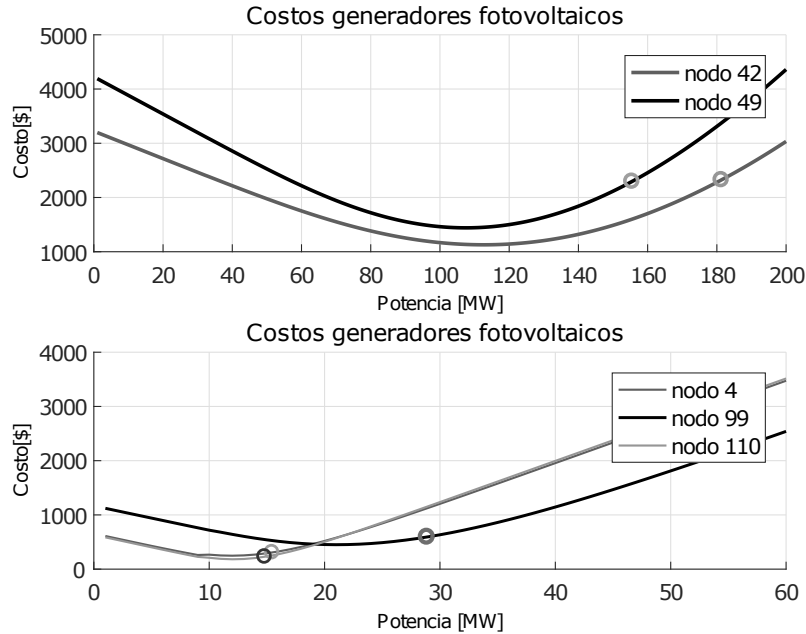


Figura 3. Curva de costos en función de la potencia programada para los nodos con generación fotovoltaica.

tensión y potencia despachada para los nodos con generación eólica, junto con el costo total de incertidumbre asociado.

Tabla IX. Resultados de simulación en nodos eólicos

| Nodo | Potencia [MW] | Tensión [p.u] | Costo [\$] |
|--------------|---------------|---------------|-----------------|
| 24 | 292,871 | 0,978 | 9.174,7 |
| 26 | 255,103 | 1,016 | 9.474,0 |
| Total | | | 18.648,7 |

En la figura 4 se muestra la curva de costo de incertidumbre en función de la potencia para los nodos con generación eólica. Se puede ver que los nodos 24 y 26 despachan potencias mayores a su potencia nominal (250MW) y menores a su potencia máxima (300MW).

- **Nodos con conexión de vehículos:** se tienen cuatro nodos con conexión de vehículos eléctricos, nodos 59, 80, 90 y 116. Después de realizada la optimización heurística, en la tabla X se muestran los resultados de magnitud de tensión y potencia despachada para los nodos con conexión de vehículos eléctricos, junto con el costo total de incertidumbre asociado.

En la figura 5 se muestra la curva de costo de incertidumbre en función de la potencia para los nodos con conexión de vehículos. Se puede ver que los nodos 59, 80, 90 y 166 despachan

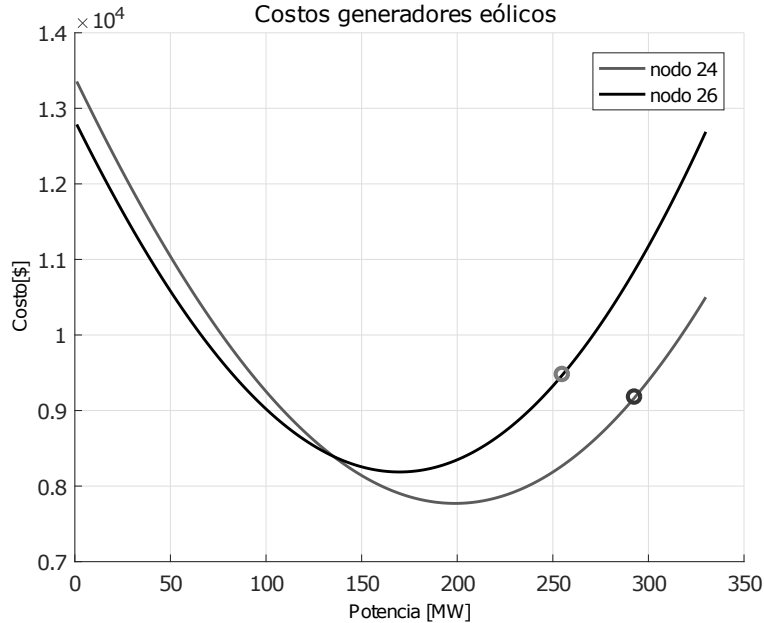


Figura 4. Curva de costos en función de la potencia programada para los nodos con generación eólica.

potencias mayores que su potencia nominal (6,54MW) y menores que su potencia máxima (13,6MW).

Finalmente en la tabla **XI** se presentan los resultados para generación con energía renovable: Solar, eólica y carros eléctricos. Para los nodos con generación renovable el valor de potencia despachada es fijo para un periodo de tiempo que depende de la resolución del modelo probabilístico, que para este caso es de una hora. Este valor de potencia despachada tiene asociados costos de incertidumbre, lo que quiere decir que no toda la potencia disponible en el recurso es despachada (por subestimar) o que se acude a otra fuente para suplir la demanda (por sobrestimar), en este sentido se consigue no introducir incertidumbre en el despacho gracias a que se mantienen valores de potencia programada para los recursos renovables, con lo cual pueden ingresar de forma competitiva en el mercado eléctrico.

Tabla X. Resultados de simulación en nodos con conexión de vehículos

| Nodo | Potencia [MW] | Tensión [p.u] | Costo [\$] |
|--------------|---------------|---------------|--------------|
| 59 | 7,272 | 1,002 | 30,6 |
| 80 | 6,800 | 1,020 | 17,0 |
| 90 | 7,459 | 0,984 | 37,3 |
| 116 | 8,000 | 0,998 | 58,4 |
| Total | | | 143,4 |

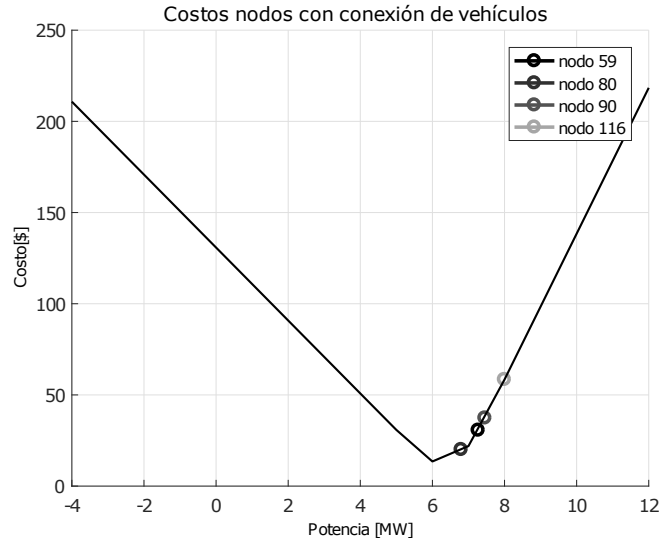


Figura 5. Curva de costos en función de la potencia programada para los nodos con conexión de vehículos.

Tabla XI. Resultados programación casos generadores renovables y convencionales

| Programación renovables | | | | Programación convencionales | | | |
|-------------------------|---------------|---------------|-------------------|-----------------------------|---------------|---------------|-----------------|
| Nodo | Potencia [MW] | Tensión [p.u] | Costo [\$] | Nodo | Potencia [MW] | Tensión [p.u] | Costo [\$] |
| 4 | 20.618 | 1,0190 | \$307,4 | 4 | 41,041 | 0,99 | \$1.658 |
| 42 | 185.470 | 1,0040 | \$2.324,3 | 42 | 30,106 | 0,97 | \$1.213 |
| 49 | 156.562 | 0,9930 | \$2.295,6 | 49 | 152,717 | 1,00 | \$4.198 |
| 99 | 19.570 | 1,0140 | \$592,9 | 99 | 30,174 | 1,00 | \$1.216 |
| 110 | 12.171 | 0,9910 | \$228,6 | 110 | 30,048 | 0,98 | \$1.211 |
| 24 | 297.731 | 0,9780 | \$9.174,7 | 24 | 32,205 | 1,01 | \$1.299 |
| 26 | 260.916 | 1,0160 | \$9.474,0 | 26 | 203,668 | 1,00 | \$5.394 |
| 59 | 7.399 | 1,0020 | \$30,6 | 59 | 124,846 | 1,01 | \$3.503 |
| 80 | 6.768 | 1,0200 | \$17,0 | 80 | 334,458 | 1,00 | \$9.034 |
| 90 | 6.338 | 0,9840 | \$37,3 | 90 | 46,925 | 1,01 | \$1.899 |
| 116 | 7.866 | 0,9980 | \$58,4 | 116 | 31,999 | 0,99 | \$1.290 |
| Costo total | | | \$24.540,8 | Costo total | | | \$31.915 |

6.2. Sistema sin energías renovables

Para tener un punto de comparación del costo del sistema al considerar energías renovables, se simula el mismo algoritmo de optimización pero considerando sólo con generadores convencionales, es decir, costos cuadráticos de operación para los generadores, descritos de la forma: $a.W_{s,i}^2 + b.W_{s,i} + d$, en donde $W_{s,i}$ es la potencia que se programa al generador i .

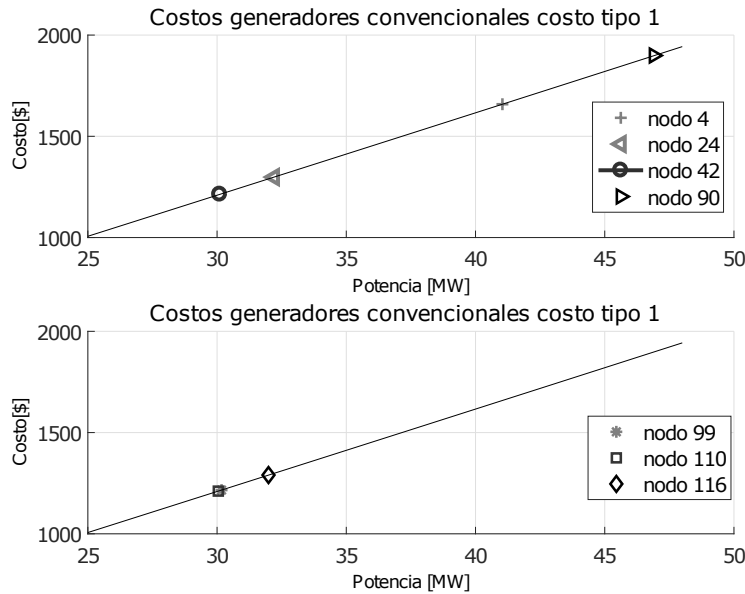


Figura 6. Curva de costos de operación generadores convencionales tipo 1 en función de la potencia programada, en nodos que anteriormente eran renovables.

Como se mencionó en la sección 2, el costo de generación depende del tipo de tecnología, lo que quiere decir, que se van a tener diferentes funciones de costo. La comparación se va a hacer en los nodos que tienen instalada energía renovable, se va a mirar la potencia que se programa en estos cuando tienen funciones de costo cuadráticas, y de esta forma ver el impacto de la penetración de energías renovables en el costo y particularmente cuando un bus tiene energía convencional y cuando no. Los once nodos renovables corresponden a once nodos con energía convencional, las cuales tienen once funciones de costo que se discriminan en cinco tipos:

1. Función de costo tipo 1: $c(W_{s,i}) = 0,01 \cdot W_{s,i}^2 + 40 \cdot W_{s,i}$
2. Función de costo tipo 2: $c(W_{s,i}) = 0,0318471 \cdot W_{s,i}^2 + 20 \cdot W_{s,i}$
3. Función de costo tipo 3: $c(W_{s,i}) = 0,0490196 \cdot W_{s,i}^2 + 20 \cdot W_{s,i}$
4. Función de costo tipo 4: $c(W_{s,i}) = 0,0645161 \cdot W_{s,i}^2 + 20 \cdot W_{s,i}$
5. Función de costo tipo 5: $c(W_{s,i}) = 0,0209644 \cdot W_{s,i}^2 + 20 \cdot W_{s,i}$

Los nodos 4, 24, 42, 90, 99, 110 y 116 tienen función de costo tipo 1. El nodo 26 tipo 2, el nodo 49 tipo 3, el nodo 59 tipo 4 y el nodo 80 tipo 5. Después de simular el algoritmo de optimización heurística considerando solo energía convencional, se encuentran las potencias que se programan a cada bus, dichas potencias y su respectiva función de costo se muestra en la figura 6 para los nodos tipo 1 y en la figura 7 para los nodos tipo 2, 3, 4 y 5.

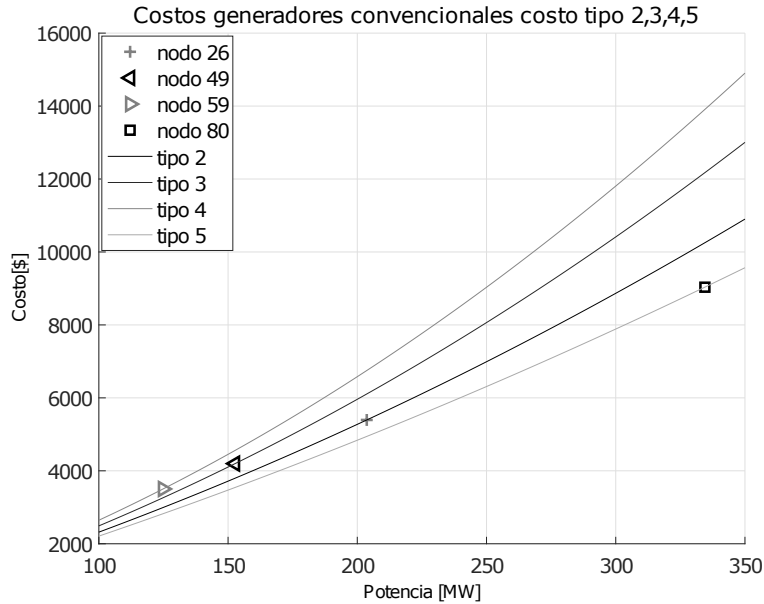


Figura 7. Curva de costos de operación generadores convencionales tipo 2, 3, 4, 5 en función de la potencia programada, en nodos que anteriormente eran renovables.

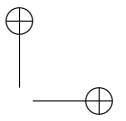
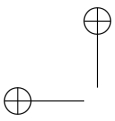
Como se observa en las figuras 6 y 7, las restricciones del sistema hacen que los generadores que tienen la misma función de costo tengan diferente potencia programada, y su despacho obedece a una optimización de costos. En la tabla XI se muestran los resultados para estos once nodos, ahora convencionales.

A partir de estos resultados, se calculan las diferencias entre los dos casos considerados: con energías renovables y con generación tradicional. Los cuales se muestran en la tabla XII.

Tabla XII. Comparación de resultados sistemas con y sin generación renovable

| Nodos | Renovables | Convencionales | Diferencia |
|-----------------------------------|------------|----------------|------------|
| Potencia programada 11 nodos [MW] | 981,4 | 1.058,18 | 76,78 |
| Costo 11 nodos [\$] | 24.540,8 | 31.915 | 7.374,2 |
| Costo total de sistema [\$] | 133.222,41 | 136.488,314 | 3.265,904 |

En los resultados presentados se puede ver que los nodos con más costos fueron los generadores eólicos, lo cual puede estar asociado a que el coeficiente de costos eólicos por sobrestimar $c_{w,o,i} = 70$, es 1,5 veces mayor que el costo fotovoltaico por sobrestimar $c_{PV,o,i} = 46$ y 3,5 veces mayor que el costo por sobrestimar de nodos con conexión de vehículos $c_{e,o,i} = 46$, también el coeficiente de costos eólicos por subestimar $c_{w,u,i} = 140$, es 1,8 veces mayor que el costo fotovoltaico por subestimar $c_{PV,u,i} = 76$ y 3,5 veces mayor que el costo por subestimar de nodos con conexión de vehículos $c_{e,u,i} = 40$.



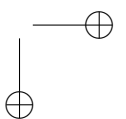
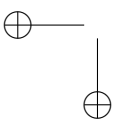
7. Conclusiones

El presente artículo propone una herramienta para los operadores de red de sistemas de potencia con penetración de energía renovable. La herramienta utiliza costos de incertidumbre, de esta manera, se tiene un criterio para realizar el despacho óptimo de potencia activa y reactiva, en sistemas que incorporan tanto fuentes de energía convencional como renovables. Así, los costos de incertidumbre modelan mediante una función analítica la incertidumbre en las fuentes primarias. De este modo se permite el ingreso de los elementos de energía renovable de forma competitiva en la programación del despacho de potencia.

Los sistemas de potencia son desarrollados en un entorno económico donde cantidades de potencia son programadas, y es necesario que los valores de las potencias sean suministrados de forma confiable, de otra forma son generados costos de penalización debidos a sobrestimar y subestimar la potencia disponible (para recursos renovables). Como se observa en la tabla XII, para los coeficientes de penalización ($c_{u,i}$ y $c_{o,i}$) tomados, la operación del sistema es más económica con alta penetración de energías renovables. De esta manera, la precisión en la estimación de los costos de incertidumbre permite la optimización de los recursos de generación, en este sentido se estima la cantidad de irradiación solar, velocidad de viento y potencia en vehículos eléctricos, haciendo menos dependiente el sistema de potencia de los recursos tradicionales sin afectar la confiabilidad del despacho.

Referencias

- [1] J. Arévalo, F. Santos and S. Rivera, Uncertainty Cost Functions for Solar Photovoltaic Generation, Wind Energy Generation and Plug-In Electric Vehicles: Mathematical Expected Value and Verification by Monte Carlo Simulation. *International Journal of Power and Energy Conversion*. 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.inderscience.com/info/general/forthcoming.php?jcode=ijpec> ↑ 325, 326, 327, 331, 332
- [2] H. Kamankesh, V. Agelidis and A. Kavousi-Fard, “Optimal Scheduling of Renewable Micro-Grids Considering Plug-In Hybrid Electric Vehicle Charging Demand”. *Energy*, 100, 285–297, 2016. ↑ 325
- [3] B. C. Gu, Z. M. Chen, T. Y. Jiv, L. L. Zhang, Q. H. Wu, M. S. Li and J. H. Huang, “Quasi-Monte Carlo Simulation Based Economic Dispatch With Wind Power Integrated”. *IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT-Asia)*, 264–269, Nov., 2016. ↑ 325
- [4] H. Huang, C. Y. Chung, K. W. Chan and H. Chen, “Quasi-Monte Carlo Based Probabilistic Small Signal Stability Analysis for Power Systems With Plug-In Electric Vehicle and Wind Power Integration”. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(3), 3335–3343, Aug., 2013. ↑ 325, 331
- [5] J. Hetzer, D. C. Yu and K. Bhattacharai, “An Economic Dispatch Model Incorporating Wind Power”. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(2), 603–611, June 2008. ↑ 325, 327, 330
- [6] J. Zhao, F. Wen, Z. Y. Dong, Y. Xue and K. P. Wong, “Optimal Dispatch of Electric Vehicles and Wind Power Using Enhanced Particle Swarm Optimization”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 8(4):889–899, Nov., 2012. ↑ 325
- [7] I. Erlich, K. Lee, J. Rueda and S. Wildenhues, “Competition on Application Of Modern Heuristic Optimization Algorithms For Solving Optimal Power Flow Problems”. *Working Group on Modern Heuristic Optimization (WGMHO) Under the IEEE PES Analytic Methods in Power Systems (AMPS) Committee*, February 2014. ↑ 326, 337, 339
- [8] M. I. Ennes and A. L. Diniz, “A General Equivalent Thermal Cost Function For Economic Dispatch Problems”. *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pages 1–6, July, 2012. ↑ 328
- [9] R. S. Wibowo, F. F. Utama, D. F. U. Putra and N. K. Aryani, “Unit Commitment With Non-Smooth Generation Cost Function Using Binary Particle Swarm Optimization”. In *2016 International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA)*, pages 571–576, July 2016. ↑ 328



- [10] J. Bastidas, C. Ramos and E. Franco, "Modeling And Parameter Calculation of Photovoltaic Fields in Irregular Weather Conditions". *Revista Ingeniería*, 17(1), 37–48, Junio, 2012. ↑329
- [11] T. Chang, "Investigation on Frequency Distribution of Global Radiation Using Different Probability Density Functions". *International Journal of Applied Science and Engineering*, 8(2), 99–107, 2010. ↑329
- [12] S. Surender Reddy, P. R. Bijwe and A. R. Abhyankar, "Real-time Economic Dispatch Considering Renewable Power Generation Variability and Uncertainty Over Scheduling Period". *IEEE Systems Journal*, 9(4), 1440–1451, Dec., 2015. ↑330
- [13] C. Ramos, A. Saavedra and E. Arango, "Distributed Maximum Power Point Tracking in Wind Micro-Grids". *Revista Ingeniería*, 17(1), 5–13, Junio 2012. ↑330
- [14] J. Ceballos, E. Caicedo and S. Ospina, "Una propuesta metodológica para dimensionar el impacto de los vehículos eléctricos sobre la red eléctrica". *Revista Ingeniería*, 21(2), 154–175, Agosto, 2016. ↑331
- [15] W. Group, "Common format for exchange of solved load flow data". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-92(6), 1916–1925, Nov, 1973. ↑334
- [16] NASA Atmospheric Science Data Center, Surface Meteorology and Solar Energy: Retscreen Data. 2017. [En línea]. Disponible en: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi> ↑334, 335
- [17] IDEAM [Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales]. Atlas interactivo del viento de Colombia. 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/> ↑334, 336
- [18] UPME [Unidad de Planeación Minero Energética], Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia. 2017. [En línea]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Estudios/2015/Integracion_Energias_Renovables/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVABLES_WEB.pdf ↑336
- [19] C. D. Charalambous and N. U. Ahmed, "Centralized Versus Decentralized Optimization of Distributed Stochastic Differential Decision Systems With Different Information Structures-Part I: A General Theory". *IEEE Transactions on Automatic Control*, 62(3), 1194–1209, March, 2017. ↑337
- [20] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sanchez and R. J. Thomas, "Matpower: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education". *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 12–19, Feb., 2011. ↑338
- [21] C. Zhao and R. Jiang, "Distributionally Robust Contingency-Constrained Unit Commitment. *IEEE Transactions on Power Systems*". PP(99), 1–1, 2017. ↑339
- [22] H. Ye, Y. Ge, M. Shahidehpour and Z. Li, "Uncertainty Marginal Price, Transmission Reserve, And Day-Ahead Market Clearing with Robust Unit Commitment". *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(3), 1782–1795, May, 2017. ↑339

Juan Arévalo

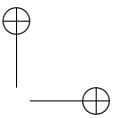
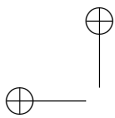
Ingeniero Electricista de Universidad Nacional de Colombia, correo electrónico: jucarevalo@unal.edu.co.

Fabian Santos

Ingeniero Electricista de Universidad Nacional de Colombia, correo electrónico: fsantosb@unal.edu.co.

Sergio Rivera, PhD

Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia; especialista en Ingeniería Eléctrica con Énfasis en Sistemas de Distribución; doctor en Ingeniería Eléctrica, Instituto de Energía Eléctrica, Universidad Nacional de San Juan; postdoctorado Asociado en el MIT – Massachusetts Institute of Technology; Postdoctoral Fellow en el MIST–Masdar Institute of Science and Technology; profesor en Universidad Nacional en el área de sistemas de potencia y máquinas eléctricas. ORCID: orcid.org/0000-0002-2995-1147. Correo electrónico: srriverar@unal.edu.co



Research

Filters Design Method Based on Networks of Transmission Lines for a Single-Phase Topology with BPL Technology

Método de Diseño de Filtros Basado en Redes de Líneas de Transmisión para una Topología Monofásica con Tecnología BPL

Rafael Enrique Balaguera Hernández¹

¹Universidad Pedagógica Nacional
Correspondence: rbalaguera@pedagogica.edu.co

Recibido: 24/05/2017. Modificado: 21/07/2017. Aceptado: 31/07/2017.

Abstract

Context: For the design of the filter model that presents the channel established by the load of a single-phase topology, the transmission lines of distributed parameters are transformed to concentrated parameters. Each line of the *backbone* assimilates the transmission parameter matrix and its transformation into admittance parameters, both represented within a two-port model.

Method: With the single-phase topology energized at frequencies between 1,8 MHz and 30 MHz a system with BPL (*Broadband Power Line*) technology tensions and transfer functions of the channels are obtained. Techniques of networks synthesis are applied to the transfer functions, to obtain the filter network associated to the channel.

Results: The operation of the filter in the channel of the load farthest from the source BPL, is validated by maximum transfer of power, replacing the load by the filter, to verify similar results of Signal to Noise ratio and Capacity of Channel.

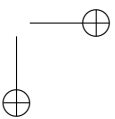
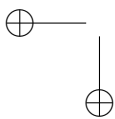
Conclusions: When the load is replaced by the filter, the behavior of the channel is similar, because the filter assumes the average impedance. As future work are suggested to use validated parameters of electrical conductors within the Colombian normativity to standardize the single-phase topology by distance and number of nodes, subject to the filter model associated to the longest channel to establish patterns respect to: attenuation, capacity of channel and signal to noise ratio.

Keywords: Channel, Power line communication, Filter.

Language: Spanish



Cite this work as: R. E. Balaguera, "Filters Design Method Based on Networks of Transmission Lines for a Single-Phase Topology with BPL Technology", *Ingeniería*, vol. 22, no. 3, pp. 347-361, 2017.
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.12031>



Resumen

Contexto: Para el diseño del modelo de filtro que presente el canal establecido por la carga de una topología monofásica, se transforman las líneas de transmisión de parámetros distribuidos a parámetros concentrados. Cada línea del backbone asimila la matriz de parámetros de transmisión y su transformación en parámetros de admitancia, representada en un modelo de dos puertos.

Método: Con la topología monofásica energizada a frecuencias entre 1,8 MHz y 30 MHz sistema con tecnología BPL (*Broadband Power Line*) se obtienen tensiones y funciones de transferencia de los canales. A las funciones de transferencia, se le aplican técnicas de síntesis de redes, para obtener la red del filtro asociado al canal.

Resultados: La operación del filtro en el canal de la carga más alejada de la fuente BPL, se valida por transferencia máxima de potencia, reemplazando la carga por el filtro, para comprobar resultados similares de relación señal a ruido y capacidad de canal.

Conclusiones: Al reemplazar la carga por el filtro el comportamiento del canal es similar, porque el filtro asume la impedancia media. Como trabajo futuro se sugiere utilizar parámetros validados de conductores eléctricos dentro de la normatividad colombiana, para estandarizar las topologías monofásicas hogareñas por distancia y número de nodos, sujetas al modelo de filtro asociado al canal más largo, para establecer patrones respecto a: atenuación, capacidad de canal y relación señal a ruido.

Palabras clave: Canal, Comunicación por línea de potencia, Filtro.

Idioma: Español

1. Introducción

Utilizar las redes internas de energía eléctrica de una vivienda como canal de transmisión de señales de comunicación entre 1,8 MHz y 30 MHz, se conoce como BPL [1], [2]. Aplicando los parámetros eléctricos obtenidos por Bostoen y Van de Wiel [3], en conductores de cobre [4 x 10 mm² y 4 x 25 mm²], se implementa una topología monofásica en el campo BPL para una vivienda, como modelo de análisis. La topología se transforma de líneas de transmisión a modelos de dos puertos, para obtener funciones de transferencia de los canales que establecen las cargas. En las funciones de transferencia se aplican elementos geométricos que por su forma asimilan el comportamiento de un filtro cuyo modelo en parámetros concentrados se obtiene utilizando técnicas de síntesis de redes [4], [5]. La operación del filtro se prueba en resultados de relación señal a ruido y capacidad de canal, sustituyendo la carga por la impedancia del filtro y se valida por transferencia máxima de potencia. Bastidas en [6] muestra un estudio sobre líneas eléctricas subterráneas e interiores, variando la frecuencia sobre el canal hasta 20 MHz y aplicando modelos por asociación a un cable coaxial (en topologías trifásica tetrafilar y monofásica bifilar), la prueba en parámetros de impedancia característica y atenuación del circuito monofásico se realiza con calibre 14 AWG en tubería PVC, concluye que la atenuación no alcanza valores críticos para frecuencias hasta 20 MHz y longitud de 1 km y que estas redes podrían emplearse para el transporte de señales en sistemas BPL en Colombia. La publicación no muestra valores de coeficientes de los parámetros utilizados sino el resultado gráfico de impedancia y atenuación.

En [7] se analizan las características de los canales variando las topologías de red de las líneas eléctricas internas con respecto a diferentes técnicas de modulación en relación con el número de ramas y diferentes impedancias de carga, no se considera la presencia de filtros en las topologías

para el rango de frecuencias BPL. En la publicación [8] se propone y demuestra la técnica de síntesis directa para la matriz de acoplamiento de filtros de topología mixtos que contienen estructuras de acoplamiento cruzado y una serie de secciones de polos extraídos. La síntesis directa se basa en un proceso para la construcción de la función de admitancia del filtro, produciendo un prototipo de topología mixta en el que una o más secciones de polos extraídos se generan naturalmente en el puerto fuente, en el estudio se obtienen filtros usando síntesis directa operando las redes a baja frecuencia. Para la publicación [9] se presenta una nueva topología de un filtro de potencia de orden superior para inversores monofásicos de fuente de tensión conectados a la red denominada L(LCL)₂, con el fin de atenuar los armónicos de alta frecuencia. El diseño del filtro es externo a la red y se propone para el funcionamiento de la red de baja frecuencia. En [10] se muestra el estudio del canal de comunicaciones en el campo de las transmisiones de banda ancha a través de líneas de tensión o BPL, señala la característica de filtro pasa-bajo de la red de acceso en redes subterráneas por pérdidas dieléctricas en aislamiento de cables, afirma la débil aparición de filtros pasa-bajo en la red eléctrica doméstica, no muestra ningún método o procedimiento para obtener estas características, el estudio se aplica en líneas de transmisión subterráneas con cables NAYY “tipo de cable de uno o más conductores sólidos de aluminio con aislamiento de PVC (Policloruro de Vinilo) según norma DIN VDE 0276”, concluye con el diseño de un emulador de canal BPL.

2. Metodología

La metodología se valida utilizando conductores nominados como A (10 mm²) en cargas y B (25 mm²) para el alimentador que corresponde a la configuración para cables de conexión, utilizados y probados por Bostoen y Van de Wiel que se muestra en la Figura 1. Bostoen y Van de Wiel, realizan pruebas de laboratorio sobre conductores de cobre y aluminio, con cables de conexión 4x10 mm², 4x25 mm² y 4x95 mm², asimilables a una conexión monofásica de dos conductores. El listado de conductores aparece en la Tabla I, donde se aprecian conductores de uso común en instalaciones eléctricas interiores en Colombia junto a los conductores validados que se identifican con las letras A, B y C.

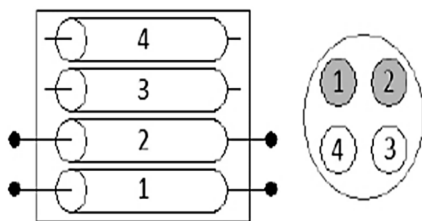


Figura 1. Configuración de conductores 4X10 mm².
Fuente: [3], pág. - 172.

Tabla I. Calibre de conductores.

| Calibre | Area(mm ²) | Calibre | Area(mm ²) |
|---------|------------------------|---------|------------------------|
| 12 AWG | 3,31 | 4 AWG | 21,14 |
| 10 AWG | 5,27 | B | 25,00 |
| 8 AWG | 8,34 | 3/0 AWG | 84,90 |
| A | 10,00 | C | 95,00 |
| 6 AWG | 13,26 | 4/0 AWG | 107,09 |

Fuente: [3], [11].

Los calibres de conductores utilizados en Colombia para el diseño de instalaciones eléctricas interiores son: 6, 8, 10 y 12 AWG, el calibre del conductor utilizado en tomas monofásicas acondicionadas para tecnología BPL es el 12 AWG instalado en tubería PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada.

2.1. Parámetros de líneas de transmisión

La geometría y configuración de la topología monofásica considerada [12], se muestra en la Figura 2 y el modelo en líneas de transmisión para cinco nodos [13], aparece en la Figura 3. Los conductores validados utilizados son de configuración 4x10 mm² en cargas derivadas y 4x25 mm² para el *backbone*.

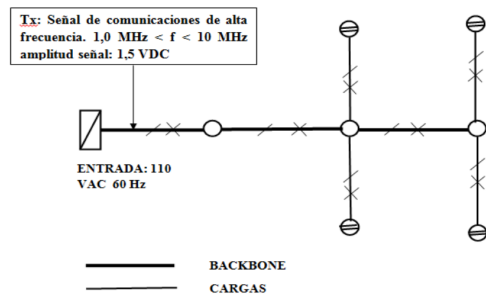


Figura 2. Topología monofásica. Fuente: elaboración propia.

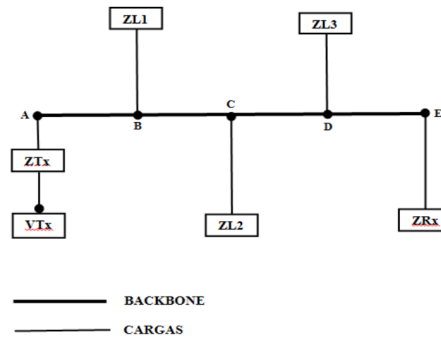


Figura 3. Topología monofásica en líneas de transmisión. Fuente: elaboración propia.

Cada tramo de línea de transmisión en parámetros distribuidos [14], se modela en redes T [15] formadas por los parámetros R, L, C y G como muestra la Figura 4. Las expresiones y valores utilizados en cada parámetro por unidad de longitud que forma la impedancia y admitancia en los tramos de línea de transmisión dependen de la frecuencia como se observa en las ecuaciones (1), (2), (3) y (4). Los coeficientes asociados a los parámetros se muestran en la Tabla II.

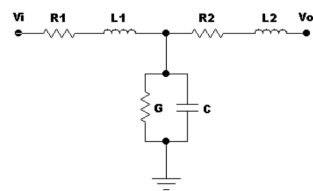


Figura 4. Parámetros de una línea de transmisión. Fuente: [15].

Tabla II. Coeficientes para el cálculo de los parámetros

| Configuración del conductor | R_1 $\left(\frac{\mu\Omega * \sqrt{Hz}}{m}\right)$ | l_1 $\left(\frac{\mu H}{m}\right)$ | l_2 $\left(\frac{\mu\Omega * \sqrt{Hz}}{m}\right)$ | C_1 $\left(\frac{pF}{m}\right)$ | G_1 $\left(\frac{pS * Hz}{m}\right)$ |
|-------------------------------|---|---|---|--------------------------------------|---|
| 4x10 mm ² 1 - 2 | 142 | 0,287 | 22,3 | 91,0 | 4,68 |
| 4x25 mm ² 1 - 2 | 79,1 | 0,248 | 16,8 | 111 | 8,57 |

$$R = R_1 * \sqrt{f}; \quad \left(\frac{\mu\Omega * \sqrt{Hz}}{m}\right) \quad (1)$$

$$L = l_1 + \frac{l_2}{\sqrt{f}}; \quad (\mu H \sqrt{Hz} / m) \quad (2)$$

$$C = C_1; \quad \left(\frac{pF}{m}\right) \quad (3)$$

$$G = G_1 * f; \quad \left(\frac{pS * Hz}{m}\right) \quad (4)$$

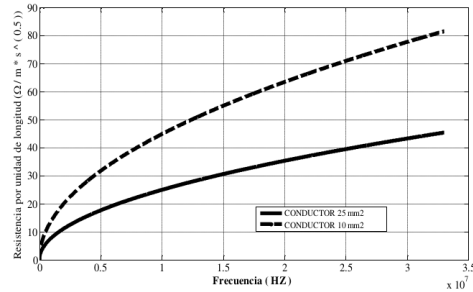


Figura 5. Resistencia en función de la frecuencia.
Fuente: elaboración propia.

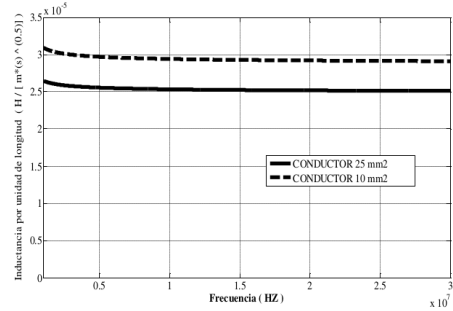


Figura 6. Inductancia en función de la frecuencia.
Fuente: elaboración propia.

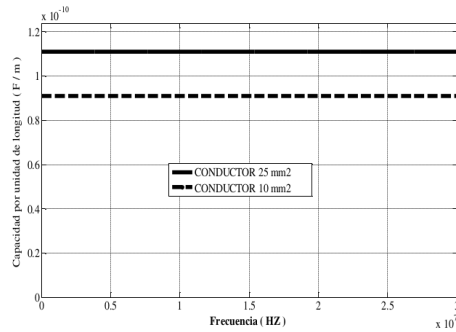


Figura 7. Capacidad en función de la frecuencia.
Fuente: elaboración propia.

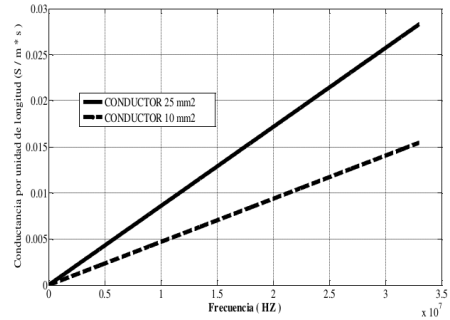


Figura 8. Conductancia en función de la frecuencia.
Fuente: elaboración propia.

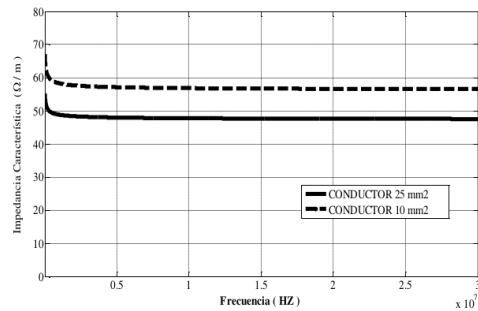


Figura 9. Impedancia Característica.
Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 5, 6, 7 y 8 muestran la resistencia, la inductancia, la capacidad y la conductancia en función de la frecuencia para 100 metros de conductor de 10 mm² y 25 mm², respectivamente. La impedancia característica en función de la frecuencia se muestra en la Figura 9.

2.2. Redes de dos puertos

Una línea de transmisión en su forma general se presenta por las ecuaciones diferenciales parciales (5) y (6):

$$\frac{-dV}{dx} = (R + j\omega L)I \quad (5)$$

$$\frac{-dI}{dx} = (G + j\omega C)V \quad (6)$$

La solución de las ecuaciones de línea (5) y (6) de utilidad en problemas numéricos, utiliza funciones hiperbólicas en función de la longitud x de la línea y la frecuencia ω , como aparece en las ecuaciones (7) y (8).

$$I(\omega x) = I_s * \text{Cosh}(\gamma\omega x) - \frac{V_s}{Z_0} * \text{Senh}(\gamma\omega x) \quad (7)$$

$$V(\omega x) = V_s * \text{Cosh}(\gamma\omega x) - I_s * Z_0 * \text{Senh}(\gamma\omega x) \quad (8)$$

La forma matricial del modelo hiperbólico en parámetros de transmisión de una línea de transmisión se muestra con el sistema de ecuaciones (9).

$$\begin{vmatrix} V(\omega x) \\ I(\omega x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{Cosh}(\gamma\omega x) & Z_0 \text{Senh}(\gamma\omega x) \\ \frac{\text{Senh}(\gamma\omega x)}{Z_0} & \text{Cosh}(\gamma\omega x) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_s \\ I_s \end{vmatrix} \quad (9)$$

La matriz del sistema (9) tiene asociada una matriz (10) con variables hiperbólicas complejas A, B, C, D, equivalente a la matriz (11).

$$\begin{vmatrix} A(\gamma\omega x) & B(\gamma\omega x) \\ C(\gamma\omega x) & D(\gamma\omega x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \text{Cosh}(\gamma\omega x) & Z_0 \text{Senh}(\gamma\omega x) \\ \frac{\text{Senh}(\gamma\omega x)}{Z_0} & \text{Cosh}(\gamma\omega x) \end{vmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{vmatrix} A(\gamma\omega x) & B(\gamma\omega x) \\ C(\gamma\omega x) & D(\gamma\omega x) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} \quad (11)$$

Los parámetros de la Matriz de Transmisión $[a_{ij}]$, se transforman en un modelo $\pi[Y_{ij}]$ de parámetros de admitancia, para un tramo de línea de transmisión del backbone. De la matriz (11), se obtienen las matrices (12).

$$\begin{vmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{a_{22}}{a_{12}} & \frac{-\Delta_a}{a_{12}} \\ \frac{-1}{a_{12}} & \frac{a_{11}}{a_{12}} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \frac{A(\gamma\omega x)}{B(\gamma\omega x)} & \frac{-1}{B(\gamma\omega x)} \\ \frac{-1}{B(\gamma\omega x)} & \frac{A(\gamma\omega x)}{B(\gamma\omega x)} \end{vmatrix} \quad (12)$$

Cada tramo de línea de transmisión del *backbone* se transforma en un modelo de dos puertas, utilizando los parámetros Y obtenidos en (12), según muestra la Figura 10. La red π recíproca obtenida de los parámetros de admitancia (12) asociados con las variables hiperbólicas complejas A, B, C y D se muestra en la Figura 11.

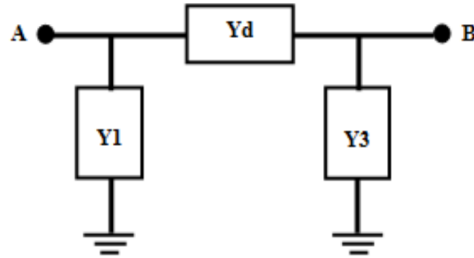


Figura 10. Modelo de admittancia.
Fuente: [15], pág. 844

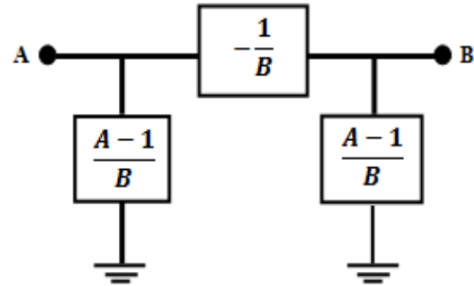


Figura 11. Red π recíproca de una sección del backbone.
Fuente: elaboración propia.

Las cargas Z_R se modelan como la admittancia reflejada ecuación (13) que ve el backbone, en su expresión aparecen las variables hiperbólicas complejas A, B, C y D calculadas en la matriz (10).

$$Y_s(\omega x) = \frac{Z_R * C(\gamma \omega x) + D(\gamma \omega x)}{B(\gamma \omega x) + Z_R * A(\gamma \omega x)} \quad (13)$$

La topología monofásica para cinco nodos, en modelos de dos puertos y admittancia reflejada aparece en la Figura 12. Las distancias en metros, los elementos del backbone son impedancias y las cargas derivadas admittancias.

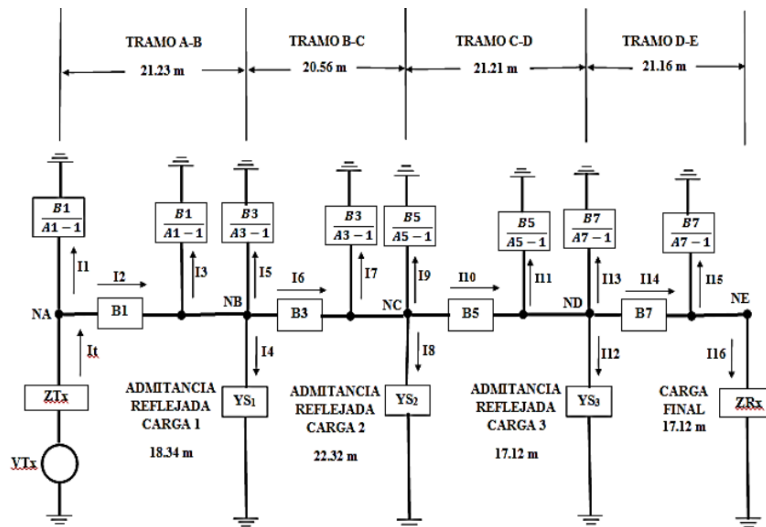
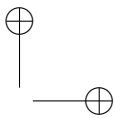
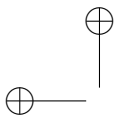


Figura 12. Topología monofásica en líneas de transmisión. Modelo de dos puertos.
Fuente: elaboración propia.

La solución de tensiones de nodo para la topología monofásica en modelos de dos puertos utiliza el modelo de Kirchhoff [16] suma de corrientes en un nodo igual a cero, ecuación (14).



$$V_k^0 * \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i}{B_i} \right) - \sum_{i=1}^N \left(\frac{V_k^i}{B_i} \right) = 0 \quad (14)$$

Siendo V_k^0 la tensión en el nodo k , V_k^i son las tensiones de los N nodos adyacentes al nodo k conectados por las N líneas de transmisión conectadas al nodo k ; B_i y A_i son las variables hiperbólicas complejas de las impedancias de la red que conecta el nodo k con el nodo i . El sistema ampliado de ecuaciones no lineales de la topología monofásica en modelos de dos puertos y admittancia reflejada (15), aparece a continuación:

$$\begin{pmatrix} V_A & V_B & V_C & V_D & V_E & V_K \\ \left(\frac{A_1}{B_1} + \frac{1}{ZT_x} \right) & \left(-\frac{1}{B_1} \right) & 0 & 0 & 0 & \frac{VT_x}{ZT_x} \\ \left(-\frac{1}{B_1} \right) & \left(\frac{A_1}{B_1} + \frac{A_3}{B_3} + Y_{s1} \right) & \left(-\frac{1}{B_3} \right) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \left(-\frac{1}{B_3} \right) & \left(\frac{A_3}{B_3} + \frac{A_5}{B_5} + Y_{s2} \right) & \left(-\frac{1}{B_5} \right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \left(-\frac{1}{B_5} \right) & \left(\frac{A_5}{B_5} + \frac{A_7}{B_7} + Y_{s3} \right) & \left(-\frac{1}{B_7} \right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left(-\frac{1}{B_7} \right) & \left(\frac{A_7}{B_7} + \frac{1}{ZR_x} \right) & 0 \end{pmatrix} \quad (15)$$

3. Resultados obtenidos

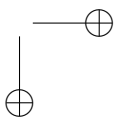
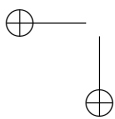
Como carga de la topología monofásica se toma la impedancia característica de la línea de transmisión con un valor de 50Ω para el conductor de 10 mm^2 (Figura 9) de esta forma se asegura que la carga reciba la mayor potencia incidente disponible, acoplando la línea. Se opera variando la frecuencia entre 1,8 MHz y 30 MHz y ajustando la densidad espectral de potencia de transmisión entre -52 dBm/Hz y -60 dBm/Hz. La longitud de tramos varía entre 1,0 y 50 metros (Figura 12). Los voltajes en nodos, funciones de transferencia, densidad espectral de potencia, relación señal a ruido y capacidad de canal con y sin el efecto que produce el filtro, se obtienen simulando el algoritmo en la versión de MATLAB 7.10.0.499-R2010a [17]. En este documento se muestran resultados sobre el canal que establece la carga del nodo E, por establecer el canal más largo.

3.1. Función de transferencia del canal que establece la carga del nodo E

La función de transferencia se obtiene del determinante del sistema (15), como muestra la ecuación (16).

$$\begin{aligned} \Delta = & \left(-\frac{1}{B_1} \right) \left(\frac{A_1}{B_1} + \frac{1}{ZT_x} \right) \left[\left(\frac{A_3}{B_3} + \frac{A_5}{B_5} + Y_{s2} \right) \left(\frac{A_5}{B_5} + \frac{A_7}{B_7} + Y_{s3} \right) \left(\frac{A_7}{B_7} + \frac{1}{ZR_x} \right) \right. \\ & \left. - \left(\frac{A_3}{B_3} + \frac{A_5}{B_5} + Y_{s2} \right) \left(\frac{1}{B_7} \right)^2 - \left(\frac{1}{B_5} \right)^2 \left(\frac{A_7}{B_7} + \frac{1}{ZR_x} \right) \right] + \left(\frac{A_1}{B_1} + \frac{1}{ZT_x} \right) \left(\frac{1}{B_3} \right)^2 \\ & \left[\left(\frac{1}{B_7} \right)^2 - \left(\frac{A_5}{B_5} + \frac{A_7}{B_7} + Y_{s3} \right) \left(\frac{A_7}{B_7} + \frac{1}{ZR_x} \right) \right] + \left(\frac{A_3}{B_3} + \frac{A_5}{B_5} + Y_{s2} \right) \left(\frac{1}{B_1} \right)^2 \\ & \left[\left(\frac{A_5}{B_5} + \frac{A_7}{B_7} + Y_{s3} \right) \left(\frac{A_7}{B_7} + \frac{1}{ZR_x} \right) - \left(\frac{1}{B_7} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (16)$$

La tensión V_s se refleja por divisor de tensión en el nodo E, como muestra la ecuación (17).



$$V_s = \frac{VT_x * Z_0}{(Z_0 + ZT_x)} \quad (17)$$

La relación entre la tensión de la carga del nodo E y la tensión V_s , muestra la función de transferencia [18] encontrada en este canal, ecuación (18).

$$H_5(f) = H \left(\frac{VE}{V_x} \right) = \frac{\left(\frac{1}{B1}\right) * \left(\frac{1}{B3}\right) * \left(\frac{1}{B5}\right) * \left(\frac{1}{B7}\right)}{\Delta * ZT_x} \quad (18)$$

La Figura 13 muestra la función de transferencia $H_5(f)$ del canal que establece la carga del nodo E . La línea inclinada es el valor medio geométrico, las líneas de guiones indican el punto de corte de frecuencia a -3dB. El canal experimenta el comportamiento de un filtro pasa-bajo con atenuación a 30 MHz de -15,10 dB y frecuencia de corte a -3 dB en 7,0 MHz, elementos suficientes para el diseño del filtro asociado a este canal.

3.2. Características del filtro asociado al canal de la carga del nodo E

Con los valores de atenuación a 30 MHz de -15,10 dB y frecuencia de corte a -3 dB en 7,0 MHz utilizando la Figura 13, se halla el filtro pasivo [19] asociando una función de transferencia con dominio en la frecuencia compleja “S” y comportamiento similar a la función de transferencia (18). El modelo de síntesis de redes aplicado: Cauer I, aparece en la ecuación (19).

$$H(s) = \frac{a_2 * s^2 + a_1 * s + a_0}{b_2 * s^2 + b_1 * s + b_0} \quad (19)$$

Los valores de las constantes a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 , b_2 se utilizan para construir el diagrama de Bode [20] con MATLAB aplicando iteraciones sucesivas [21]. Las restricciones utilizadas son: $H_5(S) \approx H_5(f)$ para unificar el dominio de frecuencia; con los valores de a_2 y b_2 se controla la amplitud del diagrama de Bode; los valores de a_0 y b_0 controlan la frecuencia del diagrama de Bode, el criterio de diseño utilizado: $b_1 = 2 * a_1$. La función de transferencia iterada obtenida aparece en la ecuación (20) y su diagrama de Bode en la Figura 14.

$$H_5(S) = H \left(\frac{VE}{V_s} \right) = \frac{2,70E^{-27}S^2 + 3,12E^{-13}S + 0,106}{2,86E^{-26}S^2 + 3,17E^{-12}S + 1} \quad (20)$$

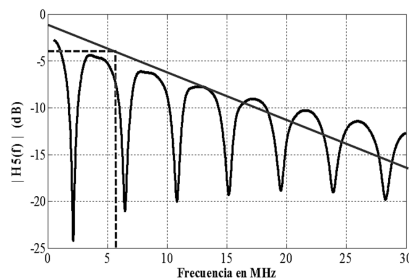


Figura 13. Función de transferencia canal carga nodo E. Fuente: elaboración propia.

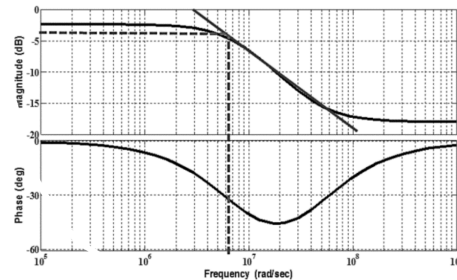


Figura 14. Bode función de transferencia del canal. Fuente: elaboración propia.

La síntesis de redes Cauer I en funciones reales positivas, monótonas y decrecientes en ω , son extracciones alternadas de constante y polo en infinito, la constante removida en infinito es una impedancia $Re[Z_{RC}]$ los polos en infinito se remueven de la admitancia restante $[Y]$ alternadamente y la función de transferencia Z_{RC} , es una impedancia. La red se presenta en forma de escalera con resistencias en serie y condensadores en derivación. El algoritmo de síntesis aplicado sobre $H_5(S)$ en (20) se muestra en la Tabla III.

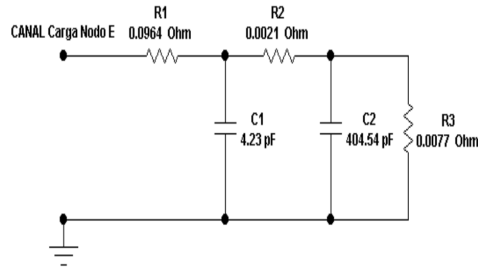


Figura 15. Filtro asociado al canal de la carga del nodo E. Fuente: elaboración propia.

Con los valores de la Tabla III, se forma el filtro pasivo del canal que establece la carga del nodo E en parámetros concentrados, que aparece en la Figura 15.

Tabla III. Modelo primera forma de Cauer [grado 2 / grado2].

| Extracciones de constante y polo en infinito con inversión | | | Cocientes | | |
|--|-----------|-----------|-----------|----------|----------|
| S2 | S | K | S2 | S | K |
| 2,71E-27 | 3,12E-13 | 1,06E-01 | 2,82E-20 | 3,17E-12 | 1,00 |
| -2,71E-27 | -3,05E-13 | -9,64E-02 | 0,00E+00 | 6,66E-15 | 9,86E-03 |
| 0,00E+00 | 6,66E-15 | 9,86E-03 | 0,00E+00 | 3,13E-12 | 1,00E+00 |
| 2,82E-20 | 3,17E-12 | 1,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 7,73E-03 |
| -2,82E-20 | -4,17E-08 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 |
| 0,00E+00 | 3,13E-12 | 1,00E+00 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | 1,00E+00 |
| 0,00E+00 | 6,66E-15 | 9,86E-03 | | | |
| | -6,66E-15 | -2,13E-03 | | | |
| | 0,00E+00 | 7,73E-03 | | | |
| | 3,13E-12 | 1,00E+00 | | | |
| | -3,13E-12 | 0,00E+00 | | | |
| | 0,00E+00 | 1,00E+00 | | | |
| | | 7,73E-03 | | | |
| | | -7,73E-03 | | | |
| | | 0,00E+00 | | | |

| Valores reales: elementos obtenidos para la red escalera | | | | | |
|--|--------|----------|---------|--------|----------|
| Y(S) ó Z(S) | R | C | R | C | Unidades |
| Z1(S) | 0,0964 | 0,00E+00 | 0,09640 | | Ω |
| Y2(S) | 0,0000 | 4,23E-12 | | 4,23 | pF |
| Z3(S) | 0,0021 | 0,00E+00 | 0,0021 | | Ω |
| Y4(S) | 0,0000 | 4,05E-10 | | 404,54 | pF |
| Z5(S) | 0,0077 | 0,00E+00 | 0,0077 | | Ω |

Fuente: elaboración propia

3.3. Verificación del filtro

Determinado el filtro en parámetros concentrados para el canal que establece la carga más alejada de la fuente BPL, se reemplaza esta carga, por el filtro para comprobar la hipótesis de obtener una operación similar sin modificar la topología monofásica, se verifica con el teorema de transferencia máxima de potencia [22], ecuación (21).

$$P_{Zcarga}(f) = \frac{V_s^2}{Z_{carga}(f)} * \frac{Z_{carga}^2(f)}{(Z_{TH}(f) + Z_{carga}(f))} \quad (21)$$

Para determinar la impedancia del Filtro $Z_{R_{filtro}}$ con los valores de la red de la Figura 15, se asignan constantes como se muestra en la Tabla IV, para obtener la ecuación (22).

$$Z_{R_{FILTRO}}(f) = \frac{(d_8 - d_{10} * \omega^2) + (j\omega) * d_{13}}{(1 - d_{13} * \omega)^2 + (j\omega) * d_{18}} = R_{k_{filtro}} * \sqrt{f} + jX \quad (22)$$

Los valores de impedancia por transferencia máxima de potencia son: impedancia del filtro

$Z_{Rf_{filtro}} = 25\Omega$ e impedancia característica $Z_o = 50\Omega$. La impedancia del filtro asume el 50 % de la impedancia del canal. Reemplazando la impedancia del filtro $Z_{Rf_{filtro}}$ ecuación (22) en el sistema (15) se verifica que la función de transferencia del canal hasta 4,5 MHz es menor a la original en 0,35 dB en promedio, a partir de 4,5 MHz el comportamiento es similar.

Tabla IV. Algoritmo para determinar la impedancia del filtro.

| Filtro estimado para el canal carga nodo E | | Constantes asociadas al filtro del canal carga del nodo E | |
|--|------------------------------|---|--------------------------------|
| R1=0,0964 | $\Omega = 0,0000964 K\Omega$ | R1*C1=d1= 4,077E-13 | d1*d4=d11 = 3,636E-27 |
| R2=0,0021 | $\Omega = 0,0000021 K\Omega$ | R2*C2=d2= 8,529E-13 | d1*d3=d12 = 3,143E-15 |
| R3=0,0077 | $\Omega = 0,0000077 K\Omega$ | R3=d3= 7,709E-03 | d5*d6=d13 = 3,006E-13 |
| C1=4,23E-12 | $\Omega = 4,23E-06 \mu F$ | R2=d4= 8,918E-15 | d2*d3=d14 = 6,575E-15 |
| C2=4,05E-10 | $\Omega = 4,05E-04 \mu F$ | R1=d5 = 9,639E-02 | d11+d12+d13+d14=d15= 3,103E-13 |
| | | R3*C2=d6=3,119E-12 | d3+d4+d5=d16=1,041E-01 |
| | | R2*C1=d7=8,918E-15 | d6*d7=d17 =2,781E-26 |
| | | R3*C1=d8= 3,261E-14 | d6+d7+d8=d18 = 3,160E-12 |
| | | d1*d2*d3 =d9= 2,681E-27 | |

Fuente: elaboración propia

3.3.1. Capacidad de canal y relación señal a ruido

El ruido en redes BPL hogareñas es el de Fondo Generalizado (GBN: *Generalized Background Noise*), [23], [24], que es la superposición del ruido de color de fondo (CBN: *Color Background Noise*) y los disturbios en el ancho de banda (NN: *Narrowband Noise*). La densidad espectral del ruido utilizada se expresa por la ecuación (23) y en la Figura 16 se muestra la simulación obtenida para la medición típica del ruido, con valores de densidad espectral de potencia entre -120 dBm/Hz y -140 dBm/Hz, que se incorpora en la verificación.

$$|S_{nGBN}(f)| = \log_{10} \left[\left(N_{CBN}(f) + \sum_{k=1}^B N_{NN}^K(k) + GAUSS(f) \right) * \left(\sum_{n=-\infty}^{n=\infty} C_n * e^{2\pi i n t / T} \right) \right]^2 \quad (23)$$

Por el teorema de Shannon-Hartley un canal analógico con ruido, con capacidad de canal según la ecuación (24) se transforma en la ecuación (25) [25], que corresponde a un canal dependiente de la frecuencia [26], [27], expresión coherente con la técnica de transmisión adoptada para sistemas BPL hogareña que es OFDM, donde en el dominio de la frecuencia se tienen N componentes de frecuencia discretos en un intervalo de frecuencia.

$$C = \int_{f_i}^{f_f} \log_2 \left(1 + \frac{S_r(f)}{S_n(f)} \right) df; \quad bps \quad (24)$$

$$C = \Delta f * \sum_{k=1}^N \left[\log_2 \left[1 + \frac{|H_k(f_k)|^2 * S_t(f_k)}{S_n(f_k)} \right] \right]; \quad (bps) \quad (25)$$

De la ecuación (25) se obtiene la ecuación (26), que representa la relación señal a ruido en el canal que establece la carga. La Figura 17 muestra la relación señal a ruido con y sin el filtro estimado.

$$SNR = 10 * \log_2 \left[1 + \frac{|H_k(f_k)|^2 * S_t(f_k)}{S_n(f_k)} \right]; \text{ (dB)} \quad (26)$$

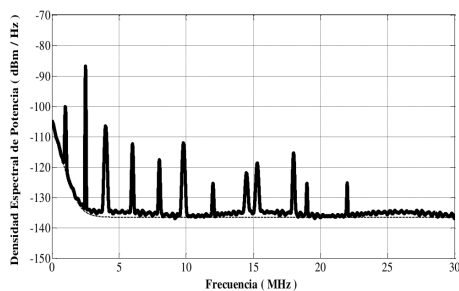


Figura 16. Densidad espectral de potencia del ruido. Fuente: elaboración propia.

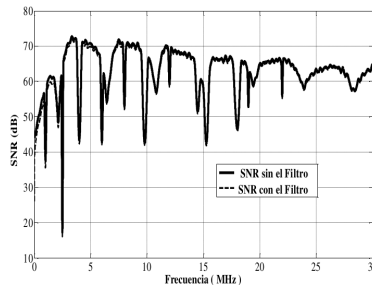


Figura 17. Relación Señal a Ruido en el canal. Fuente: elaboración propia.

La Tabla V y la Tabla VI muestran que utilizando el filtro como carga del nodo E, la relación señal a ruido del canal experimenta disminución en promedio del 1,09% equivalente a 0,67 dB y la capacidad de canal disminuye relativamente en 1,09% equivalente a 2,13 Mbps, ajustando la DEP de transmisión entre -52 y -60 dBm/Hz.

Tabla V. Relación señal a ruido del canal con y sin el filtro.

| Potencia de transmisión (dBm/Hz) | SNR sin el filtro (dB) | SNR con el filtro (dB) | Variación (dB) | Variación (%) |
|----------------------------------|------------------------|------------------------|----------------|---------------|
| -60,00 | 58,07 | 57,41 | 0,67 | 1,15 |
| -58,00 | 60,00 | 59,32 | 0,67 | 1,11 |
| -57,50 | 61,56 | 60,90 | 0,67 | 1,09 |
| -55,00 | 62,89 | 62,22 | 0,67 | 1,06 |
| -52,00 | 65,67 | 65,00 | 0,67 | 1,02 |

Fuente: elaboración propia

Tabla VI. Capacidad de canal con y sin el filtro.

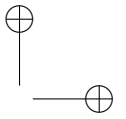
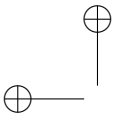
| DEP de transmisión (dBm/Hz) | Capacidad de canal sin el filtro (Mbps) | Capacidad de canal con el filtro (Mbps) | Variación (Mbps) | Variación (%) |
|-----------------------------|---|---|------------------|---------------|
| -60,00 | 185,20 | 183,07 | 2,13 | 1,15 |
| -58,00 | 191,32 | 189,18 | 2,14 | 1,12 |
| -57,50 | 196,33 | 194,20 | 2,13 | 1,08 |
| -55,00 | 200,56 | 198,43 | 2,13 | 1,06 |
| -52,00 | 209,42 | 207,28 | 2,14 | 1,02 |

Fuente: elaboración propia

La atenuación del canal que establece la carga derivada más alejada de la fuente corresponde aproximadamente a -9 dB en una longitud de 101,28 metros (ver Figura 12), con esta característica para una DEP de transmisión entre -60 dBm/Hz y -52 dBm/Hz se obtiene una capacidad de canal promedio de 196,57 Mbps y una relación señal a ruido de 61,64 dB, valores establecidos dentro de la normatividad BPL.

4. Caso Colombia

En Colombia no existe unidad de criterio entre las empresas reguladoras de energía eléctrica y las ISP (*Internet Service Provider*), en aunar esfuerzos para introducir y masificar la tecnología BPL, caso aislado reportado en la implementación de este sistema: empresa EMCALI (Empresa Municipal de Cali), en el año 2008 tenía una red multi-servicios con posibilidad de expandir su red



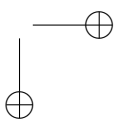
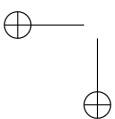
de acceso al sur de la ciudad con la tecnología BPL. Dentro de las políticas del Ministerio de las TIC no se menciona a corto plazo una normatividad que unifique criterios para abrir este espacio tecnológico [28] no atractivo entre otras razones por relación beneficio-costos, aspecto que se ponderó y superó en países como Argentina, México y Perú con inversión estatal y asesoría e ingeniería extranjera. En el documento [29] se plantea la viabilidad de implementar la tecnología PLT (*Power Line Telecommunications*) Telecomunicaciones por Línea de Potencia en Colombia, desde el lado de baja tensión del transformador de distribución hasta el usuario final [30], siempre y cuando se logre compatibilidad entre tecnologías homeplug que permita integrar varios medios físicos en un solo estándar, sugiriendo el IEEE 1901 como posible candidato.

En la publicación [31] se describe la combinación de la tecnología BPL con otras tecnologías de acceso, como inalámbrica, fibra, cobre y se plantea el panorama que podría tener el BPL híbrido en las zonas rurales de Colombia apoyados en el estándar IEEE 1901, mostrando como ventaja el uso de la infraestructura eléctrica existente. En el presente artículo, se considera que el canal establecido por una carga en una topología monofásica de una vivienda, presenta respuestas como un conjunto sucesivo de estados LTI (*Linear Time Invariant*) lineales e invariantes en el tiempo, donde las líneas de potencia hogareñas son líneas de transmisión interconectadas terminadas en cargas modeladas como una función de impedancia [32]; se infiere, que en un entorno de instrumentación se halle la función de impedancia según las características del material dieléctrico, la permitividad relativa, la permeabilidad relativa, la conductividad y efecto piel, que validan los parámetros del conductor eléctrico 12 AWG de uso común en instalaciones eléctricas internas en Colombia en tubería PVC como circuito de dos conductores, para determinar el filtro ajustado a las características geométricas del canal en presencia de señales BPL, como una alternativa metodológica útil diferente a la solución analítica, que contribuye al estudio de canales.

5. Conclusiones

El método y diseño aplicado para determinar el filtro presentado por los canales que establecen las cargas de la topología monofásica propuesta como canal para señales BPL a partir de la geometría de la red, se verifica desde la operación de los conductores [$4 \times 10 \text{ mm}^2$ y $4 \times 25 \text{ mm}^2$] validados con las pruebas de respuesta en frecuencia realizadas por Bostoen y Van de Wiel. La técnica de síntesis de redes en parámetros concentrados que determina la red del filtro asociado al canal, requiere para interpretar las funciones de transferencia del canal en parámetros distribuidos, trabajar sobre su valor medio geométrico y realizar una transformación previa de dominio de frecuencia. Se demostró que al reemplazar la carga por la impedancia del filtro estimado, el comportamiento del canal en parámetros concentrados es similar al de parámetros distribuidos, porque el filtro estimado asume la impedancia media del canal.

Como resultado del estudio aparece la posibilidad de sustituir un canal caracterizado en parámetros distribuidos por un canal caracterizado en parámetros concentrados, como modelo de investigación hipotético deductivo, validado con respuestas similares en: atenuación, capacidad de canal y relación señal a ruido. El aporte significativo al método propuesto y al análisis de sistemas de potencia utilizados como canal de señales de telecomunicación, es la representación de la topología monofásica en redes de dos puertos porque permite incorporar las características eléctricas y físicas



de una red de líneas de transmisión monofásica, que cumple con las especificaciones de un filtro. Como trabajo futuro se sugiere utilizar parámetros validados de conductores eléctricos dentro de la normatividad colombiana, para estandarizar las topologías monofásicas hogareñas por distancia y número de nodos, sujetas al modelo de filtro asociado al canal más largo, para establecer patrones respecto a: atenuación, capacidad de canal y relación señal a ruido.

Referencias

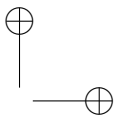
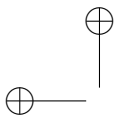
- [1] H. and Koch, M. Hirsch and Ferreira Hendrik and et al, *Power Line Communications*, 1st ed., Eds. Chichester, Ed. United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd, 2010. ↑348
- [2] H. Hranisca, *Broadband Power Line Communications*. Inglaterra: Wiley, 2004.↑348
- [3] T. Bostoen and O. Van de Wiel, “Modelling the low-voltage power distribution network in the frequency band from 0.5 mhz to 30 mhz for broadband powerline communications (PLC)”, *Belgium: Alcatel corporate research center, francis welllesplein 1*, b-2018 antwerpen., pp. 171-178, 2000.↑348, 349, 350
- [4] López, J.; Camps, G.; Magdalena, J., *Síntesis de redes: impedancias y filtros*, Primera ed. Madrid, España: Delta Publicaciones, 2008.↑348
- [5] F Soler, *Síntesis de Circuitos*, Primera ed. Bogotá: Imprenta Copypal., 1981.↑348
- [6] H. Bastidas and M. Patiño, “Modelo de cálculo de los parámetros técnicos de las líneas eléctricas de baja tensión subterráneas e instalaciones internas para uso en telecomunicaciones”, *Ingeniería e Investigación*, vol. XXXI, no. 3, pp. 121-129, diciembre 2011.↑348
- [7] S. Dash and A. Panda, “Interpretation of different channel configurations and modulation techniques over power line communication”, *IEEE*, pp. 420-425, november 2016.↑348
- [8] Y. He, G. Wang, L. Sun, and G. Rushingabigwi, “Coupling matrix and admittance function synthesis for mixed topology filters”, *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, vol. LXIV, pp. 4444 - 4454, august 2016.↑349
- [9] A. Anzalchi, M. Moghaddami, A. Sarwat, and A. Rathore, “A new topology of higher order power filter for single-phase grid-tied voltage-source inverters”, *IEEE transactions on industrial electronics*, vol. LXIII, no. 12, pp. 7511-7522, december 2016.↑349
- [10] N. Matsunaga, *Diseño e implementación de un emulador de canal BPL en FPGA*. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2012, Tesis requisito parcial para optar al título de: Doctor en Ingeniería Eléctrica.↑349
- [11] ICONTEC, *Norma Técnica Colombiana. NTC 2050. Código eléctrico colombiano*. Bogotá, Colombia: ICONTEC, 1998.↑349
- [12] F. Cañete, “Caracterización y modelado de redes eléctricas interiores como medio de transmisión de banda ancha”, Universidad de Málaga, Málaga, Tesis Doctoral 2004↑350
- [13] R. Neri, *Líneas de Transmisión*, Primera ed. México: McGraw-Hill, 2004.↑350
- [14] G. García and A. Estopiñán, *Circuitos de parámetros distribuidos: Aplicación a líneas de transporte de energía eléctrica*, Primera ed. Madrid, España: Pressas de la Universidad de Zaragoza, 1996.↑350
- [15] R. Dorf, *Introduction to electric circuits*, 9th ed. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2014.↑350, 353
- [16] W. Hayt and J. Kemmerly, *Análisis de circuitos en ingeniería*, Séptima ed. México, México D.F.: McGraw-Hill, 2007↑353
- [17] R. Gaviño, *Introducción a los sistemas de control: conceptos, aplicaciones y simulación con MATLAB*, Primera ed. México, México D.F.: Prentice Hall, 2010.↑354
- [18] H. Ferreira and L. Lampe, *Power Line Communications. Theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines*, 1st ed. Singapore: John Wiley & Sons Ltd, 2010.↑355
- [19] N.R. Malik, *Circuitos electrónicos*. México D.F., MÉXICO: Pearson Prentice Hall, 2014↑355
- [20] K Ogata, *Ingeniería de control moderna*, Quinta ed. México, D.F., México: PEARSON, 2010.↑355
- [21] S. Chapra, *Métodos numéricos para ingenieros*, Quinta ed. México, México: McGraw-Hill, 2007.↑355
- [22] D. Scott, *Análisis de circuitos eléctricos*, Primera ed. España: McGraw-Hill., 1998.↑356
- [23] M. Zimmermann and K. Doster, “An analysis of the broadband noise scenario in powerline networks”, *IEEE international symposium on power line communications and its applications*, Limerick, pp. 131-138, 2000.↑357

- [24] D. Benyoucef, "A new statistical model of the noise power density spectrum for powerline communication", *International symposium on power-line communications and its applications*, pp. 136-141, 2003.†357
- [25] FCC, "Radiated Emission Limits", *Communications Commission Federal*, vol. 1-part 15, no. 15, p. 810, 2009, Disponible en: <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/CFR-2009-title47-vol1/pdf/CFR-2009-title47-vol1-part15.pdf>.†357
- [26] C.E. Shannon, "A mathematical theory of communication", *Bell System Technical Journal*, vol. XXVII, pp. 379-423 y 623-656, 1948.†357
- [27] A. Goldsmith and P. Varaiya, "Capacity of fading channels with channel side information", *IEEE transactions on information theory*, vol. XLIII, no. 6, pp. 1986-1992, November, 1997.†357
- [28] Congreso de Colombia, "Artículo 17 de la Ley 1341 de 2009. "Por la cual se definen principios y conceptos sobre la sociedad de la información y la organización de las tecnologías de la información y las comunicaciones - TIC-, se crea la agencia nacional de espectro", Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Bogotá, Ley de la república de Colombia 2009.†359
- [29] A. Chica, *Estudio y análisis de la viabilidad de la implementación de tecnología PLT (Power Line Telecommunications) en Colombia, en el ámbito de la transmisión de datos sobre redes de baja tensión*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2012, Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Magíster en Ingeniería de Telecomunicaciones.†359
- [30] D. Viteri, C. Garzón, and A. Narváez, "Análisis de confiabilidad en subestaciones eléctricas tipo maniobra implementando el transformador de tensión con núcleo de potencia", *Revista Ingeniería*, vol. XXII, no. 1, pp. 65-82, Enero-Abril 2017.†359
- [31] G. Moreno and F. Fernández, "Sistemas de comunicación BPL - híbridos y su aplicación en áreas rurales", *Revista en Telecomunicaciones e Informática*, vol. II, no. 3, pp. 41-54, Enero - Junio 2012.†359
- [32] R. Cárdenas, "Red residencial de banda ancha por línea de potencia basada en relevo para la mitigación de la interferencia", Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de Doctor en Ingeniería Eléctrica 2013.†359

Rafael Enrique Balaguera Hernández

Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia, magíster en Ciencias de la Información y las Comunicaciones, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, docente universitario en la Universidad Pedagógica Nacional. Perteneció a los grupos de investigación: Centro de Investigación en Deporte y Actividad Física, Universidad Pedagógica Nacional y Comunicaciones de Banda Ancha por Línea de Potencia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ha trabajado como Ingeniero Electricista en las áreas de Control y Potencia, actualmente trabaja como ingeniero intervinor en el sector privado.

Correo electrónico: rbalaguera@pedagogica.edu.co



Research

Acoustic and Language Modeling for Speech Recognition of a Spanish Dialect from the Cucuta Colombian Region*Modelo Acústico y de Lenguaje del Idioma Español para el dialecto Cucuteño, Orientado al Reconocimiento Automático del Habla***Juan Celis Nuñez¹, Rodrigo Llanos Castro¹, Byron Medina Delgado¹, Sergio Sepúlveda Mora¹, Sergio Castro Casadiego*¹**¹Departamento de Electricidad y Electrónica. Universidad Francisco de Paula Santander

*Correspondence: sergio.castroc@ufps.edu.co

Recibido: 01/03/2017. Modificado: 08/08/2017. Aceptado: 22/08/2017.

Abstract

Context: Automatic speech recognition requires the development of language and acoustic models for different existing dialects. The purpose of this research is the training of an acoustic model, a statistical language model and a grammar language model for the Spanish language, specifically for the dialect of the city of San Jose de Cucuta, Colombia, that can be used in a command control system. Existing models for the Spanish language have problems in the recognition of the fundamental frequency and the spectral content, the accent, pronunciation, tone or simply the language model for Cucuta's dialect.

Method: In this project, we used Raspberry Pi B+ embedded system with Raspbian operating system which is a Linux distribution and two open source software, namely CMU-Cambridge Statistical Language Modeling Toolkit from the University of Cambridge and CMU Sphinx from Carnegie Mellon University; these software are based on Hidden Markov Models for the calculation of voice parameters. Besides, we used 1913 recorded audios with the voice of people from San Jose de Cucuta and Norte de Santander department. These audios were used for training and testing the automatic speech recognition system.

Results: We obtained a language model that consists of two files, one is the statistical language model (.lm), and the other is the jsfg grammar model (.jsfg). Regarding the acoustic component, two models were trained, one of them with an improved version which had a 100 % accuracy rate in the training results and 83 % accuracy rate in the audio tests for command recognition. Finally, we elaborated a manual for the creation of acoustic and language models with CMU Sphinx software.

Conclusions: The number of participants in the training process of the language and acoustic models has a significant influence on the quality of the voice processing of the recognizer. The use of a large dictionary for the training process and a short dictionary with the command words for the implementation is important to get a better response of the automatic speech recognition system. Considering the accuracy rate above 80 % in the voice recognition tests, the proposed models are suitable for applications oriented to the assistance of visual or motion impairment people.

Keywords: Speech Recognition, acoustic models, language models, CMU Sphinx, Raspberry Pi.

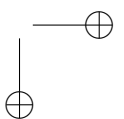
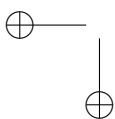
Language: Spanish



Cite this work as: J. D. Celis, R. A. Llanos, B. Medina, S. B. Sepúlveda, S. A. Castro, "Acoustic and Language Modeling for Speech Recognition of a Spanish Dialect from the Cucuta Colombian Region", Ingeniería, vol. 22, no. 3, pp. 362-376, 2017.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.11616>



Resumen

Contexto: El reconocimiento automático del habla requiere el desarrollo de modelos de lenguaje y modelos acústicos para los diferentes dialectos que existen. El objeto de esta investigación es el entrenamiento de un modelo acústico, un modelo de lenguaje estadístico y un modelo de lenguaje gramatical para el idioma español, específicamente para el dialecto de la ciudad de San José de Cúcuta, Colombia, que pueda ser utilizado en un sistema de control por comandos. Lo anterior motivado por las deficiencias que presentan los modelos existentes para el idioma español, en el reconocimiento de la frecuencia fundamental y contenido espectral, el acento, la pronunciación, el tono o simplemente al modelo de lenguaje de la variante dialéctica de esta región.

Método: Este proyecto utiliza el sistema embebido Raspberry Pi B+ con el sistema operativo Raspbian que es una distribución de Linux y los softwares de código abierto CMU-Cambridge Statistical Language Modeling toolkit de la Universidad de Cambridge y CMU Sphinx de la Universidad Carnegie Mellon; los cuales se basan en los modelos ocultos de Markov para el cálculo de los parámetros de voz. Además, se utilizaron 1913 audios grabados por locutores de la ciudad de San José de Cúcuta y el departamento de Norte de Santander para el entrenamiento y las pruebas del sistema de reconocimiento automático del habla.

Resultados: Se obtuvo un modelo de lenguaje que consiste de dos archivos, uno de modelo de lenguaje estadístico (.lm), y uno de modelo gramatical (.jsgf). En relación con la parte acústica se entrenaron dos modelos, uno de ellos con una versión mejorada que obtuvo una tasa de acierto en el reconocimiento de comandos del 100 % en los datos de entrenamiento y de 83 % en las pruebas de audio. Por último, se elaboró un manual para la creación de los modelos acústicos y de lenguaje con el software CMU Sphinx.

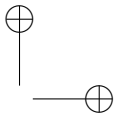
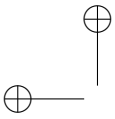
Conclusiones: El número de participantes en el proceso de entrenamiento de los modelos acústicos y de lenguaje influye significativamente en la calidad del procesamiento de voz del reconocedor. A fin de obtener una mejor respuesta del sistema de Reconocimiento Automático del Habla es importante usar un diccionario largo para la etapa de entrenamiento y un diccionario corto con las palabras de comando para la implementación del sistema. Teniendo en cuenta que en las pruebas de reconocimiento se obtuvo una tasa de éxito mayor al 80 % es posible usar los modelos creados en el desarrollo de un sistema de Reconocimiento Automático del Habla para una aplicación orientada a la asistencia de personas con discapacidad visual o incapacidad de movimiento.

Palabras clave: Reconocimiento del habla, Modelos acústicos, Modelos de lenguajes, CMU Sphinx, Raspberry Pi.

Idioma: Español

1. Introducción

El reconocimiento automático del habla es un avance tecnológico de creciente interés debido a la facilidad que tiene el ser humano de expresarse mediante el uso de sus pliegues vocales. Aunque esta tecnología lleva tiempo desarrollándose, se presenta en la actualidad como una posible solución en el diseño y desarrollo de una interfaz de acceso por habla que permita el control de un proceso sin necesidad de dedicar tiempo a la supervisión de dicha tarea [1], [2]; además que debe ser eficiente y no menos importante, debe ser amigable con el usuario para que sea ejecutado por todo tipo de personas.



La eficiencia de este tipo de sistema se puede evaluar en el porcentaje de éxito del reconocimiento de palabras u oraciones según sea el tipo de reconocedor implementado, pero este índice o criterio depende esencialmente de un diccionario fonético y de dos modelos; por una parte, el modelo acústico que representa la distribución de probabilidad de los fonemas en la señal de audio; por otra parte, el modelo del lenguaje, el cual representa la distribución de probabilidad de una secuencia de palabras. Estos dos modelos en conjunto permiten decodificar la información de las señales de audio del usuario a partir de la relación de las dos probabilidades mencionadas anteriormente.

En la actualidad existen en internet alrededor de quince modelos acústicos y de lenguaje desarrollados para diferentes idiomas o un solo idioma [3], [4], como lo son por ejemplo el inglés (americano y británico), el chino, el ruso y el alemán, así como para sistemas multilingüaje [5], [6]. Aunque para el español también existen modelos libres [7] en organizaciones como VoxForge o SourceForge, la efectividad para aplicaciones basadas en sistemas de control por comandos puede ser baja debido a la variedad de acentos que tiene tal idioma y la velocidad del habla, el modelo de lenguaje utilizado y la característica propia del funcionamiento del reconocedor. Por tal motivo, surge la necesidad de entrenar o desarrollar los modelos acústicos del lenguaje para el español colombiano, lo que indirectamente puede impulsar a la investigación del reconocimiento de dialectos regionales en este país.

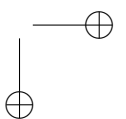
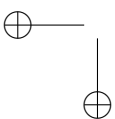
En esta investigación se realizó la creación de un modelo de lenguaje y un modelo acústico para el idioma español, específicamente para el dialecto cucuteño, utilizando como herramienta el toolkit CMU Sphinx [8] y el software CMU-Cambridge Statistical Language Modeling toolkit (CMUCLMTK) [9], además de audios grabados por habitantes del territorio, obteniendo modelos nativos que sirven en primer lugar para el desarrollo de sistemas de RAH realizados en la región, que permiten realizar comparaciones con el modelo de español desarrollado por SourceForge en este mismo toolkit. De igual manera se pretende exponer de una manera clara una metodología para la creación de modelos de lenguaje y acústicos para sistemas de RAH.

Teniendo en cuenta las características de un sistema RAH, se clasificó al sistema de reconocimiento desarrollado como un sistema de múltiples usuarios, para palabra aislada (específicamente un comando) y de vocabulario pequeño, ya que solo reconocerá nueve comandos compuestos cada uno por tres palabras. Los modelos entrenados servirán como base para una aplicación de “control por comandos” [10], [11] mediante archivos de audio, por lo cual se emplea una investigación científica con un tipo de estudio experimental para obtener valores cuantitativos que sirvan para comparar la eficiencia y la precisión de los resultados obtenidos.

2. Materiales y métodos

2.1. Reconocimiento Automático del Habla

El Reconocimiento Automático del Habla (RAH, por sus siglas en español; ASR por sus siglas en inglés) es el proceso mediante el cual los sonidos provenientes del aparato productor del habla (fonación y articulación) son transcritos a un conjunto de símbolos ortográficos compatibles con las reglas gramaticales de la lengua objetivo de que se trate, tal y como se representa en la Figura 1.



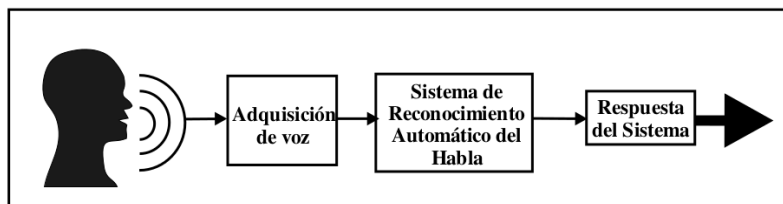


Figura 1. Sistema RAH.

En el desarrollo de la inteligencia computacional y artificial se denomina RAH a la capacidad del sistema de funcionar mediante una interfaz de acceso por habla [12]. Dicha capacidad tiene como finalidad transformar la señal acústica del habla producida por el ser humano en información que permita a la interfaz crear un diálogo con el usuario, de tal manera que esta sintetice una respuesta o ejecute un proceso con base en la entrada del sistema [13].

Los procesos de Reconocimiento Automático del Habla están basados en Redes Bayesianas, específicamente en los Modelos Ocultos de Markov (HMM) [14]. Desde el punto de vista matemático el RAH se puede expresar como un problema estadístico en el cual se desea conocer la palabra interpretada de la señal acústica, teniendo como parámetros la palabra predecesora reconocida y los datos obtenidos de la señal acústica; estadística que se puede resolver mediante los HMM.

El software CMU Sphinx es un toolkit de librerías y programas de código abierto desarrollado en Java y realizado bajo la licencia BSD, creado por la universidad Carnegie Mellon para el desarrollo de sistemas de reconocimiento automático del habla. Este cuenta con la familia de programas Sphinx (actualmente versión 4) el cual es un reconocedor del habla de alto nivel, así como PocketSphinx, que es un reconocedor del habla para sistemas embebidos; además del SphinxTrain que permite realizar el entrenamiento de un modelo acústico nuevo [15] o adaptar uno ya existente [16] y el software de código abierto CMUCLMTK de la Universidad de Cambridge el cual permite la creación de los diferentes modelos del lenguaje.

El toolkit para el reconocimiento del habla CMU Sphinx puede ser descargado de su web oficial; es importante verificar que al descargar los paquetes de instalación del software que compone el toolkit, todos sean la misma versión (actualmente 5PreAlpha).

Se usó como base el sistema embebido Raspberry Pi B+ con la distribución Raspbian de Linux, en donde se instala el Toolkit de Reconocimiento del habla CMU Sphinx. Inicialmente, se opera con el CMUCLMTK para generar los modelos de lenguaje, posteriormente con el SphinxTrain se ejecuta la tarea de entrenamiento del modelo acústico y finalmente con el SphinxBase y el PocketSphinx se comprueba el funcionamiento de los modelos obtenidos usando el micrófono de un smartphone y una aplicación móvil como entrada de audio.

2.1.1. Características de los sistemas del RAH

Un sistema de RAH tiene varias características que sirven de igual manera para clasificar la forma en que funcionan y trabajan la información que entra al sistema, como parte de la interfaz de acceso

por habla. En la Tabla I se describen las características de un sistema RAH.

Tabla I. Características de los sistemas de RAH.

| Característica | Descripción |
|---|--|
| Usuario o hablante | Un sistema de RAH puede ser para un solo usuario o para usuarios múltiples. Un reconocedor de usuarios múltiples es menos preciso, pero permite un mayor alcance en la población que puede hacer uso del reconocedor, ya que no tiene la limitación de detectar el habla de un solo usuario. |
| Estilo del habla | El RAH puede funcionar de dos formas, uno de palabra aislada y otro de habla continua. Un RAH de habla continua hace que el sistema opere con mayor complejidad, ya que habrá mayor dificultad en determinar los tiempos de silencio que marcan los comienzos y finales de los segmentos hablados, existentes en el diálogo. |
| Tamaño del vocabulario | El vocabulario repercute en la velocidad de operación del reconocedor. Cuanto más grande sea el diccionario, más demorará en encontrar la palabra asignada a la probabilidad generada por el programa. Además, se pueden presentar casos en donde el sistema detecte coincidencias y dé como resultado una palabra equivocada. Las palabras deben estar tanto en el diccionario fonético, como en el modelo de lenguaje si se desea reconocer. |
| Condiciones de operación y ruido | El sistema funcionará dependiendo de las condiciones sonoras en las que opere, especialmente el ruido del entorno sobre el cual funciona. Estos ruidos pueden ocasionar que se decodifique la señal de una manera incorrecta obteniendo un resultado diferente al esperado. |

2.1.2. Componentes del RAH

Los sistemas del Reconocimiento Automático del Habla se componen esencialmente de tres partes, un diccionario fonético, un modelo del lenguaje y un modelo acústico.

El diccionario fonético es el vocabulario de palabras junto con la división fonética de cada una de ellas, con el cual va a operar el sistema del RAH. Se usa en conjunto con los modelos del lenguaje y acústico para decodificar las señales de audio del usuario, el diccionario fonético utilizado en la creación de los modelos de lenguaje y acústico es el alojado en el repositorio de SourceForge.

El modelo del lenguaje representa la distribución de probabilidad de la palabra y el orden de la misma en el sistema del RAH. Este modelo se encarga de la búsqueda de la palabra y le permite al sistema conocer la palabra siguiente dependiendo de la palabra anterior, es decir da a conocer la posición y probabilidad que tiene una palabra determinada en una oración o comando. Para esta investigación en específico se crearon dos modelos de lenguaje, siendo uno de ellos el modelo de lenguaje gramatical el cual representa la distribución de probabilidad de una secuencia de palabras a partir de una serie de reglas gramaticales, donde se especifican los comandos con el cual funciona el sistema de RAH desarrollado. El modelo acústico representa la distribución de probabilidad de los fonemas en la señal de audio.

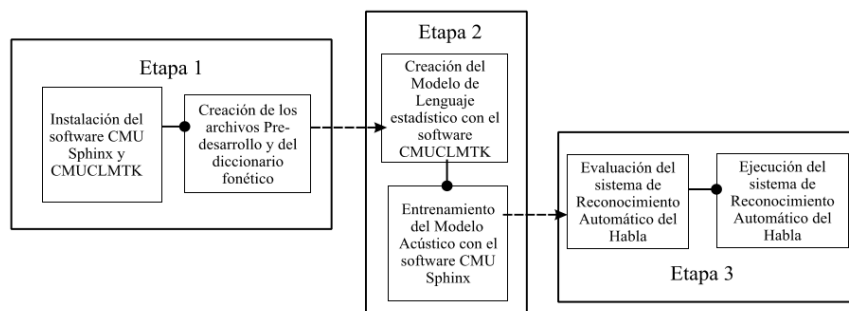


Figura 2. Proceso de desarrollo de un sistema de Reconocimiento Automático del Habla.

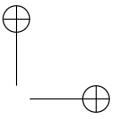
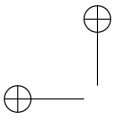
2.2. Desarrollo del reconocedor automático del habla

Luego de realizar una breve descripción de estos sistemas de procesamiento de voz, es importante entender la manera como se desarrollan y entrenan los diferentes elementos que componen el reconocedor. En este punto es importante aclarar que el RAH está desarrollado bajo el software de código abierto CMU Sphinx [17] el cual es instalado y ejecutado en el ordenador de placa reducida Raspberry PI B+, de sistema operativo Raspbian [18]. Como se mencionó anteriormente los modelos del lenguaje y acústico se desarrollan para satisfacer las necesidades de un RAH de múltiples hablantes y de un sistema de control por comandos. El proceso de creación de estos sistemas se puede apreciar en la Figura 2.

2.2.1. Preparación pre-desarrollo

Antes de desarrollar el modelo del lenguaje y el entrenamiento del modelo acústico, es necesario preparar los siguientes elementos:

- Un diccionario fonético, este puede ser descargado de SourceForge que de manera gratuita prestan el servicio de recolección y preparación de archivos necesarios para el desarrollo de un sistema de RAH; para esta investigación se utilizaron dos diccionarios fonéticos: el primero descargado de la web SourceForge de 88000 palabras aproximadamente fue utilizado para el entrenamiento del modelo acústico, debido a la gran cantidad de palabras que este posee permite realizar un entrenamiento con un rango amplio de futuros comandos; y el segundo propio del proyecto, el cual contiene solo las trece palabras que forman los comandos, lo que permite limitar la ejecución del reconocedor.
- Un archivo de texto plano con las frases que se emplearán como comandos del sistema y se usará para la creación del modelo del lenguaje.
- Un archivo de texto plano con los fonemas utilizados y que componen cada una de las palabras encontradas en el vocabulario (.Phone), uno con las etiquetas de silencio que el sistema relacionará con los límites de los segmentos hablados de las grabaciones de audio (.Filler).
- Los archivos de texto plano de transcripción y de entrenamiento que contendrán las frases grabadas en los archivos de audio por los usuarios para el entrenamiento y prueba del modelo acústico.



- Los archivos de audio grabados por los usuarios necesarios para el entrenamiento del modelo acústico. Las duraciones de estos archivos deben sumar en total una hora de grabación como mínimo para que el sistema pueda realizar el entrenamiento del modelo acústico.

Es importante resaltar que los archivos de texto plano de transcripción y el archivo de texto plano que contiene las frases necesarias para la creación del modelo del lenguaje, deben estar escritos en formato Unicode UTF-8, además deben comenzar con la etiqueta `< s >` y finalizar con la etiqueta `< /s >`, las cuales deben estar incluidas como representación del silencio en el archivo de extensión Filler.

2.2.2. Creación del modelo del lenguaje

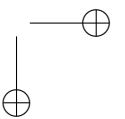
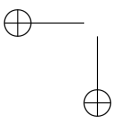
El modelo del lenguaje es el elemento del RAH que define las probabilidades relacionadas con la aparición y el orden de las palabras en una oración. Permite junto con las características y datos obtenidos de las señales acústicas en el entrenamiento del modelo acústico, decodificar la información de las señales de habla del usuario.

En el toolkit CMU Sphinx el modelo del lenguaje se puede crear de tres tipos. El primer tipo es lista de palabras claves, el cual se puede realizar a partir de un archivo de audio de gran tamaño y mediante el PocketSphinx se localiza la palabra indicada, dicho proceso genera un archivo cuyo contenido especifica los umbrales de la palabra en el audio. El segundo tipo es gramática, este elemento es de tipo texto y su extensión es `.jsgf` o `.gram`; tal archivo puede ser escrito de manera manual y en formato `jsgf`; son archivos realizados para representar de manera precisa el orden en el cual deben aparecer las palabras y son utilizados principalmente para sistemas de reconocimiento en comando y control.

El tercer tipo es el Modelo del Lenguaje Estadístico (LM), que se crea mediante el software CMUCMLTK. A partir de un archivo de texto plano en el cual se encuentran todas las frases o palabras que puede reconocer el RAH, este software permite crear una serie de archivos, los cuales son:

- Archivo frecuencia de palabra (`.wfreq`): este archivo, como su nombre lo indica contiene por palabra el número de veces que esta aparece dentro del texto u oraciones encontradas dentro del archivo de texto con el cual es creado.
- Archivo de vocabulario (`.vocab`): este archivo contiene el vocabulario que conforman el texto u oraciones encontradas dentro del archivo de texto y su creación se realiza a partir del archivo de frecuencia de palabra.
- Archivo gramatical (`.indgram`): este archivo contiene el mapeo gramatical, es decir la ruta o la secuencia de probabilidades que se han obtenido del texto u oraciones encontradas dentro del archivo, junto con el archivo de vocabulario.

Estos archivos son necesarios para crear el archivo ARPA [19] que es el resultado final de la creación del modelo del lenguaje. El archivo del modelo del lenguaje tiene extensión `.lm` o `.arpa`, además puede ser de extensión `.lm.bin` para ser formato binario, el cual permite ejecutar más rápido el reconocedor y es usado para modelos del lenguaje de gran tamaño.



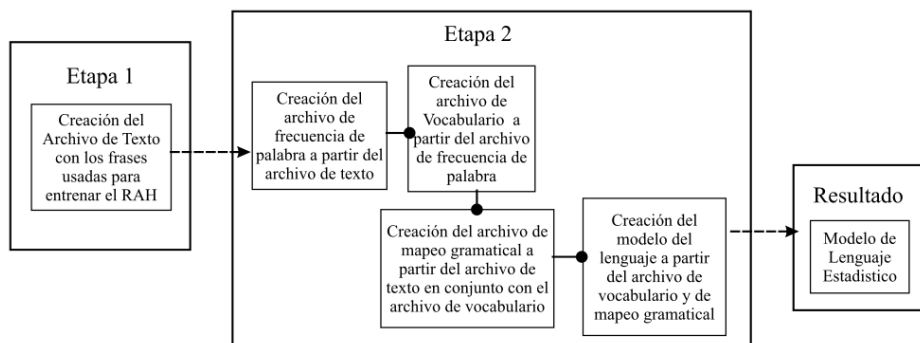


Figura 3. Proceso de creación del modelo del lenguaje estadístico utilizando el software CMUCLMTK.

El proceso de creación de un Modelo del Lenguaje Estadístico se inicia al crear en primer lugar el archivo de frecuencia de palabra. Dicho elemento permitirá crear un archivo de vocabulario que obtendrá todas las palabras que componen el texto que se utiliza para la creación del modelo del lenguaje. Con el archivo de texto en conjunto con el archivo de vocabulario, se obtiene el archivo de mapeo gramatical. Con este archivo y los archivos de vocabulario se puede realizar la creación del modelo del lenguaje necesario para el entrenamiento del modelo acústico y el funcionamiento del RAH, este proceso se muestra en la Figura 3. Dicho proceso es inherente al software CMUCLMTK y todos los archivos mencionados con anterioridad en esta sección son resultado del funcionamiento del mismo, cabe resaltar que el archivo de vocabulario del cual se habla en esta sección, solo cumple una función en la creación del modelo de lenguaje y no se encuentra de ninguna manera relacionado y su contenido es diferente al del archivo de vocabulario expuesto en la sección de preparación pre-desarrollo.

2.2.3. Entrenamiento del modelo acústico

El entrenamiento del modelo acústico se realiza mediante el software SphinxTrain. Para realizar el entrenamiento del modelo acústico se necesita el modelo del lenguaje, el diccionario fonético y los elementos creados en la sección de preparación pre-desarrollo; estos son principalmente los audios grabados por los usuarios para el entrenamiento del sistema además de los siguientes archivos:

- Archivo.phone - archivo que contiene la lista de fonemas presentes en el diccionario fonético.
- Archivo.filler - archivo que contiene la lista de etiquetas “< s >” que representan los silencios y límites de los segmentos hablados de las grabaciones de audio
- Archivo _train.fileids - lista de archivos de entrenamiento grabados, relacionados con textos de entrenamiento.
- Archivo _train.transcription - archivo que contiene la lista de textos de entrenamiento.
- Archivo.test.fileids - lista de archivos de entrenamiento grabados relacionados con textos de prueba.
- Archivo _test.transcription - archivo que contiene la lista de textos de prueba.

Para iniciar el entrenamiento solo es necesario ejecutar el comando de configuración, el cual creará una carpeta donde se almacenará el modelo acústico entrenado y dentro de esta un archivo de configuración *sphinx_train.cfg*. Así, se debe configurar según las características y las necesidades del modelo acústico a desarrollar. Se debe incluir dentro de la carpeta del modelo acústico los archivos de pre-desarrollo que se mencionaron anteriormente y una carpeta donde se almacenarán los audios, los cuales deberán estar ordenados según la configuración o la relación expuesta en el Archivo *_train.fileids*.

En el archivo de configuración se debe modificar las rutas de los archivos de pre-desarrollo, de igual manera y de ser necesario, se debe modificar el tipo de archivo de modelo del lenguaje con el que se desea decodificar y realizar el entrenamiento, escoger la frecuencia a la que se encuentran grabados los audios (preferiblemente 16 kHz) o modificar el filtro aplicado a las señales de audio; la voz humana se encuentra entre los rangos de 400 Hz a 6.000 Hz, por lo cual es recomendable aplicar un filtro en los 200 Hz para eliminar cualquier posible ruido que pueda perturbar el funcionamiento del reconocedor.

El modelo acústico se entrena en tres etapas como se representa en la Figura 4. En la primera parte el sistema verifica los requisitos del entrenamiento con el fin de determinar y comprobar que se encuentren en orden los archivos de pre-desarrollo necesarios en el entrenamiento. La segunda parte es la extracción de características en la cual se divide la señal en segmentos para realizar un procesamiento de dicha señal, extraer sus características y generar un conjunto de vectores como resultado del análisis realizado por el software SphinxTrain.

En relación con el conjunto de vectores se realiza la tercera parte del entrenamiento; en esta se crea un modelo probabilístico teniendo como referencia a los HMM, el cual asocia a las probabilidades de las palabras obtenidas de la señal de audio entrante con las probabilidades existentes en el modelo del lenguaje para estas mismas; el resultado de esta etapa se denomina decodificación y tiene como resultado una carpeta que contiene los elementos de un modelo acústico.

El sistema realiza un test de entrenamiento en donde usa los archivos de prueba para verificar el funcionamiento y demostrar los posibles errores del modelo acústico; en la presente investigación estas pruebas son denominadas pruebas de entrenamiento y son el primer filtro de evaluación del

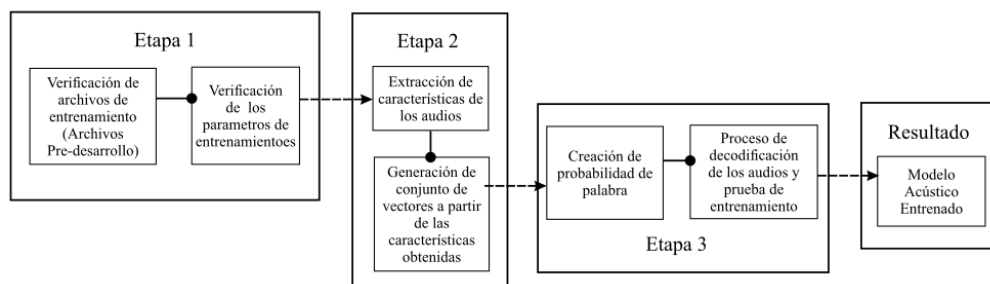


Figura 4. Proceso de entrenamiento del modelo acústico.

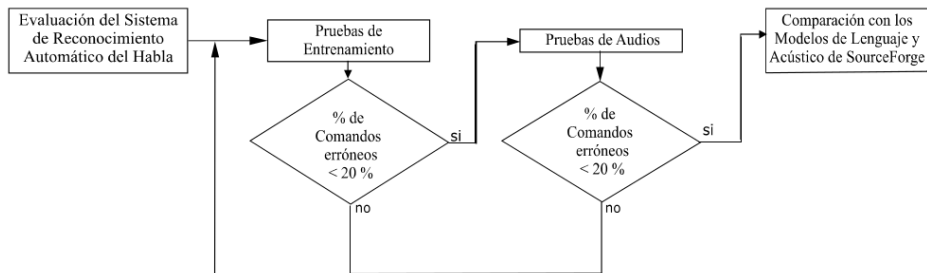


Figura 5. Proceso de evaluación del sistema de RAH.

sistema. La duración del proceso de entrenamiento puede variar dependiendo de la cantidad de audios a analizar, en promedio una hora de grabaciones tiene una duración de entrenamiento de catorce horas.

2.2.4. Evaluación del sistema de RAH desarrollado

La evaluación de los modelos acústico y de lenguaje se realizó tal y como se muestra en la Figura 5, analizando primero los resultados de entrenamiento, los cuales son producto de la parte final del proceso de entrenamiento del modelo acústico, seguidos de pruebas del sistema de RAH con audios realizados por nativos de la región, de manera extraoficial se realizaron pruebas con acentos diferentes al de la región de Cúcuta para comprobar el posible escalamiento del proyecto a nivel nacional.

Los comandos con los cuales se evaluó el sistema se presentan en la Tabla II.

Tabla II. Comandos del sistema de RAH implementado.

| | | | |
|----------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Comandos versión 1.0 | Apagar luz dos | Comandos versión 2.0 | Apagar luz comedor |
| Encender luz uno | Apagar luz tres | Encender luz sala | Apagar luz habitación |
| Encender luz dos | Consultar probabilidad lluvia | Encender luz comedor | Consultar probabilidad lluvia |
| Encender luz tres | Generar lista mercado | Encender luz habitación | Generar lista mercado |
| Apagar luz uno | Consultar valor temperatura | Apagar luz sala | Consultar valor temperatura |

Por último, se compararon los resultados obtenidos con el sistema de RAH desarrollado con los resultados arrojados por el modelo de lenguaje y modelo acústico de la página SourceForge. Para esta comparación se utilizaron los mismos audios; estos resultados se presentan en la siguiente sección.

En caso de que los resultados de entrenamiento no superen el 80 % de acierto o para este caso específico, no reconozca todos los comandos bajo los cuales operara el sistema, es necesario realizar nuevamente el entrenamiento del sistema, es decir, verificar que los audios estén grabados correctamente y de ser el caso, grabarlos nuevamente; de ser necesario, cambiar el modelo de lenguaje con

el que se está decodificando el sistema o los comandos con los cual este opera; y por último modificar el archivo de configuración de entrenamiento `Sphinx_train.cfg` para que el sistema entrenado cumpla con las características deseadas. Luego se ejecutará nuevamente el entrenamiento mediante el software SphinxTrain.

3. Resultados

En la Tabla III se relacionan las personas empleadas para el entrenamiento con su ciudad de origen, el sexo y la cantidad de archivos empleados para ejecutar el entrenamiento de los modelos y las pruebas de los mismos.

Tabla III. Características de los hablantes.

| Habla | Ciudad de origen | Tipo de audio | Género | N° de audios | |
|-------|------------------|---------------|-----------|---------------|--------------------------|
| | | | | Entrenamiento | Pruebas de entrenamiento |
| N°1 | Lourdes | Entrenamiento | Femenino | 200 | 9 |
| N°2 | Cúcuta | Entrenamiento | Femenino | 200 | 9 |
| N°3 | Gramalote | Entrenamiento | Femenino | 200 | 9 |
| N°4 | Cúcuta | Entrenamiento | Masculino | 200 | 9 |
| N°5 | Cúcuta | Entrenamiento | Masculino | 200 | 9 |
| N°6 | Cúcuta | Entrenamiento | Masculino | 200 | 9 |
| N°7 | Cúcuta | Entrenamiento | Masculino | 200 | 9 |

Como resultados se obtuvieron dos modelos del lenguaje estadístico y dos modelos del lenguaje de tipo gramática (un modelo de cada tipo por versión), con los cuales operan el sistema y se realizó la decodificación de los modelos acústicos entrenados.

La principal diferencia existente entre las dos versiones de modelos del lenguaje estadísticos y modelos gramaticales que se desarrollaron en este trabajo es el cambio de los comandos con los que opera el sistema. La justificación de dicho cambio se orienta a mejorar el reconocimiento al momento de interpretar las órdenes dadas por el usuario.

Con base en los dos modelos acústicos (1.0 y 2.1) entrenados, se elaboró un manual para entrenar este tipo de modelos, de igual forma en el desarrollo de los modelos de lenguaje para ambos procesos se emplea la herramienta CMU Sphinx. Las versiones de los modelos acústicos 1 y 2 se diferencian al igual que los modelos del lenguaje en los comandos que debe reconocer.

Los modelos desarrollados están orientados para una aplicación de reconocimiento del habla “control por comandos” entrenados para la identificación de nueve comandos (Tabla II). Como se aprecia en la Tabla IV, la versión 1 en los resultados de entrenamiento se presentó un porcentaje de comandos exitosos del 100%. No obstante, este valor obtenido solo es válido para los audios con los cuales se desarrollaron los modelos lo cual se evidenció cuando se ejecutaron pruebas con audios externos. Al realizar las pruebas de reconocimiento, estas en algunas ocasiones presentaban errores en los primeros seis comandos debido a que eran fonéticamente y gramaticalmente muy parecidos. En la versión 2 fue necesario realizar un nuevo entrenamiento, porque solo se alcanzó una

tasa de acierto del 66 % en el modelo 2.0 producto de un error en los archivos de pre-desarrollo. Esto fue solucionado regrabando los archivos, logrando alcanzar en la versión 2.1 tasa de acierto en el entrenamiento del 100 %. A la versión 2.0 no se le realizó prueba de audios debido a que los resultados de entrenamiento del modelo acústico presentaron una exactitud inferior al 80 %.

Los valores de la tasa de acierto se tabularon tal y como se definió en la sección de evaluación del sistema de RAH desarrollado. Dicha tasa se calculó según la cantidad de comandos reconocidos correctamente, es decir el sistema debía reconocer todas las palabras de manera correcta y en el orden correcto.

Tabla IV. Resultados del entrenamiento de los modelos acústicos.

| Versión del modelo acústico | Resultado entrenamiento | | Resultado pruebas de audio | |
|-----------------------------|-------------------------|------------------|----------------------------|------------------|
| | N de audios | Tasa de aciertos | N de audios | Tasa de aciertos |
| Modelo acústico 1.0 | 1463 | 100 % | 450 | 30 % |
| Modelo acústico 2.1 | 1463 | 100 % | 450 | 83 % |

En la versión 2.1 se logró disminuir el valor de porcentaje de los comandos erróneos a casi una cuarta parte de la versión 1.0 y por debajo del 20 % gracias a que se mejoró la calidad de los audios de entrenamiento, se cambió la frecuencia de trabajo a 16 kHz y se utilizó un diccionario grande de entrenamiento, pero para la evaluación este mismo se redujo a los comandos de ejecución. De igual manera tal y como se muestra en la Figura 6, se comprobó que la metodología implementada y los cambios realizados en los archivos de pre-desarrollo fueron efectivos y se aplicaron correctamente, puesto que el error de las pruebas de audio de la versión final (versión 2.1) es inferior al error de pruebas de audio del sistema RAH conformado por los modelos acústicos y de lenguaje alojados en los reposito-

rios de SourceForge, los cuales se evaluaron con los mismos audios con los que se trabajó en esta investigación, aunado a lo anterior, presentaron una tasa de acierto del 43 %.

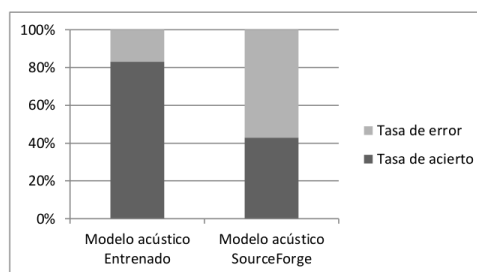


Figura 6. Resultado Modelo Acústico Entrenado Vs SourceForge.

La tasa de acierto obtenida con los modelos desarrollados es del 83 %, la cual se obtuvo al promediar la tasa de reconocimiento individual de 30 personas con las que se llevaron a cabo la evaluación de los modelos. Cada persona probó el sistema con quince comandos para un total de 450 archivos de audio, esta información se puede encontrar en la Figura 7. Todos los hablantes son originarios de la ciudad Cúcuta, excepto el No. 1 y No 2 que son de Lourdes y Gramalote respectivamente.

4. Conclusiones

El número de participantes en el proceso de entrenamiento de los modelos acústicos y de lenguaje influye significativamente en la calidad del procesamiento de voz del reconocedor debido a que

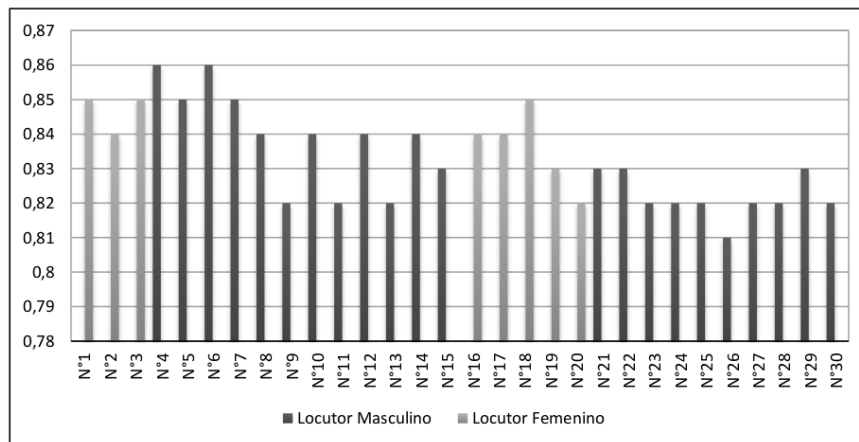


Figura 7. Tasa de acierto de reconocimiento por locutor en la prueba de audios.

entre mayor sea la población que participe ente proceso mejor va a ser la respuesta del sistema, pues consigue un rango más grande de características fonéticas.

La ventaja de emplear un diccionario largo como el de SourceForge para el entrenamiento es que el sistema entrena mayor cantidad de palabras las cuales pueden ser usadas posteriormente como comandos del sistema, la desventaja es el tiempo de entrenamiento ya que es directamente proporcional a la cantidad de palabras entrenadas. Se utilizó un diccionario corto para la ejecución del reconocedor a fin de limitar las palabras que él puede entender a los comandos que se van emplear en la futura aplicación del mismo mejorando así la tasa de acierto del sistema.

Teniendo en cuenta que en las pruebas de reconocimiento se obtuvo una tasa de éxito superior al 80 % es posible usar estos modelos para el desarrollo y la implementar un sistema de RAH para una aplicación orientada a la asistencia de personas con discapacidad visual o incapacidad de movimiento basada en la metodología de control “Command and control”. Para esto se puede emplear el sistema embebido raspberry pi el cual se empleó en este trabajo y cuenta con diferentes protocolos de comunicación, una buena capacidad de procesamiento y control, además puede prestar diferentes servicios como por ejemplo servidor web, servidor ftp y servidor SQL que un proyecto como este demandaría.

5. Agradecimientos

Un agradecimiento especial a las personas que sirvieron de locutor y prestaron su voz para el desarrollo de esta investigación; de igual manera a los evaluadores, editor y a la revista en general, por la atención prestada y las contribuciones dadas en pro del fortalecimiento y mejoramiento del artículo, las cuales representaron un aporte significativo para la obtención de la versión final del mismo.

Referencias

- [1] F. Mouttadi, F. Granados-Lovera, J. Delgado-Hernández, “Activación de funciones en edificios inteligentes utilizando comandos de voz desde dispositivos móviles”. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, abril-junio 2014, pp.175-186. [En línea]. Disponible en: <http://www.revele.com.ve/www.redalyc.org/articulo.oa?id=40430749002>. ↑363
- [2] J.M. Alcubierre, J. Minguez, L. Montesano, L. Montano, O. Saz, E. Lleida, “Silla de Ruedas Inteligente Controlada por Voz”. Primer Congreso Internacional de Domótica, Robótica y Teleasistencia para todos, 2005 . [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Javier_Minguez/publication/237524693.Silla_de_Ruedas_Inteligente_Controlada_por_Voz/links/00b4952bfed6f95e49000000.pdf. ↑363
- [3] M. Y. El Amrani, M.M. H. Rahman, M. R. Wahiddin y A. Shah, “Building CMU Sphinx Language Model for The Holy Quran using Simpl ified Arabic Phonemes”. *Egyptian Informatics Journal*, vol. 17, no. 3, November 2016, pp. 305–314. ↑364
- [4] M. Saqer, “Voice speech recognition using hidden Markov model Sphinx-4 for Arabic”. M.S. thesis, University of Houston-Clear Lake, ProQuest Dissertations Publishing, 2012 . [En línea]. Disponible en: <https://search.proquest.com/docview/1029871476?account-tid=43636>. ↑364
- [5] U. Uebler, “Multilingual speech recognition in seven languages”. *Speech Communication*, vol. 35, no. 1–2, August 2001, pp. 53–69. ↑364
- [6] J. Köhler, “Multilingual phone models for vocabulary-independent speech recognition tasks”. *Speech Communication*, vol. 35, no. 1–2, August 2001, pp. 21–30. ↑364
- [7] V. Z. Képuska, P. Rojanasthien, “Speech Corpus Generation from DVDs of Movies and TV Series”. *Journal of International Technology and Information Management*, vol. 20, no. 1-2, 2011, pp. 49-82. [En línea]. Disponible en: <https://search.proquest.com/docview/1357567679?accountid=43636>. ↑364
- [8] CMU Sphinx Project by Carnegie Mellon University, *Open Source Speech Recognition Toolkit*. [En línea]. Disponible en: <http://cmusphinx.sourceforge.net/>. ↑
- [9] Y. Wang, X. Zhang, “Realization of Mandarin continuous digits speech recognition system using Sphinx”, *2010 International Symposium on Computer Communication Control and Automation (3CA)*, 2010 . [En línea]. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5533801/>. ↑364
- [10] A. Ceballos, A. F. Serna-Morales, F. Prieto, J. B. Gómez, T. Redarce, “Sistema audiovisual para reconocimiento de comandos”. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 19, no. 2, 2011, pp. 278-291 . [En línea]. Disponible en: <https://search.proquest.com/docview/906290348?accountid=43636>. ↑364
- [11] A . Ceballos, Tesis para optar al grado de Magíster. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales. Colombia. 2009. ↑364
- [12] R. Calvo Arias, “Reconocimiento de voz”. Proyecto de Graduación licenciatura en Ingeniería Electrónica, Instituto Tecnológico de Costa Rica. Escuela de Ingeniería Electrónica, 2002 . [En línea]. Disponible en: <http://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/5652>. ↑365
- [13] E. Gamma, D. Amaya Hurtado, O. Sandoval, “Revisión de las tecnologías y aplicaciones del habla sub-vocal”. *Ingeniería*, vol. 20, no. 2, pp. 277–288 . [En línea]. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2015.2.a07>. ↑365
- [14] S. Oberle, “Detection and estimation of acoustical signals using hidden Markov model”. Ph.D. dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zuerich, Switzerland, ProQuest Dissertations Publishing, 1999 . [En línea]. Disponible en: <https://search.proquest.com/docview/304550977?accountid=43636>. ↑365
- [15] A. Varela, H. Cuayáhuitl y J. A. Nolasco-Flores, “Creating a Mexican Spanish version of the CMU Sphinx-III speech recognition system”, *Progress in Pattern Recognition, Speech and Image Analysis*, Springer, 2003, pp. 251–258. ↑365
- [16] R. Mingov, E. Zdravevski y P. Lameski, “Application of Russian Language Phonemics to Generate Macedonian Speech Recognition Model Using Sphinx”, *ICT Innovations 2016*, September 2016 . [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/308626983_Application_of_Russian_Language_Phonemics_to_Generate_Macedonian_Speech_Recognition_Model_Using_Sphinx. ↑365
- [17] P. Lamere, P. Kwok, E. B. Gouv, R. Singh, W. Walker, y P. Wolf, *The CMU sphinx-4 speech recognition system*, Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Hong Kong, 2003 . [En línea]. Disponible en: http://mlsp.cs.cmu.edu/people/rsingh/papers_old/icassp03-sphinx4.2.pdf. ↑367
- [18] M. Raab, R. Gruhn y E. Noeth, “A scalable architecture for multilingual speech recognition on embedded devi-

- ces". *Speech Communication*, vol. 53, no. 1, January 2011, pp. 62-74. ↑367
- [19] L. Villaseñor, M. Montes, M. Pérez, D. Vaufreydaz, *Comparación léxica de corpus para generación de modelos de lenguaje*, IBERAMIA workshop on Multilingual Information Access and Natural Language, 2002. [En línea]. Disponible en: <http://hal.inria.fr/docs/00/32/64/02/PDF/Villaseñor02a.pdf>. ↑368

Juan David Celis Núñez

Nació en Cúcuta, Colombia. Es Ingeniero Electrónico (2017) de la Universidad Francisco de Paula Santander, de Cúcuta, Colombia. Es estudiante investigador asociado del Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones, GIDET y miembro del Semillero de Investigación y Desarrollo en Microelectrónica Aplicada, SIDMA de la Universidad Francisco de Paula Santander. Miembro estudiantil IEEE.
Email: juandavidcn@ufps.edu.co

Rodrigo Andrés Llanos Castro

Nació en Cúcuta, Colombia. Es Ingeniero Electrónico (2017) de la Universidad Francisco de Paula Santander, de Cúcuta, Colombia. Es estudiante investigador asociado del Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones, GIDET y miembro del Semillero de Investigación y Desarrollo en Microelectrónica Aplicada, SIDMA de la Universidad Francisco de Paula Santander. Miembro estudiantil IEEE.
Email: Rodrigoandreslc@ufps.edu.co

Byron Medina Delgado

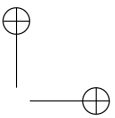
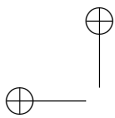
Nació en Cúcuta, Colombia. Es Ingeniero Electrónico (2003) de la Universidad Francisco de Paula Santander, de Cúcuta, Colombia. Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería Electrónica (2009) de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, de San Cristóbal, Venezuela. Es investigador asociado del Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones, GIDET de la Universidad Francisco de Paula Santander. Miembro profesional IEEE.
Email: byronmedina@ufps.edu.co

Sergio Basilio Sepúlveda Mora

Nació en Cúcuta, Colombia. Es Ingeniero Electrónico (2007) de la Universidad Francisco de Paula Santander, de Cúcuta, Colombia. Obtuvo su título de Master of Science in Electrical and Computer Engineering (2012) de la Universidad de Delaware, Newark, DE, Estados Unidos. Es investigador asociado del Grupo de Investigación y Desarrollo en Microelectrónica Aplicada, GIDMA de la Universidad Francisco de Paula Santander. Miembro profesional IEEE. Email: sergio.sepulveda@ufps.edu.co

Sergio Alexander Castro Casadiego

Nació en Cúcuta, Colombia. Es Ingeniero Electrónico (2008) de la Universidad Francisco de Paula Santander, de Cúcuta, Colombia. Obtuvo su título de Magíster en Ingeniería Electrónica (2014) de la Universidad Nacional Experimental del Táchira, de San Cristóbal, Venezuela. Es investigador asociado del Grupo de Investigación y Desarrollo en Electrónica y Telecomunicaciones, GIDET de la Universidad Francisco de Paula Santander. Miembro profesional IEEE.
Email: sergio.castroc@ufps.edu.co



Case report

Automatic Classification of Public Investment Megaprojects in Colombia from a Technical, Organizational and Environmental approach

Clasificación Automática del Avance de Megaproyectos de Inversión Pública en Colombia, desde un Enfoque Técnico, Organizacional y Ambiental

Hugo Ernesto Gutiérrez Vanegas¹, Miguel Alberto Melgarejo Rey^{*2}

¹TIVIT, ²Universidad Distrital Francisco José de Caldas, LAMIC

*Correspondence: mmelgarejo@udistrital.edu.co

Recibido: 30/01/2017. Modificado: 17/06/2017. Aceptado: 31/07/2017.

Abstract

Context: The TOE (Technical, Organizational, and Environmental) framework for the analysis of large scale projects is considered as the basis for the development of megaproject progress classification in accordance with the needs of the national planning agency in Colombia.

Method: Classification of a megaproject progress is supported in the selection of several features taken from the TOE. These feature set is used to configure a database from the projects registered in the project-surveillance platform of the national planning agency in Colombia. The database is used to train two classification models. Information about 3200 projects from 2008 to 2012 was used, covering four economic sectors (Environment and sustainable development, Energy and mining, Health and social care and transportation). Debugging of the database was carried out by an analytic and quantitative approach. Model training and validation were computed with 70 % and 30 % of data respectively.

Results: Obtained models have similar performances beyond 70 % in precision and agree in relevant input features.

Conclusions: This work is a starting point to develop an automatic tool that can be used by the national planning agency of Colombia in the a-priori evaluation of delays in public investment Megaprojects.

Keywords: Megaprojects, Complexity, Management, Neural networks, Support vector machines.

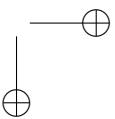
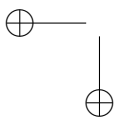
Language: Spanish



Cite this work as: H. Gutierrez, M. Melgarejo, "Automatic Classification of Public Investment Megaprojects in Colombia from a Technical, Organizational and Environmental approach", Ingeniería, vol. 22, no. 3, pp. 377-395, 2017.

©The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.11483>



Resumen

Contexto: Se considera el marco técnico, organizacional y ambiental (TOE, por sus siglas en inglés) para el análisis de proyectos de gran escala como contexto para el desarrollo de clasificadores de avance de megaproyectos, según las necesidades del Departamento Nacional de Planeación, Colombia.

Método: Se establecen algunas características para la clasificación del avance de proyectos de inversión pública, tomadas del marco TOE; a partir de estas, se construye una base de datos que se utiliza para entrenar dos clasificadores del avance de los proyectos reportados en la plataforma de seguimiento de proyectos de inversión del departamento de planeación nacional. Se empleó la información de cerca de 3200 proyectos registrados entre el 2008 y 2012, correspondientes a cuatro sectores económicos (medio ambiente y desarrollo sostenible, minas y energía, salud y protección social y transporte). La base de datos fue depurada siguiendo un enfoque analítico y cuantitativo. Se empleó el 70 % de los datos para entrenamiento y el 30 % para validación.

Resultados: Se obtienen algunos modelos con tasas de clasificación superiores al 70 %, lo que valida la elección de características a partir del análisis del marco TOE.

Conclusiones: Este trabajo es un punto de partida para la configuración de una herramienta que pueda ser usada por el departamento nacional de planeación en la evaluación a priori del retraso de megaproyectos de inversión pública.

Palabras clave: Complejidad, Gestión, Máquinas de vectores de soporte, Megaproyectos, Redes

Idioma: Español

1. Introducción

Los proyectos de ingeniería a gran escala tienden al fracaso a causa de sobrecostos y retrasos, debido al incremento de su complejidad y la poca importancia que se le atribuye a esta; lo anterior ha impulsado nuevos paradigmas de estudio de megaproyectos y la inclusión de métodos de sistemas blandos para modelar la gestión y posibles resultados de estos [1], [2].

Este trabajo se presenta como un estudio de interés a la hora de determinar algunas características relevantes para anticipar el posible avance de un proyecto de inversión pública, a partir de un marco que considera aspectos técnicos, organizacionales y ambientales [5]; las características seleccionadas, de acuerdo con este marco, alimentan dos modelos de clasificadores, cuyos desempeños son similares para este problema en cuestión. Este estudio podría ser el punto de partida para la definición de una herramienta de soporte generalizada en la gestión de proyectos a gran escala del Departamento Nacional de Planeación (DNP).

En primera instancia, se presenta un marco de referencia que reúne algunos conceptos necesarios para el entendimiento del trabajo realizado, recopilando algunos aspectos relevantes frente al marco técnico, organizacional y ambiental; seguidamente, se describe la obtención, selección y acondicionamiento de una base de datos a partir de los proyectos contenidos en la plataforma de seguimiento a proyectos de inversión (SPI). Luego, se describe el entrenamiento de clasificadores de avance de proyectos, mediante el entrenamiento de dos técnicas de inteligencia computacional: redes neuronales [19] y máquinas de vectores de soporte [20].

Por último, se presenta un análisis comparativo de los resultados de clasificación, de acuerdo con un conjunto de estadísticos utilizados en la evaluación de desempeño de clasificadores como son: precisión, sensibilidad, especificidad y curvas ROC. Se propone también una discusión acerca de los resultados obtenidos y el trabajo futuro.

2. Formulación del problema

2.1. Proyectos: cambio de paradigma

Tradicionalmente, un proyecto se entiende como un emprendimiento con un comienzo y un fin, dirigido por personas quienes buscan lograr unas metas establecidas teniendo restricciones de costo, agenda y calidad [1].

Los proyectos podrían entenderse como sistemas complejos [4], [5], considerándose así un marco de trabajo para tratar el problema común de fracasos en los proyectos, principalmente en términos de sobrecostos, retrasos e ineffectividad en las metas alcanzadas. La complejidad de proyectos se caracteriza por dos dimensiones: (a) la complejidad estructural compuesta por el tamaño o número de elementos en el proyecto junto con la interdependencia entre estos; (b) La incertidumbre vista en las metas del proyecto y los medios definidos para lograr estas metas [3].

La Figura 1 presenta un contraste entre un proyecto visto como un sistema secuencial, compuesto por paquetes de actividades independientes y un proyecto visto como un sistema complejo, compuesto por elementos interdependientes. El cambio de paradigma en cuanto al entendimiento de un proyecto y su gestión implica un acercamiento a la noción de complejidad, la cual se manifiesta no solo en los múltiples actores, factores o áreas involucrados sino también en el amplio rango de posibles relaciones que se dan entre estos [3], [4].

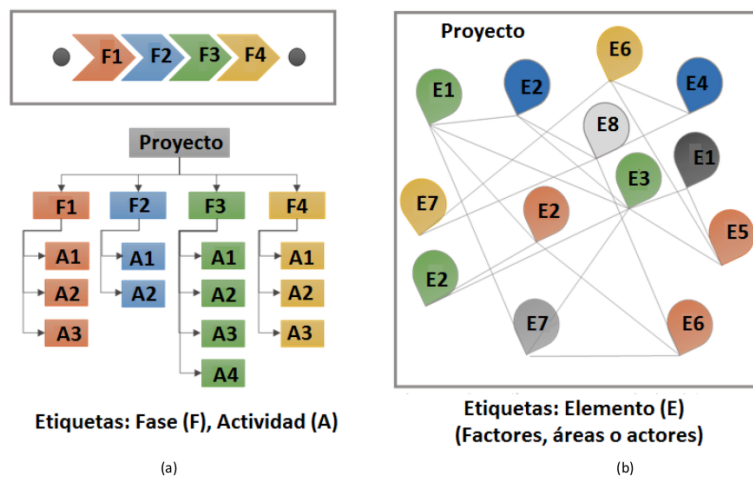


Figura 1. a) Proyecto visto como un sistema secuencial. b) Proyecto visto como un sistema complejo. Fuente: elaborado con base en [3].

Con el fin de contribuir en la gestión de proyectos de gran escala, se contempla en este trabajo el marco de referencia técnico, organizacional y ambiental (TOE, por sus siglas en inglés) [5]; este marco de referencia fue desarrollado desde el análisis de dos fuentes de conocimiento: (a) consultas bibliográficas de distintos autores que han abordado la complejidad de proyectos, y (b) entrevistas a gerentes e integrantes de seis megaproyectos. El resultado de esta combinación es un conjunto de 50 elementos distribuidos en tres categorías (TOE), las cuales se muestran en la Tabla I.

Con el fin de detallar un poco más los aspectos tratados por el TOE sin entrar a realizar una revisión exhaustiva de estos, se presenta la Figura 2(a), en la cual se muestra la distribución porcentual de los elementos del TOE de acuerdo con las categorías mencionadas en la Tabla I. Nótese que la categoría que reúne la mayor cantidad de elementos es la organizacional, sin embargo, sumados el componente técnico y ambiental superan a la primera. De esta forma, la distribución de los elementos sobre las cate-

gorías podría considerarse uniforme en términos prácticos, así el marco no muestra especial inclinación hacia alguna categoría en particular.

Tabla I. Aspectos cualitativos del marco TOE

| Técnico | Organizacional | Ambiental |
|-------------|--------------------|---------------------|
| Metas | Tamaño | Involucrados |
| Alcance | Recursos | Locación |
| Actividades | Equipo de proyecto | Condiciones mercado |
| Experiencia | Confianza | |

En la Figura 2(b), 2(c) y 2(d), se puede observar que en cuanto a los aspectos técnicos se refiere, los elementos relacionados con las tareas del proyecto son un elemento dominante; esto sugiere que la cantidad y naturaleza de las tareas involucradas en un proyecto de gran escala, contribuyen determinantemente en la configuración de su complejidad. En la categoría organizacional, los elementos que dominan están relacionados con el tamaño del proyecto y los recursos disponibles, evidenciándose que tanto las restricciones económicas como la cantidad de agentes involucrados son atributos moldeadores de la complejidad del proyecto en concordancia con la Figura 1(b). Por último, en la categoría ambiental se nota que los involucrados o afectados por el proyecto (i.e. *stakeholders*), constituyen un aspecto relevante dado que su participación condiciona la complejidad del proyecto en cuanto al incremento de relaciones y el aumento de restricciones.

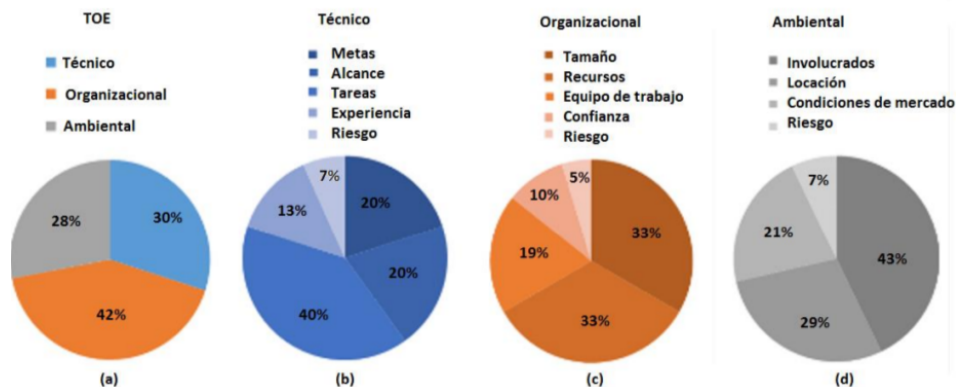
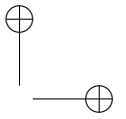
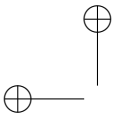


Figura 2. Distribución porcentual de los elementos marco TOE. a) Porcentajes de distribución general de los 50 elementos TOE. b) Distribución de elementos de tipo técnico. c) Distribución de elementos de tipo organizacional. d) Distribución de elementos de tipo ambiental.



2.2. Inteligencia computacional en la gestión de proyectos

Según el marco referencial consultado para este trabajo, se han encontrado tres líneas de estudio en los temas de análisis y gestión de proyectos a gran escala desde la inteligencia computacional: (a) técnicas de inteligencia computacional para la selección de proyectos según estructura y escala tecnológica [6]–[8]; (b) algoritmos computacionales para problemas de agendamiento y costo en proyectos específicos [9]–[11], y (c) sistemas de predicción del éxito de proyectos basados en redes neuronales [16]. Sin embargo, no se encontraron referencias que aborden la estimación del avance de megaproyectos de inversión pública desde estas técnicas.

Las posibilidades de usar la inteligencia computacional en el marco de la evaluación de proyectos serían muy amplias al igual que en cualquier otro dominio de aplicación. Los teoremas NFL (*Non Free Lunch*) [17], [18] previenen establecer una inclinación *a priori* por algún algoritmo en particular; de aquí surge la necesidad de llevar a cabo una comparación entre técnicas cuando se pretende abordar un nuevo problema.

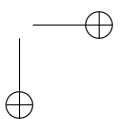
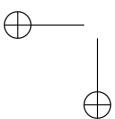
Particularmente, se consideran dos técnicas de clasificación automática de uso habitual desde la inteligencia computacional: redes neuronales y máquinas de vectores de soporte. Se presentará una breve introducción a las mismas invitando al lector a que profundice a través de la consulta de [19] y [20]. En cuanto al marco de interés de este trabajo, se han reportado en la literatura modelos de gestión de proyectos que incluyen redes neuronales y SVM (máquina de soporte vectorial), a manera de ejemplo se mencionan algunos: selección óptima de proyectos de innovación tecnológica aplicando árboles de decisión neurodifusos [6], agendamiento de proyectos según teoría de restricción de recursos con técnica de red neuronal basado en modelo de colonias de hormigas [10], sistemas de selección en portafolio de proyectos con redes neuronales y sistemas difusos [8], [16], predicción de la duración de proyectos con SVM [21], [22] e identificación del riesgo en proyectos por medio de una combinación entre SVM y algoritmos de colonias de hormigas [23].

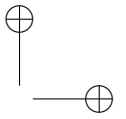
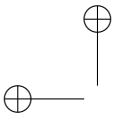
2.2.1. Redes neuronales

Una red neuronal está constituida por neuronas interconectadas y arregladas en tres capas (esto último puede variar). Las neuronas son funciones no lineales de múltiples entradas y una sola salida, cuya estructura está conformada por una combinación lineal de las entradas, seguidas de una función de activación donde aparece su carácter no lineal. Los parámetros de la combinación lineal se denominan los pesos de la neurona.

Los datos de entrada son preprocesados por una primera capa de neuronas, la cual produce un conjunto de niveles de disparo; estos niveles ingresan a la capa intermedia donde son combinados por medio de otras neuronas, generando nuevamente un abundante conjunto de niveles de disparo. La capa de salida combina los niveles de disparo intermedios para producir una única salida que representa en el caso particular de un clasificador una aproximación de la clase correspondiente a los datos suministrados en la entrada.

Las redes neuronales se entrenan con el propósito de lograr una generalización en la salida a partir de datos conocidos de entrada [12]. Una red neuronal debe aprender a calcular la salida correcta





para cada vector ejemplo de entrada; este proceso de aprendizaje es denominado proceso de entrenamiento o acondicionamiento de la red neuronal y el conjunto de datos sobre el cual se basa este proceso es llamado conjunto de datos de entrenamiento.

Se reconoce hoy en día principalmente dos métodos de aprendizaje con los que se pueden adaptar los pesos de una red neuronal en aras de lograr que esta trabaje como un clasificador, estos métodos son: (a) aprendizaje supervisado, el cual se caracteriza porque el proceso de aprendizaje se realiza mediante un entrenamiento controlado por un agente externo (i.e. un supervisor) que determina la respuesta que debería generar la red a partir de una entrada determinada; (b) aprendizaje no supervisado, las redes con aprendizaje no supervisado no requieren influencia externa para ajustar los pesos de las conexiones entre sus neuronas, la red no recibe ninguna información por parte del entorno que le indique si la salida generada en respuesta a una determinada entrada es o no correcta.

2.2.2. Máquinas de vectores de soporte

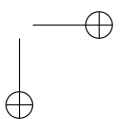
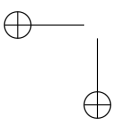
La máquina de vectores de soporte (SVM, por sus siglas en inglés), es un modelo de aprendizaje supervisado que procesa ejemplos numéricos reales y reconoce sobre estos patrones separados geoméricamente por un hiperplano. Un clasificador SVM básico utiliza funciones binarias lineales de tipo no probabilístico; de esta manera, dado un conjunto de ejemplos de entrenamiento, se inicia una representación de los ejemplos mediante un mapeado de puntos en un espacio N dimensional [13]. Nuevos ejemplos son referenciados a dos posibles grupos en tal espacio. A medida que se va ejecutando el entrenamiento, la topología de los agrupamientos se va ajustando.

Para el entrenamiento de una SVM se suelen seguir tres pasos: (a) mapear los puntos de entrenamiento a un espacio vectorial de mayor dimensión, (b) construir un hiperplano que separe los puntos en sus clases respectivas y (c) clasificar un punto nuevo de acuerdo con su ubicación con respecto al hiperplano. Diferentes vectores de soporte pueden generar un mismo hiperplano; así, por cuestiones de estandarización, dichos vectores deben escalarse de manera que la distancia entre el hiperplano y el patrón más cercano a este sea de uno. Se busca en el entrenamiento que el hiperplano obtenga la forma más confiable, es decir que exista la máxima distancia posible entre este y los patrones.

El aprendizaje en la SVM se lleva a cabo considerando que en su gran mayoría los problemas no son linealmente separables; por tanto, se busca hacer una transformación de los ejemplos de entrenamiento a un espacio vectorial de alta dimensión donde sea posible una solución mediante una separación lineal. Tal transformación se puede implementar por medio de un conjunto de funciones parametrizables que deben conformar un kernel, la elección del kernel depende en gran medida del problema de aplicación. Dentro de los kernels comúnmente usados se encuentran los lineales, polinomiales, radiales y sigmoides.

2.3. La plataforma SPI

Para este trabajo, el DNP ha puesto a disposición un registro de datos de proyectos que involucran presupuesto general de la nación; dicho registro de datos se encuentra alojado en la plataforma seguimiento a proyectos de inversión (SPI) [14], [15]. SPI es una ventana directa para ver los lo-



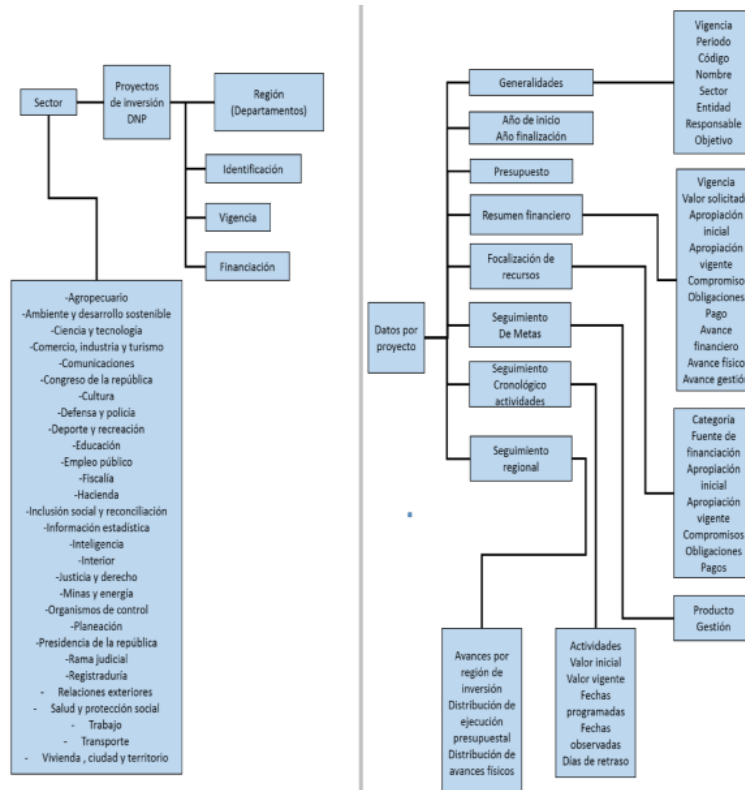


Figura 3. Descripción del SPI: (a) Clasificación de los proyectos, (b) Datos registrados.

gros y resultados generales en materia de inversión pública de entidades que planeen, ejecuten y evalúen proyectos de inversión; también es definida como una herramienta de utilidad al ciudadano colombiano para verificar las políticas del Plan Nacional de Desarrollo y la gestión del Gobierno Nacional.

La plataforma SPI ofrece información como: (a) los objetivos, presupuestos anuales, logros y metas de los proyectos más importantes del gobierno nacional; (b) una perspectiva de avance físico-financiero y cronológico de todos los proyectos de inversión pública, y (c) la evolución físico-financiera de los proyectos bajo múltiples lentes como por entidad, por sector, por departamento, por proyecto e incluso por estrategias transversales como Red Juntos, TIC o Ciencia y Tecnología [15].

Dentro de esta herramienta, los proyectos son clasificados de acuerdo con su región, origen de su financiación y sector de aplicación, tal como se muestra en la Figura 3(a). Nótese que dentro del aplicativo se reconocen actualmente más de veinte sectores de aplicación; en este sentido, se evidencia una diversidad latente en los proyectos registrados en cuanto a las tres dimensiones identificadas en el marco TOE.

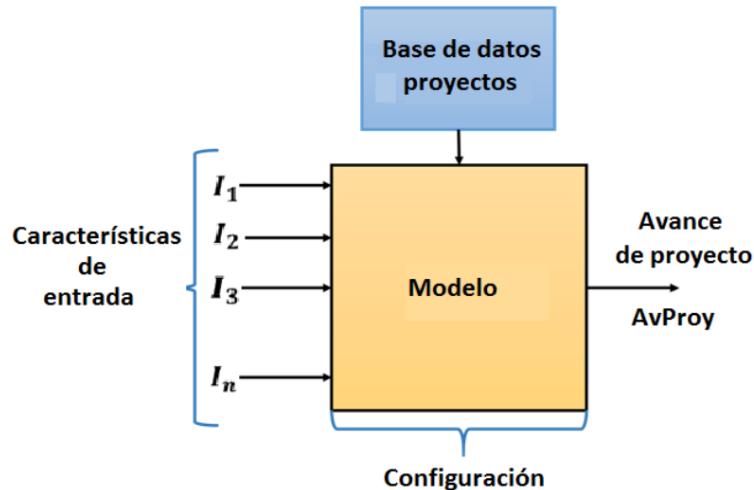


Figura 4. Representación del modelo de clasificación de avance de proyectos.

La plataforma SPI contiene registro de datos de proyectos entre 2008 y 2012 que involucran Presupuesto General de la Nación (PGN). El total bruto de proyectos es de 7934 divididos en veintinueve sectores y teniendo cerca de 43 características por proyecto, tal como se puede apreciar en la Figura 3(b). El indicador avance proyecto es prioritario en el sentido de que permite medir de manera porcentual el éxito anual por proyecto según metas logradas.

2.4. Pregunta de investigación

Según el alcance de este trabajo, el cual está basado en la necesidad presente en el DNP, según su área de inteligencia de negocios y la disponibilidad de los datos, se requiere un modelo computacional que clasifique el indicador avance a partir de algunos datos de entrada al inicio de cada proyecto; lo anterior con el fin de evaluar *a priori* el potencial retraso que un megaproyecto podría llegar a tener dadas sus características. En ese sentido, se dirige entonces la pregunta de investigación detrás de este trabajo: ¿cómo puede ser la clasificación, basada en inteligencia computacional del avance de proyectos, que considere características del marco TOE y una base de datos históricos de proyectos ya ejecutados SPI-DNP? La Figura 4 pretende aclarar la pregunta de investigación con la que se busca definir las características de entrada, la base de datos y la configuración de un modelo que permita la clasificación de avance de proyectos.

3. Materiales y métodos

El desarrollo de este trabajo partió de la obtención y acondicionamiento de una base de datos según los registros provistos en SPI y su posible asociación con los elementos aportados por el TOE; posteriormente se definieron dos escenarios para efectuar la clasificación de avance de proyectos mediante las técnicas de inteligencia computacional presentadas en la sección anterior.

3.1. Base de datos

En la plataforma SPI originalmente se contó con 7934 proyectos pertenecientes a veintinueve sectores económicos. El primer filtro de selección fue acorde con los proyectos pertenecientes a los sectores que más relación tuvieran con la ingeniería, estos fueron: transporte (960), ambiente y desarrollo sostenible (1027), salud y protección social (590) y minas y energía (554). La Tabla II presenta la distribución de la cantidad de proyectos por año para cada uno de los sectores seleccionados.

Tabla II. Distribución de proyectos por año según sectores seleccionados

| Sector | Año | | | | | Total |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|-------|
| | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | |
| Ambiente y desarrollo sostenible | 237 | 241 | 228 | 182 | 139 | 1027 |
| Minas y energía | 116 | 127 | 122 | 126 | 63 | 554 |
| Salud y protección social | 125 | 119 | 124 | 128 | 94 | 590 |
| Transporte | 183 | 209 | 175 | 178 | 215 | 960 |

Fuente: elaboración propia

Para el acondicionamiento de la base de datos sobre el conjunto de características definidas en la Tabla III, se efectuaron cinco pasos: (a) depuración de los indicadores SPI; (b) asignación de clases en característica de salida avance de proyectos; (c) balance de clases; (d) estudio correlación lineal, y (e) generación del espacio de características.

Tabla III. Características de entrada al modelo

| No. | Nombre | Descripción | Medida | Asociación con TOE |
|-----|---------------------------------|---|------------|--|
| 1 | Duración (Dur) | Duración del proyecto | Meses | TOE16: duración de proyecto |
| 2 | Apropiación vigente (ApV) | Presupuesto/capital apropiado al proyecto | Pesos | TOE18: Cantidad en inversión de capital (CAPEX) |
| 3 | Componente producto (CPr) | Grado de importancia y esfuerzo dedicado a metas producto(tangibles) | Porcentaje | TOE2: alineación de metas |
| 4 | Componente gestión (CGe) | Grado de importancia y esfuerzo dedicado a metas gestión(intangibles) | Porcentaje | TOE2: alineación de metas |
| 5 | Número de metas producto (NMPr) | Cantidad de metas tangibles del proyecto | Metas | TOE1: número de metas TOE3: claridad de metas |
| 6 | Número de metas Gestión (NMGe) | Cantidad de metas intangibles del proyecto | Metas | TOE1: número de metas TOE3: claridad de metas |

3.1.1. Depuración de los indicadores SPI

La depuración de los indicadores SPI se realizó sobre una confrontación entre estos *versus*, los elementos TOE con el fin de establecer un primer conjunto de elementos útiles de trabajo en aras de definir un primer juego de características de acuerdo con la Figura 4. La asociación de los datos de proyectos SPI con los elementos del marco TOE se desarrolló de la siguiente manera.

- Análisis de datos SPI y TOE: se extrajeron los datos SPI y una breve descripción de estos al igual que de los elementos TOE en aras de su entendimiento.
- Pre procesamiento de datos SPI: algunos indicadores SPI fueron procesados para determinar datos de mayor relevancia con respecto al marco de referencia TOE. Estos casos fueron año inicio y año finalización (datos SPI9 y SPI10), los cuales al ser sustraídos entre sí revelaron la duración completa de cada proyecto, y seguimiento regional de metas producto y metas gestión (dato SPI30).
- Conservación de datos SPI para la identificación de los proyectos: los datos SPI1 y SPI3, aunque no tienen relación con el marco TOE, fueron extraídos para facilitar la identificación y temporalidad de cada proyecto durante el presente estudio.

De este ejercicio se obtuvo el siguiente conjunto de elementos asociativos entre el SPI y el TOE, del cual a su vez se define un conjunto de seis características de entradas, tal como se presenta en la Tabla III.

- Sector (SPI5): permitió la selección de proyectos afines al área de ingeniería y poder contrastarlos con el marco TOE. Se aclara que este dato no contiene información detallada para determinar *riesgos técnicos* (TOE15) o *nivel de competencia* (TOE 49).
- Avance de proyecto (SPI9): se relaciona con *alineación de metas* TOE2. Representa la salida objetivo de clasificación. Se mide a manera de porcentaje.
- Año de inicio (SPI10): relación directa con duración de proyecto TOE16.
- Año de finalización (SPI11): relación directa con duración de proyecto TOE16.
- Apropiación vigente (SPI16): indica el CAPEX o cantidad de inversión de capital TOE18. Representa el presupuesto o capital apropiado para el proyecto en el año en curso.
- Descripción (SPI30): se puede evidenciar aquí relación con número de metas TOE1, alineación de metas TOE2, claridad de metas TOE3. Representa el tipo de meta definida por el proyectista ya sea de gestión o producto. Se requiere una interpretación de texto por parte de un experto para lograr establecer la cantidad. En el caso de meta producto se hace referencia a la consolidación material de entregables, mientras que las metas gestión hacen referencia al cumplimiento de actividades dentro del proyecto.
- Meta total (SPI31): en relación con TOE2, permite determinar el grado de importancia y esfuerzo dedicados a los tipos de meta, bien sea producto o gestión.

- Distribución de ejecución presupuestal (SPI46): es un dato orientado a la división del presupuesto general de la nación. Se usará como una variable categórica para hacer análisis parcial del comportamiento de los modelos de clasificación. Cubre desde elementos como número de locaciones (i.e. territorios administrativos involucrados) TOE22, condiciones climáticas TOE44 y riesgos ambientales TOE50.

3.1.2. Asignación de clases

De acuerdo con algunas discusiones con los expertos del DNP, determinar el avance de un proyecto desde el inicio de cada año no implica establecer un porcentaje sin incertidumbre. Una primera vía sería la clasificación de aquellos proyectos que tendrán un avance significativo con respecto a aquellos que no lo tendrán; así, una posible solución se podría establecer a manera de un ejercicio de clasificación en el que se distinga proyectos con un buen avance frente aquellos con un avance pobre. La asignación de categorías como “alto” y “bajo” se estableció a partir de las discusiones con los expertos del DNP; no existe a la fecha como tal una asignación formal de estas categorías según el porcentaje de avance de proyecto. Por tanto, para propósitos de este trabajo se realiza la propuesta de clases descrita en la Tabla IV. La franja intermedia fue pensada como un intervalo que permitiera agrupar los proyectos con un avance intermedio o que no fue cercano a las bandas límite del 30 % y 70 %

Tabla IV. Descripción de clases

| Avance de proyecto | Clase | Descripción |
|-------------------------|-------|--|
| Más del 70 % | 1 | Proyecto con un avance mayor al 70 % de lo planeado al cierre del año de vigencia. |
| Entre el 30 % y el 70 % | 0 | Proyecto con un avance entre el 30 % y 70 % de lo planeado al cierre del año de vigencia |
| Menos del 30 % | -1 | Proyecto con un avance menor al 30 % de lo planeado al cierre del año de vigencia |

3.1.3. Equilibrio de clases

De acuerdo con las clases propuestas, se realizó una revisión de los datos que contienen estas. La revisión consiste en verificar que presente una similitud en cuanto al número de proyectos clase 1 con respecto a los proyectos de clase -1. De ser posible, el entrenamiento de los modelos clasificadores tendría un mejor desempeño puesto que habría un balance de ejemplos. En aras de ajustar el desbalance, se revisó el avance de los proyectos que estuvieran detrás de este fenómeno; así se exploró el conjunto de datos para detectar aquellos proyectos que están fuera de tendencia en cuanto a avance se refiere. Se detectaron 279 proyectos en SPI con avances entre el 105 % y 16082 %; estas cantidades sorprenden dado que un avance de más del 100 % no tiene sentido. Tales magnitudes se deben principalmente a errores humanos al momento de introducir la información al SPI. Estos proyectos generan en parte el desequilibrio entre las clases, por lo que fueron tratados como puntos fuera de tendencia y removidos de la base de datos.

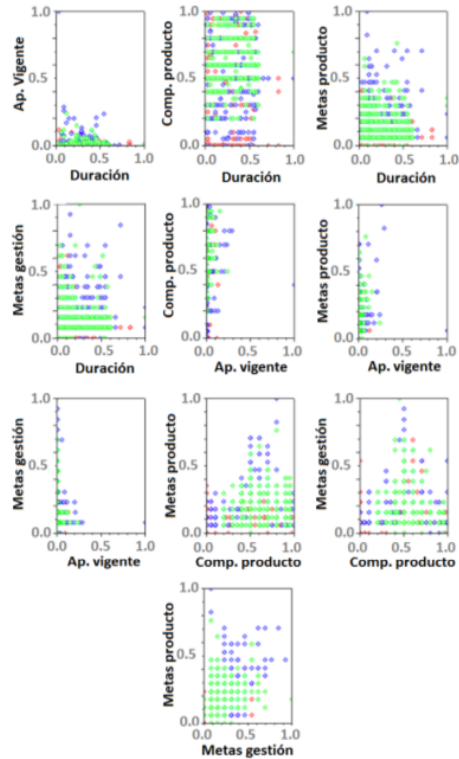


Figura 5. Representación por secciones bidimensionales del espacio de características obtenido.

3.1.4. Estudio de correlación lineal

De acuerdo con la aplicación del coeficiente de correlación lineal de Pearson entre las características seleccionadas luego del balance clases (Tabla V), se detecta que las variables componente producto (CPr) y componente gestión (CGe) son complementarias en su gran mayoría para lograr un 100 %. Como ejemplo se detecta que, si un proyecto tiene como componente producto 45 %, el dato componente gestión es 55 %. Puesto que esta situación se presenta en alrededor de un 95 % de casos, se sus-

traerá la variable componente gestión y se mantendrá la variable componente producto en representación de ambas.

Tabla V. Coeficiente de correlación de Pearson entre características

| Campos | Dur | ApV | CPr | NMPr | NMGe |
|-------------|--------|--------|-------|-------|--------|
| Dur | 1 | 0.025 | 0.250 | 0.001 | -0.043 |
| ApV | 0.025 | 1 | 0.057 | 0.148 | -0.020 |
| CPr | 0.250 | 0.057 | 1 | 0.187 | 0.121 |
| NMPr | 0.001 | 0.148 | 0.187 | 1 | 0.537 |
| NMGe | -0.043 | -0.020 | 0.121 | 0.537 | 1 |

3.1.5. Generación del espacio de características

Finalmente, la base de datos se desplegó a modo de espacio de características representado por secciones bidimensionales, tal como se muestra en la Figura 5. Esta representación se llevó a cabo

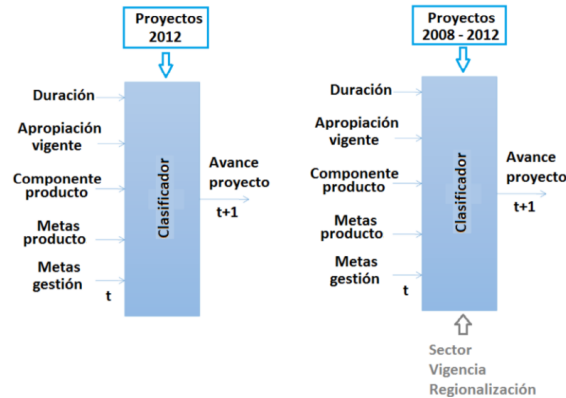


Figura 6. Representación de escenarios base de datos. a) Solo proyectos 2012. b) Proyectos 2008 a 2012.

con el fin de aproximarse a la naturaleza del problema de clasificación. Se anotaron las siguientes observaciones:

- El espacio apropiación vigente *versus* duración, aunque la mayor parte de los datos se encuentran en la parte inferior del plano, no es fácilmente separable la clase 1 (color verde) de la clase -1 (color rojo).
- Para los pares de características componente producto *versus* duración, metas producto *versus* duración, metas gestión *versus* duración, metas producto *versus* componente producto y metas producto *versus* metas gestión, los datos se encuentran distribuidos en todo el plano.
- En los pares de características componente producto *versus* apropiación vigente, metas gestión *versus* apropiación vigente y metas producto *versus* apropiación vigente, se puede distinguir la forma de unas pequeñas barras en los datos orientados al lado izquierdo de cada plano; sin embargo, no son fácilmente diferenciables las clases ya que hay datos de ambas superpuestos.
- Por último, el par metas gestión *versus* componente producto, aunque denota cierta forma triangular en sus datos, existe una buena cantidad de ellos que se encuentran mezclados en los bordes izquierdo y derecho del plano visto.

Las anteriores observaciones sugieren que el problema de clasificación de avance proyecto a partir de las características seleccionadas desde el TOE en relación con el SPI se muestra como un problema de separación no lineal.

3.2. Escenarios de bases de datos de proyectos

Desde las discusiones con los expertos del DNP, se identificó que la cultura de registro de proyectos es un proceso de aprendizaje por parte de los proyectistas; así, de los primeros años de registro se sabe que pueden existir imprecisiones en los datos alojados en el SPI. Este aspecto

mejora conforme aparecen nuevos registros de proyectos en los años siguientes; por tanto, se consideró plantear dos escenarios para el desarrollo de la clasificación. En la primera se buscó reducir la incertidumbre frente al registro de atributos en el SPI, considerando los proyectos más recientes; sin embargo, se hace evidente una posible pérdida de información por contar con una muestra reducida de proyectos. En el segundo caso, se exploró la situación contraria en la cual, la muestra de proyectos aumenta, pero se reduce la fiabilidad de la información contenida por proyecto.

La Figura 6 representa gráficamente los dos escenarios propuestos en relación con el modelo de clasificación de la Figura 4. El primero de ellos consiste en tomar solo los proyectos del 2012, conjunto de proyectos más reciente que conservaría una única temporalidad de registro y ejecución de cada proyecto. En este primer escenario, al estar centrado en el último año de observación, se considera un grupo selecto de proyectos sobre los cuales se ha realizado en registro juicioso de sus atributos en el SPI. Como segundo escenario se propone tomar el conjunto de datos de proyectos desde el 2008 hasta el 2012. Esto permite tener en cuenta una mayor cantidad de proyectos. Este escenario se propone en el sentido de contar con una muestra más amplia de proyectos, pero sobre la cual existe incertidumbre frente al registro de sus atributos.

3.3. Entrenamiento y prueba de modelos de clasificación

Para los dos escenarios de base de datos, se desarrolló una metodología de experimentación para un modelo de clasificación basado en redes neuronales y otro modelo basado máquinas de vectores de soporte. El modelo basado en redes neuronales consistió en una arquitectura *Feed-forward* implementada con ayuda de la caja de herramientas ANN Toolbox del *software* Scilab V5.5.0. Como parámetros fijos se tuvieron 100 *epochs* y tasa de aprendizaje 0,1; como parámetros variables se realizaron todas las combinaciones posibles de entradas (26 configuraciones en total) y variaciones en el número de neuronas de capa oculta según potencia de 2 (2, 4, 8 y 16 neuronas). Para cada configuración resultante se realizaron 100 pruebas de entrenamiento y validación, dada la aleatoriedad presente en la inicialización de los pesos de las redes. La Figura 7(a) representa la configuración de experimentación de las redes neuronales.

El modelo basado en máquinas de vectores de soporte consistió en un algoritmo de entrenamiento SMO provisto en la caja de herramientas LIBSVM Toolbox del *software* Scilab V5.5.0. Como parámetros variables se realizaron todas las combinaciones posibles de entradas (26 configuraciones en total) y variaciones en el tipo de configuración de función de kernel (lineal, polinomial, base radial y sigmoide). Para cada configuración resultante se realizaron 100 experimentos dada la aleatoriedad en la inicialización de los parámetros de los kernels. La Figura 7(b) representa la configuración de experimentación de las máquinas de vectores de soporte.

En resumen, por cada escenario y tipo de modelo se realizaron 10400 experimentos según (1) y (2). En cada uno de los experimentos se segmentó la base de datos de manera aleatoria, garantizando un 70 % para entrenamiento y el 30 % para prueba.

$$Total_config = No.config.caract_entrada * No.config.modelo \quad (1)$$

$$Total_experimentos = 100 * experimentos * Total_config \quad (2)$$

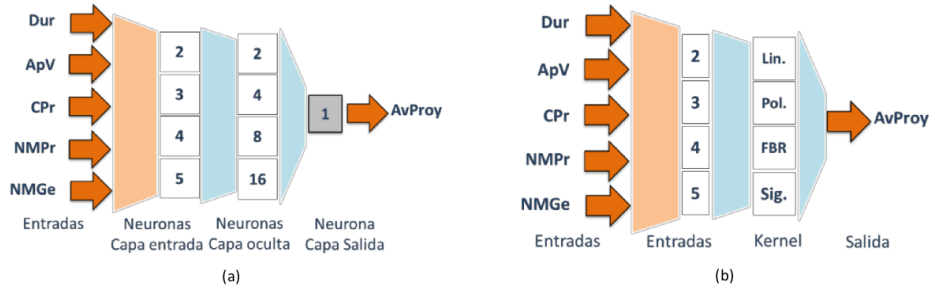


Figura 7. (a) Representación de configuración de la red neuronal, (b) Representación de configuración de Máquinas de Vectores de Soporte.

3.4. Estadísticos de interés

Para cada uno de los experimentos realizados se tomaron mediciones de precisión P , especificidad E y sensibilidad S , ecuaciones (3), (4) y (5). Las tres en conjunto permiten evaluar el desempeño del clasificador teniendo en cuenta los verdaderos positivos V_p y verdaderos negativos V_n dado el conocimiento en los datos de los Ejemplos positivos E_p y los Ejemplos negativos E_n .

$$P = \frac{V_p + V_n}{E_p + E_n} \quad (3)$$

$$E = \frac{V_n}{E_p + E_n} \quad (4)$$

$$S = \frac{V_p}{E_p + E_n} \quad (5)$$

También fueron usadas las curvas ROC como una herramienta gráfica importante para determinar el desempeño del clasificador a través de la relación existente entre la tasa de verdaderos positivos y la tasa de falsos positivos (Figura 8). Particularmente se consideró caracterizar el área bajo la curva ROC (AUC).

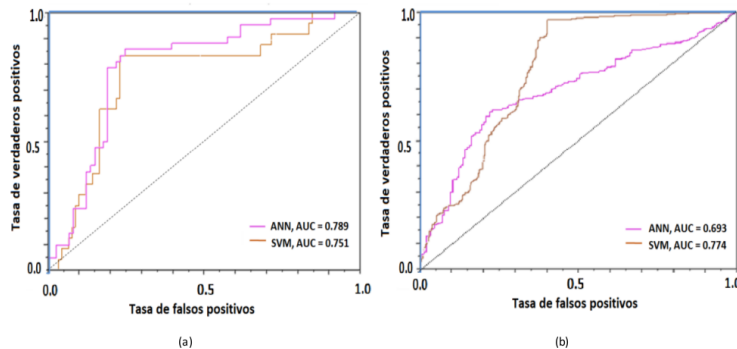


Figura 8. Curvas ROC mejores modelos ANN y SVM: (a) escenario 1, (b) escenario 2.

4. Resultados

Se presenta aquí los resultados del estudio comparativo de clasificación de avance de proyectos mediante ANN y SVM en los escenarios generados a partir de la base de datos.

4.1. Primer escenario

La Tabla VI muestra las mediciones de precisión, especificidad, sensibilidad y AUC para las dos mejores configuraciones de redes neuronales y SVM encontradas. La Figura 8(a) presenta las correspondientes curvas ROC para estos dos clasificadores. De aquí se puede observar que el modelo basado en una red neuronal supera al basado en una SVM, puesto que presenta una mejor curva ROC (i.e. mayor área) y mayor precisión. Puntualmente la ANN supera en precisión en un 1,12 % relativo al SVM. Se observa que funcionalmente estos dos modelos conservaron en común las características de entrada: duración, apropiación vigente, componente producto y número de metas gestión. Solo la red neuronal incluye en este experimento de manera adicional la entrada número de metas producto.

Los modelos estructuralmente hablando no serían comparables; pero al menos en términos de la parsimonia frente al número de entradas, los clasificadores resultan similares. En el caso particular de la ANN, la red opera con cinco neuronas en la capa de entrada, dos en la capa oculta y una neurona en la capa de salida, para un total de ocho funciones no lineales. En el caso de la SVM, esta opera con un kernel lineal sobre un conjunto de 220 vectores de soporte.

Tabla VI. Resultados del primer escenario.

| Modelo | P(%) | I-E | S | ROC(AUC) |
|--------|--------|-------|-------|----------|
| ANN | 78.261 | 0.247 | 0.833 | 0.789 |
| SVM | 77.391 | 0.264 | 0.917 | 0.751 |

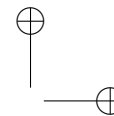
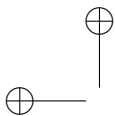
Tabla VII. Resultados del segundo escenario.

| Modelo | P(%) | I-E | S | ROC(AUC) |
|--------|--------|-------|-------|----------|
| ANN | 70.028 | 0.246 | 0.682 | 0.693 |
| SVM | 77.871 | 0.048 | 0.725 | 0.774 |

4.2. Segundo escenario

Para el segundo escenario se podría declarar como ganador el modelo basado en máquina de vectores de soporte puesto que presenta una mejor curva ROC (11,68 % más que ANN) y precisión frente al modelo finalista basado en ANN. Puntualmente el SVM supera en AUC en un 11,68 % y en precisión en un 11,19 % relativo a la ANN. La Tabla VII resume las mediciones de precisión, especificidad, sensibilidad y AUC para los dos mejores experimentos, mientras que la Figura 8(b) presenta las correspondientes curvas ROC.

Se observa que funcionalmente estas dos configuraciones conservaron en común las características de entrada: duración, apropiación vigente y componente producto. Solo la red neuronal incluye de manera adicional la entrada número de metas gestión. La mejor ANN encontrada presenta la misma configuración de la red neuronal obtenida en el primer escenario. Mientras que en el caso de la SVM, el kernel que mostró el mejor desempeño fue el radial con un mayor número de vectores de soporte, 1260 en total.



5. Discusión

El desarrollo metodológico presentado en este trabajo involucró la conceptualización de un megaproyecto desde el marco de referencia TOE, el cual pudo ser enlazado analíticamente a una plataforma existente de registro de proyectos de inversión como SPI-DNP. El ejercicio desarrollado reconoció atributos del SPI que se relacionan directa e indirectamente con el TOE. En este sentido, se puede evidenciar que la formulación teórica que hace el TOE de un megaproyecto es acertada en términos prácticos. Por otro lado, este ejercicio de análisis desembocó en el planteamiento de unos aspectos que configuran una intersección entre el TOE y la plataforma SPI. De allí se identificó un conjunto de características cuantitativas sobre las cuales se fundamentó un posible modelo de clasificación del avance de un proyecto dado el conocimiento a-priori de sus características.

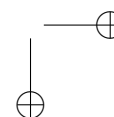
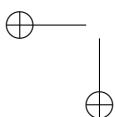
El conjunto de características: duración, apropiación vigente y componente producto podrían ser indispensables para estudios futuros de clasificación de avance de proyectos SPI; sin embargo, es posible que se requieran más elementos SPI que permitan describir de mejor manera los proyectos en estudio, esto manteniendo como referencia el marco TOE. Una exploración de características contenidas en SPI de base lingüística podría complementar el modelo de clasificación propuesto en este trabajo.

El modelo clasificador del segundo escenario (base de datos proyectos 2008 a 2012) presentó un resultado de clasificación comparable frente al primer escenario (77,871 % frente a 78,261 % respectivamente. Diferencia relativa=0,5 %). Para estudios futuros la temporalidad de registro de los datos podría omitirse, según se propone en el segundo escenario. Podría realizarse un ajuste de los umbrales de las clases 1 ($avproy > 70\%$) y -1 ($avproy < 30\%$), permitiendo quizás mejorar el desempeño de clasificación y curvas ROC.

6. Conclusiones

Desde el marco referencial considerado, se presenta una primera propuesta metodológica para la clasificación de avance de proyectos mediante modelos de inteligencia computacional, y un marco de referencia de análisis de megaproyectos como es el TOE; en este sentido, el desarrollo analítico seguido en este trabajo ha permitido la identificación de características relevantes para la clasificación del avance de megaproyectos de inversión pública al menos para el caso colombiano. Aspectos como la duración del proyecto, la apropiación de recursos de inversión al igual que la naturaleza de los productos desarrollados en el proyecto serían claves para anticipar los posibles retrasos que pueda llegar a tener un megaproyecto de inversión.

Este trabajo podría ser el punto de partida para el DNP en el estudio de los proyectos que se registran en SPI dado que se planteó una propuesta de problema de clasificación de avance proyectos usando SPI-DNP como fuente de información. El núcleo del trabajo ha sido una comparación de modelos de clasificación basados en ANN y SVM, cuyas entradas se han definido con soporte en el marco TOE. En términos generales los modelos obtenidos desde estas dos perspectivas presentan índices de desempeño similares. El espectro de posibilidades de modelado en este sentido puede llegar a ser mucho más amplio, sin embargo, desde los teoremas NFL no se puede llegar a favorecer

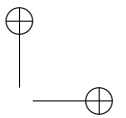
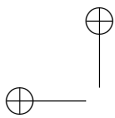


alguna técnica en particular de clasificación. La evidencia acumulada en este trabajo simplemente debe tomarse como un caso puntual sin pretensiones de generalización alguna en relación con el problema de la anticipación del retraso de un megaproyecto.

En cuanto a trabajo futuro, se refiere se identifican algunas posibilidades: realizar una revisión experimental de efectos sobre las curvas ROC al variar la definición de las clases desde un conjunto de expertos tratando incluir los efectos de la incertidumbre que esto acarrearía. Igualmente se propone considerar el TOE no como un marco de verificación, sino como una herramienta para la generación de política pública en cuanto al registro de megaproyectos se refiere. Esto involucraría diseñar una nueva plataforma SPI soportada conceptualmente en el TOE. Finalmente, en términos de la aplicación de la inteligencia computacional se considera abordar el problema desde técnicas que permitan incluir conocimiento experto cualitativo o lingüístico además de datos registrados.

Referencias

- [1] T. Williams, “How Do Organizations Learn Lessons from Projects — And Do They?”. *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 55, no. 2, pp. 248–266, 2008. ↑ [378](#), [379](#)
- [2] E. Maaninen-Olsson and T. Müllern, “A contextual understanding of projects—The importance of space and time”. *Scandinavian Journal of Management*, vol. 25, no. 3, pp. 327–339, 2009. ↑ [378](#)
- [3] T. Williams, “Assessing and Moving on From the Dominant Project Management Discourse in the Light of Project Overruns”. *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 52, no. 4, pp. 497–508, 2005. ↑ [379](#)
- [4] L.E. Bohórquez, “La comprensión de las organizaciones empresariales y su ambiente como sistemas de complejidad creciente: rasgos e implicaciones”. *Ingeniería*, vol.21, no. 3, pp. 363-377, 2016. ↑ [379](#)
- [5] M. Bosch-Rekveltd, Y. Jongkind, H. Mooi, H. Bakker, and A. Verbraeck, “Grasping Project Complexity in Large Engineering Projects: The TOE (Technical, Organizational and Environmental) Framework”. *International Journal of Project Management*, vol. 29, no. 6, pp. 728–739, 2011. ↑ [378](#), [379](#), [380](#)
- [6] H. Jin, J. Zhao, and X. Chen, “The Application of Neuro-Fuzzy Decision Tree in Optimal Selection of Technological Innovation Projects”. *Eighth ACIS International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking, and Parallel/Distributed Computing (SNPD 2007)*, pp. 438–443, Jul. 2007. ↑ [381](#)
- [7] C.-C. Huang, P.-Y. Chu, and Y.-H. Chiang, “A fuzzy AHP Application in Government-Sponsored R&D Project Selection”. *The International Journal of Management Science*, vol. 36, no. 6, pp. 1038–1052, 2008. ↑ [381](#)
- [8] K. Khalili-Damghani, S. Sadi-Nezhad, F. H. Lotfi, and M. Tavana, “A Hybrid Fuzzy Rule-Based Multi-Criteria Framework for Sustainable Project Portfolio Selection”. *Journal of Information Sciences*, vol. 220, pp. 442–462, 2013. ↑ [381](#)
- [9] N. R. Shankar, P. P. B. Rao, S. Siresha, and K. U. Madhuri, “Critical Path Method in a Project Network using Ant Colony Optimization”. *International Journal of Computational Intelligence Research*, vol. 7, no. 1, pp. 7–16, 2011. ↑ [381](#)
- [10] Y. Wang, “Resource-Constrained Multi-Project Scheduling Based on Ant Colony Neural Network”. *The 2010 International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis Proceeding*, pp. 179–182, 2010. ↑ [381](#)
- [11] A. H. L. Chen and C.-C. Chyu, “A Memetic Algorithm for Maximizing Net Present Value in Resource-Constrained Project Scheduling Problem”. *2008 IEEE Congress on Evolutionary Computation (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, pp. 2396–2403, Jun. 2008 ↑ [381](#)
- [12] M.T.Musavi, K. H. Chan, D. M. Hummels, and K. Kalantri. “On the Generalization Ability of Neural Network Classifiers”. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 6, pp 659-663, 1994. ↑ [381](#)
- [13] M. Pal and G. Foody. “Feature Selection for Classification of Hyperspectral Data by SVM”. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 5, pp. 2297-2307, 2010 ↑ [382](#)
- [14] Departamento Nacional de Planeación. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.dnp.gov.co/> ↑ [382](#)



- [15] Seguimiento a Proyectos de Inversión (SPI). Departamento Nacional de Planeación. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://spi.dnp.gov.co/> ↑382, 383
- [16] F. Costantino, G. Gravio, F. Nonino. "Project Selection in Project Portfolio Management: An Artificial Neural Network Model Based on Critical Success Factors". *International Journal of Project Management*, Vol. 33, No 8, pp 1744-1754, 2015 ↑381
- [17] D. Wolpert. "The Lack Of A Priori Distinctions Between Learning Algorithms". *Neural Computation*, Vol. 8, No. 7, pp. 1341–1390, 1996. ↑381
- [18] D. Wolpert and W. Macready. "No Free Lunch Theorems For Optimization". *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 1, No. 1, pp. 67–82, 1997. ↑381
- [19] R. Duda, P. Hart and D. Stork, *Pattern Classification*, John Wiley & Sons, 2001. ↑378, 381
- [20] I. Steinwart and A. Christman, *Support Vector Machines*, Springer, 2008. ↑378, 381
- [21] L. Haitao and Z. Xiaofu, "Introducing a New Method to Predict the Project Time Risk". *2009 International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*, no. 1, pp. 27–30, 2009 ↑381
- [22] S. Petruvesa, V. Zileska and V. Zujo, "Predicting construction Project Duration with Support Vector Machine". *International Journal of research in Engineering and Technology*, Vol 11, No. 2, pp. 12-24, 2013. ↑381
- [23] HC Yin and YS Chen". A Novel Machine Learning Model For Risk Management". *Proceedings of the first Asia-pacific conference on global business, economics, finance and social sciences, Singapore*, August, pp. 1-15, 2014. ↑381

Hugo Ernesto Gutiérrez Vanegas

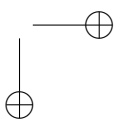
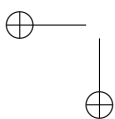
Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; coordinador Técnico de Servicios TI para Colombia en la empresa TIVIT; durante sus estudios de pregrado fue miembro del grupo de investigación Laboratorio de Automática e Inteligencia Computacional LAMIC y miembro voluntario del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos IEEE Colombia.

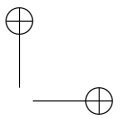
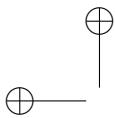
Correo electrónico: hugoegutierrezv@gmail.com

Miguel Alberto Melgarejo Rey

Ingeniero electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Ingeniería Electrónica y Computadores, Universidad de los Andes; doctor (c) en ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana; miembro del grupo de investigación Laboratorio de Automática e Inteligencia Computacional LAMIC; profesor asociado, facultad de ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá DC. Senior member, Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, IEEE.

Correo electrónico: mmelgarejo@udistrital.edu.co





Methodology

Images Encryption Algorithm Using the Lorenz's Chaotic Attractor

Algoritmo de Encriptación de Imágenes Utilizando el Atractor Caótico de Lorenz

Iván Felipe Rodríguez¹, Edilma Isabel Amaya*¹, César Augusto Suárez¹, José David Moreno¹

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas-Facultad de Ingeniería.

*Correspondence: iamaya@udistrital.edu.co

Recibido: 24/05/2017. Modificado: 05/07/2017. Aceptado: 22/08/2017.

Abstract

Context: With the increasing volumes of information generated in real time, novel mechanisms are needed to ensure security so as to prevent access to unauthorized people. The conventional encryption methods are not appropriate for images, because they are prone to statistical attacks due to the strong correlation between adjacent pixels and the analysis of color gamut histograms, which can help to identify them within the image; with this aim in mind, in this paper an algorithm for image encryption using chaotic attractors is proposed.

Method: Chaotic synchronization is used for the key management, the diffusion stage is made by means of ergodic sequences generated from the numerical solution of the Lorenz's attractor and the permutation stage is accomplished with the wave line technique.

Results: The proposed algorithm was tested using a set of gray-scale images obtaining suitable performance in security and speed, the pixel correlation is almost null and the entropy is similar to that presented in recent works with the same approach.

Conclusions: Chaotic methods are an alternative to improve the security levels in the cryptography of images due to their properties of unpredictability and sensitivity to the initial conditions. For future work the approach presented could be applied to the encryption of color images and using different chaotic attractors.

Keywords: Synchronization, chaos, images cryptography, Lorenz's attractor.

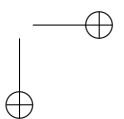
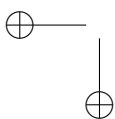
Language: Spanish



Cite this work as I. F. Rodríguez, E. I. Amaya, C. A. Suárez, J. D. Moreno, "Image Encryption Algorithm using the Lorenz's Chaotic Attractor", Ingeniería, vol. 22, no. 3, pp. 396-412, 2017.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.11976>



Resumen

Contexto: Con el creciente volumen de información generada en tiempo real, nuevos mecanismos son necesarios para garantizar su seguridad, evitando el acceso a personas no autorizadas. Los métodos convencionales de criptografía no son apropiados para imágenes por su debilidad a ataques estadísticos, debido a la fuerte correlación entre píxeles adyacentes y el análisis de los histogramas de gamas de colores, lo que puede ayudar a identificarlos dentro de la imagen; con este objetivo en mente, se propone un algoritmo para el cifrado de imágenes utilizando atractores caóticos.

Método: La sincronización caótica se utiliza para la gestión de la clave, la etapa de difusión se realiza mediante secuencias ergódicas generadas a partir de la solución numérica del atractor de Lorenz y la etapa de permutación se realiza con la técnica de línea de onda.

Resultados: Se probó el algoritmo propuesto utilizando un conjunto de imágenes en escala de grises, obteniendo un desempeño adecuado en seguridad y velocidad, la correlación de píxeles es casi nula y la entropía es similar a la presentada en trabajos recientes con el mismo enfoque.

Conclusiones: Los métodos caóticos son una buena alternativa para mejorar los niveles de seguridad en la criptografía de imágenes debido a sus propiedades de imprevisibilidad y sensibilidad a las condiciones iniciales. Para trabajos futuros el enfoque presentado podría aplicarse a la encriptación de imágenes a color y utilizando diferentes atractores caóticos.

Palabras clave: Atractor de Lorenz, Caos, Criptografía de imágenes, Sincronización.

Idioma: Español

1. Introducción

La transferencia de información de manera segura es una prioridad que exige el interés de las comunidades académicas interesadas en el área de la criptografía para explorar, diseñar y proponer esquemas de seguridad eficientes. Desde hace décadas existen diferentes técnicas de cifrado que se basan principalmente en métodos iterativos y en la factorización de números primos. La seguridad de estos métodos se encuentra soportada en que no existen procedimientos computacionalmente eficientes para factorizar números de gran cantidad de dígitos; particularmente se dificulta la factorización cuando el número a factorizar es el producto de dos números primos de aproximadamente la misma cantidad de dígitos. Sin embargo, con el desarrollo acelerado de la computación es posible que pronto puedan ser vulnerables este tipo de criptosistemas [1].

Motivados por esta posible vulnerabilidad, una alternativa para encriptar imágenes es utilizar los sistemas dinámicos que generan caos, ya que las propiedades de dependencia sensitiva a las condiciones iniciales, mezcla y ergodicidad se pueden aprovechar para garantizar la no predictibilidad de los mecanismos de seguridad.

Por lo general, en los esquemas de comunicación caótica que utilizan sincronización se toma un sistema caótico como transmisor y la señal de información se mezcla con el transmisor para generar una señal de transmisión caótica, la cual se transmite al receptor. El mecanismo receptor es básicamente un sistema dinámico caótico construido sobre la base de la estructura del transmisor. Cuando los mecanismos transmisor y receptor se sincronizan la información es recuperada por el receptor [2]. Recientemente, se han publicado diferentes propuestas que utilizan este enfoque, algunas de las cuales se analizan a continuación.

En [3] se propone un esquema de encriptación de imágenes, utilizando la función cat de Arnold para el proceso de permutación y un sistema hipercaótico de Lorenz para el proceso de difusión. Los autores hacen un análisis teórico estadístico de seguridad que involucra la longitud y la sensibilidad de la clave, lo cual les permite asegurar el buen nivel de seguridad de su propuesta. Además, en el artículo se resalta el potencial de los sistemas hipercaóticos para mejorar la seguridad de los criptosistemas basados en caos; porque comparándolos con sistemas caóticos de un número menor de dimensiones tienen un comportamiento dinámico más complejo y manejan un mayor número de variables. Lo anterior permite inferir que los criptosistemas basados en sistemas hipercaóticos son más impredecibles y con un espacio de claves más amplio.

En el año 2013 se desarrolló un sistema de encriptación simétrica para imágenes basado en caos, utilizando para el proceso de difusión el atractor caótico de Lorenz y para el proceso de permutación la función del panadero. Los autores hacen un análisis estadístico del desempeño de seguridad del algoritmo propuesto, mostrando una alta seguridad en su esquema [4].

En [5] se presenta un algoritmo de encriptación de imágenes utilizando el sistema caótico provisto por la función tienda para los procesos de difusión y permutación. Al analizar los histogramas de escala de grises de las imágenes real y cifrada, la distribución uniforme que presenta el histograma de la imagen cifrada permite garantizar una buena seguridad del algoritmo. Además, mediante el cálculo de los coeficientes de correlación entre píxeles adyacentes, se evidencia que estos tienden a 1, para los píxeles de la imagen original y a 0 para los píxeles correspondientes a la imagen cifrada; lo anterior significa que se logra eliminar la correlación entre los píxeles adyacentes durante el proceso de cifrado.

En [6] se propone un esquema de encriptación de imágenes en escala de grises y a color de tipo simétrico utilizando los atractores caóticos provistos por el sistema autónomo de Colpitts y el sistema no autónomo de Duffing, los cuales son resueltos por medio del método numérico para la solución de ecuaciones diferenciales Runge Kutta 4 y aprovechados para generar una matriz del tamaño de la imagen original. Por medio de esta matriz, se cifra cada uno de los píxeles de la imagen original; la clave secreta está construida por los valores de las condiciones iniciales de los dos sistemas utilizados. Los autores realizan análisis de espacio de clave, análisis de sensibilidad de la clave e histograma de la imagen cifrada; el espacio de clave utilizado es $2^{448} \cong 7,26 * 10^{134}$ y el histograma de escala de grises de la imagen cifrada presenta una distribución uniforme. También hacen un análisis de correlación entre los coeficientes de píxeles adyacentes en las direcciones horizontal, vertical y diagonal para varias imágenes encriptadas encontrando que estos tienden a cero. Los resultados experimentales muestran la robustez, eficiencia y el buen nivel de seguridad del algoritmo.

En el trabajo desarrollado en [7], se presenta un algoritmo que fusiona un atractor caótico provisto por una función senoidal con algunos principios de la codificación genética. Los autores indican que, si utilizan únicamente el atractor caótico, el algoritmo es sencillo pero débil en seguridad y genera distorsión de la imagen. Separan la imagen en tres capas de color: verde, azul y roja; utilizando los principios del caos y de la genética, codifican cada capa de manera independiente en base decimal, base binaria y en código ADN (código generado a partir de principios de la genética).

ca), obteniendo tres matrices, una por cada color, que luego adicionan según las reglas del código ADN con tres matrices que generan de aplicar la función caótica senoidal sobre las matrices anteriores. Como se ejecutan tres procesos independientes utilizan programación paralela para reducir el tiempo de ejecución. El algoritmo permite obtener una imagen cifrada con muy baja correlación entre píxeles adyacentes y demuestra ser eficiente para la encriptación de archivos de gran volumen debido al uso de la programación paralela.

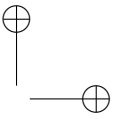
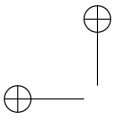
En el año 2015 en [8], los autores diseñan un esquema de codificación de imágenes en escala de grises basado en un proceso de permutación vertical y horizontal en forma circular utilizando la función de Arnold con parámetros positivos e implementan la función hash SHA-3 para el proceso de difusión. Realizan un análisis de sensibilidad aplicado a las claves, un análisis estadístico y análisis de aleatoriedad mediante el test NIST 800-22. Concluyen que el algoritmo tiene un buen rendimiento en procesamiento y una capacidad de resistir a ataques como el ataque de texto elegido.

En [9] los autores proponen un método adaptable de sincronización acoplado tres sistemas caóticos idénticos y muestran mediante dos ejemplos que el acoplamiento puede ser unidireccional o bidireccional. Para mostrar la sincronización con acoplamiento unidireccional consideran tres sistemas caóticos de Rössler y utilizan tres sistemas caóticos de Lorenz para mostrar la sincronización con acoplamiento bidireccional. Basados en esta nueva forma de sincronización proponen un método de encriptación caótica diferente a los criptosistemas tradicionales; empleando tres sistemas caóticos para el proceso de la sincronización y encriptación, utilizando dos sistemas caóticos emisores que se encargan de la encriptación y el tercer sistema caótico como receptor para descifrar; la idea básica que sustentan es que después de cifrar dos veces en dos transmisores y un receptor, el receptor puede recuperar de manera fidedigna la señal enviada.

En [10] se presenta una alternativa para resolver una vulnerabilidad existente en los sistemas de enmascaramiento caóticos mediante el proceso de sincronización de atractores caóticos. El sistema evita la detección de parámetros utilizando dos claves de cifrado que se emplean para la modificación continua de las condiciones iniciales del atractor de Rössler. El autor destaca su técnica mostrando resistencia a ataques estadísticos y evitando que el atacante obtenga los valores iniciales de los atractores.

En el trabajo propuesto en [11], se utiliza el sistema de Lorenz hipercaótico de orden fraccional, que es un sistema que maneja cuatro componentes, empleando una de estas para generar una máscara caótica, del tamaño de la imagen que se desea cifrar, la cual utilizan para enmascarar la imagen mediante la operación OR, entre cada uno de los valores de las posiciones de la máscara y de la imagen; las demás componentes las utilizan para generar una sucesión caótica, que permite reordenar la matriz difundida y finalmente obtener la imagen cifrada, como resultados destacan la simpleza del procedimiento de enmascaramiento, también la mejora del desempeño en cuanto a seguridad.

En [12] se propone una técnica de cifrado de imágenes, en escala de grises, basada en un sistema caótico múltiple que es el resultado de la suma de los sistemas caóticos de Rössler y Lorenz. El esquema de encriptación propuesto consiste en un algoritmo iterativo que mezcla los valores de los píxeles mediante operaciones XOR y cambia los valores de la escala de grises usando el sistema



caótico múltiple. Mediante los resultados de las pruebas se puede apreciar que las bondades de esta propuesta son: buen nivel de seguridad, gran espacio de clave y un algoritmo con alta velocidad de ejecución.

En el presente artículo se propone el desarrollo de un algoritmo de encriptación de imágenes en escala de grises aprovechando las características de sincronización del sistema caótico de Lorenz. El artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2, se presentan los fundamentos teóricos sobre sistemas caóticos y la sincronización de estos. En la sección 3, se describe y se implementa el algoritmo propuesto que involucra los procesos de sincronización, permutación y difusión utilizando el atractor caótico de Lorenz y se presentan las pruebas realizadas con diferentes imágenes clásicas. En la sección 4, se hace el análisis estadístico de desempeño y se compara con los algoritmos propuestos en [5] y [8]. Finalmente, se resaltan las conclusiones y se dan algunas indicaciones para trabajos futuros en esta misma dirección.

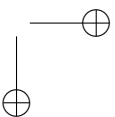
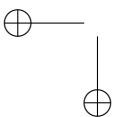
2. Marco teórico

El área de los sistemas dinámicos surge del intento de estudiar el comportamiento de un sistema que evoluciona en el tiempo, tiene aplicación en diferentes campos del conocimiento tales como biología, medicina e ingeniería. Los sistemas dinámicos de tipo no lineal son los que pueden presentar comportamientos complejos, lo cual los hace atractivos para utilizarlos en sistemas criptográficos, buscando aumentar su seguridad. La seguridad de la información secreta que se transmita a través de la red es algo imperante en la actualidad, ya que se debe impedir que personas no autorizadas modifiquen o accedan a la información. Se han propuesto varios trabajos en este sentido, inicialmente utilizando sistemas dinámicos caóticos unidimensionales, los cuales posibilitan generar algoritmos sencillos pero un poco lentos y débiles contra ataques, situación que ha hecho fortalecer la línea de trabajo mediante el uso de sistemas dinámicos de más de una dimensión [13]

2.1. Sistema caótico de Lorenz

La teoría del caos surge con el estudio de los sistemas dinámicos de tipo no lineal que se modelan por medio de ecuaciones diferenciales en el caso continuo y ecuaciones en diferencias finitas en el caso discreto; es de gran utilidad tanto a nivel de la matemática como en el ámbito de las aplicaciones a otras áreas del conocimiento, ya que generalmente son impredecibles, presentan una dependencia sensible a las condiciones iniciales, es decir, que para dos condiciones iniciales próximas, se genera un comportamiento dinámico totalmente diferente. Además, suelen presentar atractores extraños que involucran propiedades de auto similitud, generando imágenes con naturaleza fractal, lo cual permite obtener técnicas para disminuir la correlación entre los píxeles adyacentes en el cifrado de imágenes [14].

Una de las razones que dio origen al estudio cualitativo de los sistemas dinámicos tiene que ver con el problema de Lorenz, quien formuló un modelo tridimensional para realizar predicciones climáticas, y se dio cuenta que si este se alimentaba de la observación anterior aplicando un proceso de redondeo de cifras, aunque inicialmente se comportaba de forma similar, rápidamente se empezaban a trazar trayectorias totalmente diferentes a las generadas sin aplicar ningún redondeo,



lo que mostraba resultados erróneos en el momento de hacer predicciones.

En la literatura matemática se han mostrado y caracterizado varios sistemas dinámicos caóticos. En la ecuación (1) se describe el modelo formulado por Lorenz:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \sigma(y - x) \\ \dot{y} &= -xz + rx - y \\ \dot{z} &= xy - bz \end{aligned} \tag{1}$$

donde, (x, y, z) describen una condición atmosférica, σ, b y r , son parámetros. Este sistema describe un comportamiento caótico para varios valores de los parámetros, los más utilizados han sido $\sigma = 10, b = 8/3$ y $r = 28$.

2.2. Sincronización

Consiste en enlazar dos sistemas caóticos mediante una o varias señales comunes para obligar a que sus trayectorias a largo plazo converjan a los mismos valores. El tipo de sincronización que se utiliza en este trabajo es unidireccional, propuesto por Pecora y Carrol [2], que consiste en dividir el sistema caótico en dos subsistemas denominados maestro y esclavo, el maestro conduce al sistema esclavo a seguir su trayectoria. Una de las condiciones para que se presente este tipo de sincronización es que los exponentes de Lyapunov de los subsistemas a sincronizar sean negativos, este hecho provee la estabilidad en el sistema esclavo. Una de las razones por las cuales se utiliza la sincronización para la seguridad de la información que se transmite en la red es la facilidad que ofrece para cifrar y descifrar la información, cuyo cifrado se basa en el comportamiento impredecible de los sistemas caóticos. Para el caso de estudio alusivo al sistema de Lorenz con los parámetros anteriormente mencionados, Pecora y Carrol calcularon los exponentes de Lyapunov encontrando que estos son negativos cuando se seleccionan como maestro las componentes x o y , como se muestra en la Tabla I.

Tabla I. Exponentes de Lyapunov en el Atractor de Lorenz.

| Maestro | Esclavo | Exponentes de Lyapunov |
|---------|---------|------------------------|
| x | (y, z) | (-1.81, -1.86) |
| y | (x, z) | (-2.67, -9.99) |
| z | (x, y) | (0.0108, -11,01) |

Se puede verificar que cuando se elige x o y como variable sincronizante los dos subsistemas se sincronizan, como se muestra en la Figura 1, siendo la línea negra la trayectoria del subsistema esclavo y la línea azul la trayectoria del subsistema maestro.

El mecanismo de sincronización en el algoritmo que se propone se utiliza para encriptar la clave que se envía al receptor, considerando el sistema caótico de Lorenz y dos subsistemas de este y utilizando “ y ” como variable sincronizante, a través de la cual se envía la clave que permitirá descifrar la imagen [15].

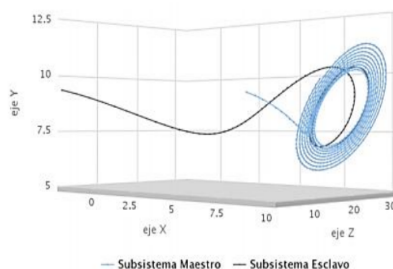


Figura 1. Sincronización del atractor de Lorenz. Fuente: Elaboración propia utilizando la librería Highcharts.

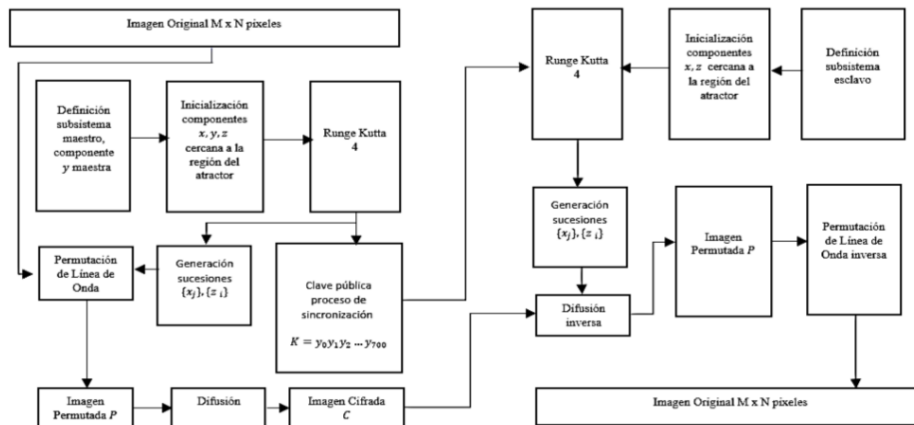


Figura 2. Diagrama de flujo de los procesos de encriptación y desencriptación.

3. Esquema de encriptación propuesto

Se presenta un algoritmo para encriptación de imágenes en escala de grises, de tamaño $M \times N$ píxeles. El proceso de permutación se realiza mediante la permutación de línea de onda y para el proceso de difusión se utilizan sucesiones ergódicas generadas a partir de la solución numérica del atractor caótico de Lorenz, utilizando el método Runge Kutta 4. El diagrama de flujo del algoritmo se presenta en la Figura 2.

Las fases del proceso de encriptación comprenden los siguientes pasos:

1. El atractor de Lorenz se divide en dos subsistemas maestro y esclavo, utilizando como variable sincronizante "y", debido a que sus exponentes de Lyapunov son los más negativos, recordando que entre más negativos sean estos, más rápida será la convergencia.
2. Se inicializan los subsistemas con condiciones iniciales aleatorias que estén cercanas a la región del atractor.
3. Se sincronizan los atractores enviando la componente maestra hacia el esclavo. Se generan los 700 primeros valores del atractor maestro utilizando Runge Kutta 4 con un incremento de tiempo $h = 0,01$ (centésimas de segundo) y se envían los resultados de la componente "y" como clave pública K hacia el atractor esclavo en el instante de tiempo t_i , como se indica en la ecuación (2).

$$K = y_0y_1y_2 \dots y_{700} \tag{2}$$

Donde y_i corresponde a la salida del atractor en valor absoluto, considerando solamente una cifra decimal multiplicada por 10 en el instante de tiempo t_j definido por la ecuación (3).

$$t_j = \begin{cases} t_{j-1} + h, & j > 0 \\ t_i, & j = 0 \end{cases} \tag{3}$$

Se debe actualizar t_i a t_j , debido a que cada vez que se codifica un mensaje, existe un corrimiento de $(M + N) * h$ unidades de tiempo, con el fin de no perder la sincronía entre los subsistemas maestros y esclavo, como se muestra en la ecuación (4).

$$t_i = t_j \quad (4)$$

- Se utiliza el proceso de permutación de línea de onda [16], primero se construyen dos sucesiones (x_j) y (z_i) , $i = 1, \dots, N$, y $j = 1, \dots, M$, a partir de los valores obtenidos para las variables x, z del atractor, mediante método numérico Runge Kutta 4; se consideran los últimos tres dígitos de dichos valores y se utiliza una matriz de $M \times N$ que tiene en cada una de sus posiciones los valores en escala de gris de la imagen original. El valor x_j se asocia con la columna j de la matriz, e indica el número de posiciones que se deben desplazar las entradas de esa columna “verticalmente”, consiguiendo una nueva matriz, luego, la fila i de esta última matriz se asocia con el valor z_i el cual indica las posiciones que se deben desplazar sus entradas “horizontalmente”, obteniéndose otra matriz y finalizando un ciclo de permutación. El desplazamiento horizontal de las entradas de la fila i es hacia la derecha si z_i es menor que el umbral $(M/2)$ y el desplazamiento vertical de las entradas de la columna j es hacia abajo si x_j es menor que $N/2$. El proceso anterior se ejecuta cuatro veces para completar la fase de permutación que se conoce como permutación circular [8], obteniendo la matriz permutada P .
- Con los datos obtenidos por Runge Kutta 4, para los componentes z y x del atractor, se genera una matriz de A de tamaño $M \times N$, considerando los valores numéricos obtenidos de los últimos tres dígitos, la cual se suma con la matriz obtenida en el ítem 4, luego se aplica la operación módulo 256 a cada entrada de la matriz resultante, como se ilustra en la Figuras 3, 4 y 5.

Siendo $P(k, i)$ el valor que va de 0 a 256 en la posición (k, i) de la matriz que resulta del proceso completo de permutación de línea de onda, las matrices D_1, D_2, D_3 se obtienen de acuerdo con las ecuaciones (5), (6) y (7).

$$D_1(k, i) = \left(P(k, i) + A \left(\text{ceil} \left(\frac{M}{2} \right) + 1 - k, (N + 1) - i \right) \right) \text{mod } 256 \quad (5)$$

$$D_2(k, i) = (D_1(k, i) + A((M + 1) - k, i)) \text{mod } 256 \quad (6)$$

$$D_3(l, i) = D_2(l, i) + P((M + 1) - l, (N + 1) - i) \text{mod } 256 \quad (7)$$

Con $i = 1, 2, \dots, N$; $l = 1, 2, \dots, \text{floor} \left(\frac{M}{2} \right)$; $k = 1, 2, \dots, \text{ceil} \left(\frac{M}{2} \right)$, donde $\text{floor} \left(\frac{M}{2} \right)$ representa el mayor número entero menor o igual que el número racional $\frac{M}{2}$ y $\text{ceil} \left(\frac{M}{2} \right)$ representa el menor número entero mayor o igual que el número racional $\frac{M}{2}$.

Como primer paso se toma una parte de la matriz A , de tamaño $\text{ceil} \left(\frac{M}{2} \right) \times N$ y también una parte de la matriz permutada P de tamaño $\text{ceil} \left(\frac{M}{2} \right) \times N$, asociando, como se ve en la Figura 1,

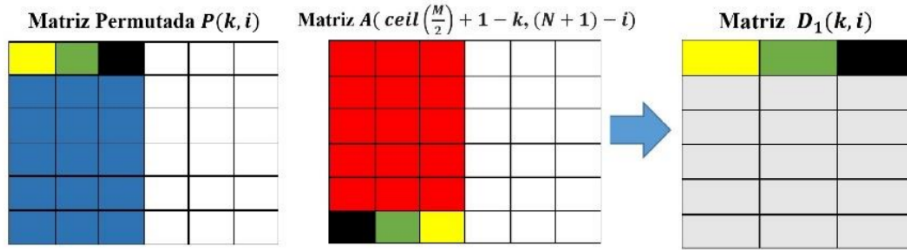


Figura 3. Primer paso para la difusión de la imagen permutada.

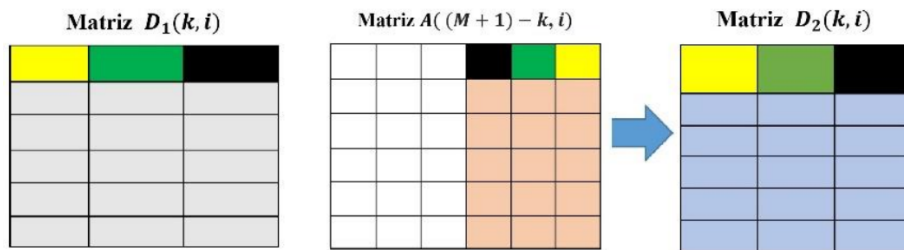


Figura 4. Segundo paso para la difusión de la imagen permutada.

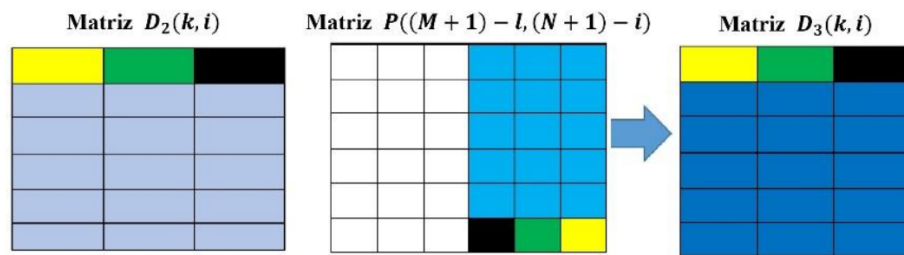


Figura 5. Tercer paso para la difusión de la imagen permutada.

los colores con la posición en la que los valores de ambas matrices se operan, como se muestra en la ecuación (1), generando la matriz D_1 .

Para el segundo paso se toma la matriz D_1 y una segunda parte de la matriz A de tamaño $\text{ceil}(\frac{M}{2}) \times N$, asociando, como se ve en la Figura 2, los colores con la posición de los valores de ambas matrices, describiendo la forma en que operará la difusión representada en la ecuación (2), generando la matriz D_2 .

En el tercer paso, se utiliza una parte de la matriz D_2 de tamaño $\text{floor}(\frac{M}{2}) \times N$, y una segunda parte de la matriz permutada P de tamaño $\text{floor}(\frac{M}{2}) \times N$, cuyo proceso se ilustra en la Figura 3, de manera similar al paso anterior la Figura 3 asocia los colores con la posición de los valores a los que se les se aplicará la difusión descrita en la ecuación (3), generando la matriz D_3 .

Por último, se concatenan las matrices D_2 y D_3 , es decir todas las filas de la matriz D_2 se unen a las filas de la matriz D_3 en su respectivo orden, dejando una única matriz C correspondiente a la imagen cifrada.

$$C(j, i) = [D_2(k, i), D_3(l, i)], \quad j = 1, 2, \dots, M \quad (8)$$

El proceso descrito anteriormente mejora la aleatoriedad de la imagen cifrada C , es decir, si todos los colores en escala de grises en la imagen cifrada C tienden repetirse un número igual o cercano a $(M \times N)/256$ veces el grado de incertidumbre aumenta y por ende la impredecibilidad de la imagen cifrada.

En el desarrollo del esquema de encriptación se tuvo en cuenta la relación existente entre los procesos de permutación y difusión; por ejemplo, el proceso de difusión descrito en [5] destaca por su simpleza, pero su proceso de permutación es más complejo, lo cual exige mayores recursos computacionales, pero ofrece resultados interesantes en cuanto a la aleatoriedad en su cifrado; en [8] el proceso de difusión utiliza más recursos y el de permutación en este caso es el proceso sencillo, sin embargo tiene menor aleatoriedad en las imágenes cifradas que en [5]; por lo tanto tener un buen desarrollo en la permutación contribuye en gran medida al proceso de difusión para aumentar la aleatoriedad de las imágenes cifradas, razón por la cual en este trabajo se realizan más rondas de permutación que en [8], adicionalmente se buscó un mejor desarrollo en la fase de difusión sin utilizar demasiados recursos en ambas fases.

La adición de una permutación simple que se le aplica a la matriz A , utilizada para difundir, permite a la imagen cifrada C no poseer patrones reconocibles, como grupos de píxeles cercanos con colores que tengan similar valor o valores con diferencias muy grandes. Similar estrategia se puede evidenciar en [8] con la matriz utilizada para difundir, la cual se construye con valores que se obtienen iterando el mapa de Arnold, consiguiendo completar la matriz en $\frac{(M \times N)}{2}$ iteraciones si $M \times N$ es par o $\text{ceil}(\frac{(M \times N)}{2})$ iteraciones si $M \times N$ es impar, tomando dichos valores de las componentes del sistema de Arnold e intercalándolos en la matriz, teniendo efectividad en disolver patrones reconocibles en la imagen cifrada; en [11], la estrategia es más simple ya que utilizan $M \times N$ iteraciones para generar una matriz, solo con los valores de una única componente del sistema caótico, que permite difundir mediante la operación OR, resultando en un desempeño menor a [8]; en [12] el proceso es más complejo que en [11] para la generación de la matriz, aquí utilizan una matriz de $M \times N$ que repetidas veces se opera con la matriz que representa a la imagen original mediante la operación XOR hasta conseguir la imagen cifrada, resultando en un buen desempeño.

Hay que destacar la importancia de realizar tratamiento a la matriz A , por su implicación en la reducción de patrones, es decir, lo que se busca en esta matriz es que sea lo suficientemente aleatoria; por ejemplo, en [5] optan por evitar tomar algunos de valores generados por el sistema caótico para obtener dichas matrices, en otros casos como en [8], [11] y [12], iteran muchas veces para obtener dichos valores, esto quiere decir que utilizan bastantes recursos para mejorar la aleatoriedad de la matriz y del sistema en general; en el esquema propuesto no se requieren muchas iteraciones, ya que particularmente el sistema de Lorenz es suficientemente aleatorio; en este caso se utilizan $M + N$ valores para generar la matriz A y se

realizan M iteraciones, una ventaja, ya que si existiesen aproximaciones y un número alto de iteraciones, la degradación dinámica puede dañar el comportamiento caótico del sistema.

Para el proceso de descryptación se aplican los pasos 4 y 5 en forma inversa.

Para verificar la funcionalidad del algoritmo se realizaron varias pruebas con diferentes imágenes, tomadas de las referencias consultadas, algunas de estas se muestran en las figuras 6, 7, 8 y 9.

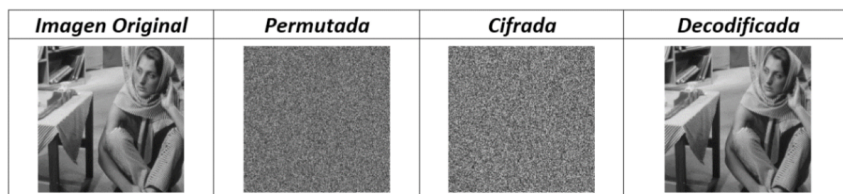


Figura 6. Imagen “Bárbara”, tamaño 512x512.

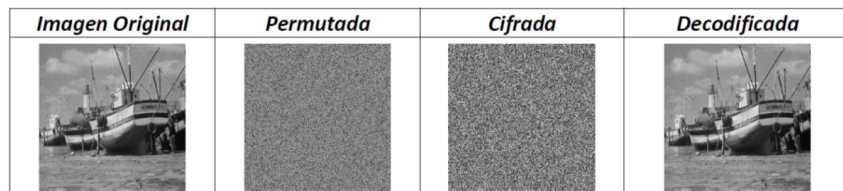


Figura 7. Imagen Bote, tamaño 512x512.

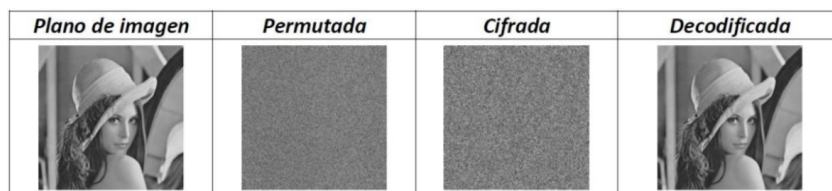


Figura 8. Imagen “Lena”, tamaño 512x512.

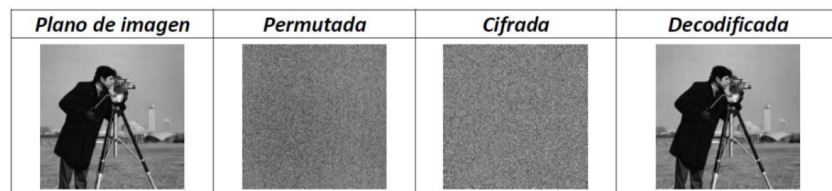


Figura 9. Imagen Camarógrafo, tamaño 512x512.

En las figuras 6, 7, 8 y 9, se evidencia el buen funcionamiento del algoritmo para encriptar y descryptar imágenes; las imágenes decodificadas son iguales a las originales.

4. Análisis estadístico

Para evaluar el desempeño del algoritmo propuesto se analizó la correlación entre los píxeles adyacentes en forma horizontal, vertical y diagonal, tanto para la imagen original como para la cifrada, obteniendo que la correlación tiende a desaparecer en la encriptación, como se muestra en las figuras 10, 11, 12 y 13.

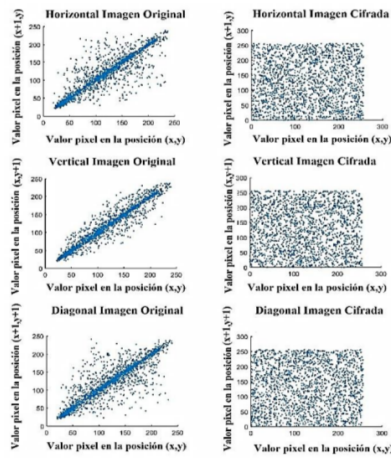


Figura 10. Correlación entre píxeles adyacentes imagen Bárbara.

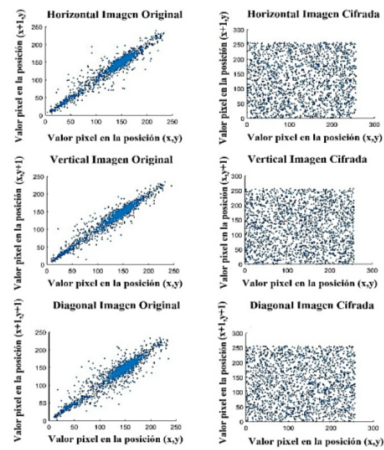


Figura 11. Correlación entre píxeles adyacentes imagen Bote.

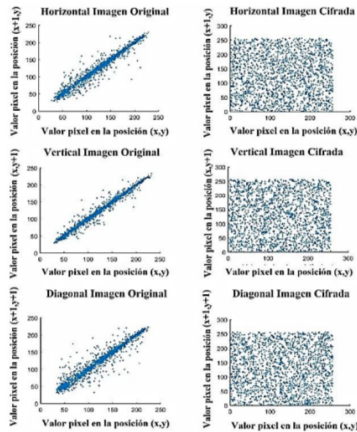


Figura 12. Correlación entre píxeles adyacentes imagen Lena.

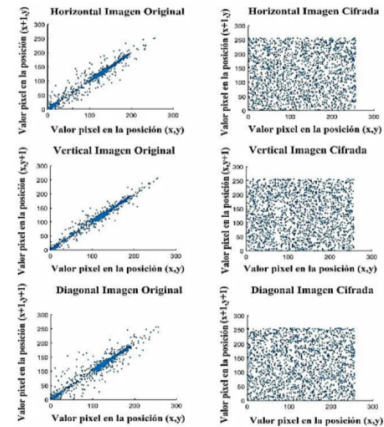


Figura 13. Correlación de píxeles adyacentes imagen Camarógrafo.

A continuación, se presenta el análisis de sensibilidad del proceso de encriptación frente al cambio de un único *bit* de la imagen original en las figuras 14 y 15, y el cambio de un único *bit* en la condición inicial del sistema de Lorenz en la componente "x", es un numero de 15 dígitos entre 0 y 1; en las figuras 16 y 17, evidenciando una imagen cifrada totalmente diferente.

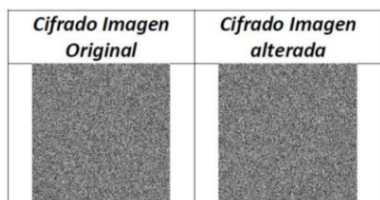


Figura 14. Análisis sensibilidad imagen Bárbara.

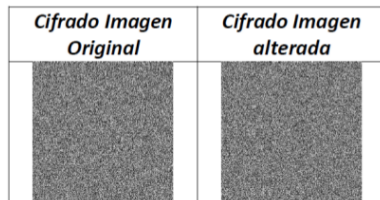


Figura 15. Análisis sensibilidad imagen bote.

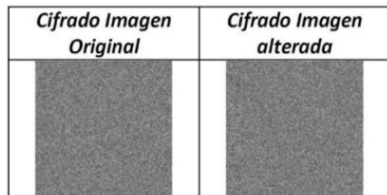


Figura 16. Análisis sensibilidad imagen Lena.

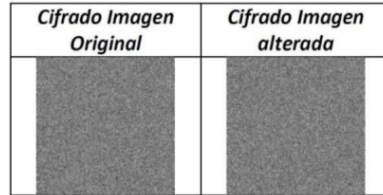


Figura 17. Análisis sensibilidad imagen Camarógrafo.

En las figuras 18, 19, 20 y 21 se muestran los histogramas de la distribución de la escala de grises en la imagen original comparada con la imagen cifrada encontrando uniformidad en la imagen cifrada; donde se pueden resaltar las distribuciones uniformes presentes en los histogramas de las imágenes cifradas.

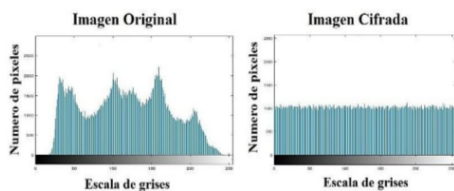


Figura 18. Histograma escala de grises imagen Bárbara.

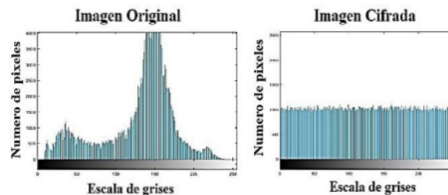


Figura 19. Histograma escala de grises imagen Bote.

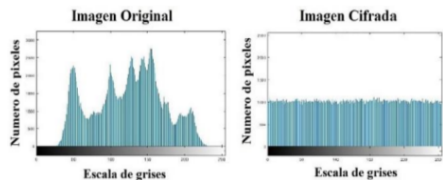


Figura 20. Histograma escala de grises imagen Lena.

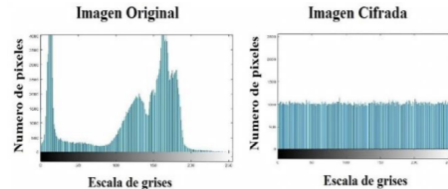


Figura 21. Histograma escala de grises imagen Camarógrafo.

Para las cuatro imágenes presentadas se hallaron los coeficientes de correlación agrupados en la Tabla II, las medidas que evalúan la resistencia a ataques diferenciales UACI (promedio unificado de intensidad de cambio, sus siglas en inglés) y NPCR (razón de cambio de píxeles, sus siglas en inglés), además de la entropía correspondiente, los cuales se presentan en las tablas III y IV. La expresión matemática para UACI está dada por la ecuación (9).

$$UACI = \frac{1}{M \times N} \left[\sum_{i,j} \frac{|E_{1(i,j)} - E_{2(i,j)}|}{2^n - 1} \right] \cdot 100 \% \quad (9)$$

Siendo $M \times N$ el tamaño de la imagen, $E_{1(i,j)}$ el valor del píxel en la posición del (i, j) de la imagen cifrada E_1 y $E_{2(i,j)}$ el valor del píxel en la posición del (i, j) de la imagen cifrada E_2 , donde la imagen E_1 corresponde al cifrado de la imagen original sin modificaciones y E_2 corresponde al cifrado de la imagen original modificada en un píxel o también en la modificación de un bit en la condición inicial y 2^n es el valor máximo que puede tomar cada píxel.

La fórmula que define NPCR está dada en la ecuación (10).

$$NPCR = \frac{1}{M \times N} \left[\sum_{i,j} D(i, j) \right] \cdot 100 \% \quad (10)$$

Donde:

$$D(i, j) = \begin{cases} 0, & C_1(i, j) = C_2(i, j) & p_0 = \frac{1}{2^n} \\ 1, & C_1(i, j) \neq C_2(i, j) & p_1 = 1 - \frac{1}{2^n} \end{cases} \quad (11)$$

Siendo, p_0 la probabilidad de que un píxel (i, j) en la imagen cifrada C_1 , sea igual al píxel (i, j) en la imagen C_2 y p_1 la probabilidad de que un píxel en la imagen cifrada $C_1(i, j)$, sea diferente al píxel (i, j) de la imagen cifrada C_2 , es decir son las probabilidades de obtener 0 ó 1, respectivamente en la distribución de probabilidad $D(i, j)$.

Tabla II. Valores de correlación de píxeles adyacentes

| Imagen | Coeficientes de correlación | | | | | |
|-------------|-----------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|
| | Horizontal | | Vertical | | Diagonal | |
| | Original | Cifrada | Original | Cifrada | Original | Cifrada |
| Bárbara | 0.8954 | 0.0036 | 0.9589 | -0.0008 | 0.8830 | -0.0027 |
| Bote | 0.9599 | -0.0002 | 0.9720 | -0.0018 | 0.9427 | -0.0009 |
| Lena | 0.9784 | 0.0032 | 0.9894 | -0.0038 | 0.9671 | -0.0001 |
| Camarógrafo | 0.9885 | -0.0001 | 0.9940 | -0.0004 | 0.9821 | 0.0002 |

Tabla III. Resistencia ataques diferenciales

| Imagen | UACI (%) | NPCR (%) |
|-------------|----------|----------|
| Bárbara | 33.5622 | 99.5956 |
| Bote | 33.4477 | 99.5972 |
| Lena | 33.4594 | 99.6181 |
| Camarógrafo | 33.4610 | 99.6025 |

Tabla IV. Valores de entropía.

| Imagen | Entropía |
|-------------|-------------|
| Bárbara | 7.999348842 |
| Bote | 7.9993254 |
| Lena | 7.999283163 |
| Camarógrafo | 7.999356673 |

El valor de la entropía es un indicador muy importante, ya que muestra el nivel de aleatoriedad de los píxeles en las imágenes cifradas, lo cual significa que entre mayor sea el valor de la entropía la aleatoriedad es mejor. Para las imágenes en estudio se logró obtener valores muy próximos a 8 calculado por:

$$H(s) = \sum_{i=1}^N P(s_i) \log_2 \frac{1}{P(s_i)} \tag{12}$$

donde N es la cantidad de símbolos, en este caso la cantidad de valores en escala de grises y $P(s_i)$ la probabilidad de ocurrencia del símbolo s_i , si la probabilidad de ocurrencia de todos los símbolos es de $1/256$ el valor de la entropía es de 8; luego este es el valor ideal de entropía en los procesos de encriptación de imágenes cuando se trabaja con 256 tonalidades de grises.

El algoritmo propuesto se ejecutó en un equipo Intel(R) Core(TM) i5-2410M, 2.30GHz CPU; los resultados de su desempeño y la comparación con los resultados obtenidos en [5], [8] y [15] se resumen en las tablas V y VI; como se puede ver el algoritmo propuesto presenta desempeños muy similares a los presentados en las referencias consideradas en los indicadores UACI, NPCR y la entropía, logra mejores coeficientes de correlación entre píxeles adyacentes y un buen desempeño en velocidad de ejecución. Sin embargo en cuanto a indicadores como el UACI y NPCR es difícil saber cuál trabajo es más seguro, si bien se busca que el NPCR tienda a 100 %, es decir, que no exista ningún píxel con el mismo valor en la misma posición para dos imágenes cifradas, es más difícil acercarse a dicho valor ideal a medida que las imágenes son más grandes; para el UACI que evalúa que tan diferente son dos imágenes cifradas, no es lógico pensar que este valor tenga que ser muy grande ya que se perdería desempeño en la entropía, o que sea muy pequeño puesto que las imágenes cifradas no serían lo suficientemente diferentes la una de la otra.

Tabla V. Comparación Indicadores de desempeño.

| Referencias | UACI (%) | NPCR (%) | Entropía | Coeficientes de Correlación | | | | | |
|--------------|----------|----------|--------------|-----------------------------|---------|----------|---------|----------|---------|
| | | | | Horizontal | | Vertical | | Diagonal | |
| | | | | Original | Cifrada | Original | Cifrada | Original | Cifrada |
| [5] | 33.4565 | 99.6208 | 7.9992454569 | 0.8643 | -0.0008 | 0.9816 | 0.0045 | 0.9165 | 0.0017 |
| [8] | 33.5343 | 99.5987 | 7.991 | 0.9885 | -0.0002 | 0.9940 | -0.0020 | 0.9821 | -0.0042 |
| Este trabajo | 33.4610 | 99.6025 | 7.999356673 | 0.9885 | -0.0001 | 0.9940 | -0.0004 | 0.9821 | 0.0002 |

En la Tabla V, en los coeficientes de correlación, se puede observar que la referencia [8] presenta un mejor desempeño que la referencia [5], ya que a pesar de presentar correlaciones positivas mayores en las imágenes originales logra menores valores de correlaciones vertical y horizontal de las imágenes cifradas. La razón del mejor desempeño de la referencia [8] se puede atribuir a su buen proceso de permutación, tener un proceso de difusión iterativo e incorporar mayor aleatoriedad a la máscara que se utilizan para difundir la imagen permutada.

En el caso de la entropía, la referencia [5] posee mejor desempeño que la [8], que seguramente se debe al uso de un proceso de permutación más complejo, puesto que en [5] el trabajo para la obtención de las sucesiones caóticas es bastante exhaustivo.

Tabla VI. Comparación velocidad de ejecución.

| Referencias | [8] | [5] | [15] | Este trabajo |
|--|-----------|------------|-----------|--------------|
| Tamaño imagen en píxeles | 512 × 512 | 512 × 512 | 256 × 256 | 512 × 512 |
| Velocidad de ejecución en segundos (s) | 0.1529 s | 1.670671 s | 2 s | 0.941 s |

En este trabajo se buscó equilibrio entre seguridad y velocidad de ejecución, es decir, lograr un algoritmo con buen nivel de seguridad sin perder velocidad de ejecución.

5. Conclusiones

Con el desarrollo del presente algoritmo se evidencia que gracias a la complejidad en el comportamiento del sistema caótico de Lorenz y su propiedad de sincronización, se logra obtener un sistema de encriptación de imágenes a escala de grises con buen desempeño en cuanto a seguridad y velocidad de ejecución comparable con los resultados obtenidos en trabajos recientes.

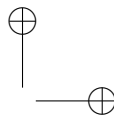
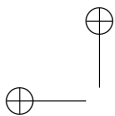
La propiedad de no predictibilidad generada por el sistema de Lorenz fue aprovechada para generar un sistema de encriptamiento eficiente, el cual, como lo demuestra el análisis estadístico, evidencia una alta resistencia a ataques estadísticos conservando un alto nivel de entropía, sin la necesidad de mantener un constante cambio de las condiciones iniciales del atractor. Esto significa un uso eficiente de las propiedades de sincronización y entropía del sistema caótico de Lorenz.

El uso inapropiado de los parámetros mostrados en este artículo puede generar una codificación no adecuada de la imagen. Al usar un incremento de tiempo muy pequeño del atractor, la variabilidad del estado anterior y siguiente no es significativa, volviendo el sistema vulnerable a ataques estadísticos; así, el atractor debe tener incrementos de tiempo grandes para generar mayor entropía.

Aunque en el presente trabajo se utiliza únicamente el atractor de Lorenz, para trabajos futuros se sugiere explorar con otros atractores caóticos buscando obtener mejores medidas de desempeño y con mayor espacio de clave. Por otra parte, el algoritmo presentado está diseñado para codificar imágenes en escala de grises, se espera que el trabajo desarrollado en este artículo pueda contribuir en el desarrollo de algoritmos para codificar imágenes a color.

Referencias

- [1] Y. Yan, Song, *Cryptanalytic Attacks on RSA*. Springer US, 2008, pp. 91-110. ↑[397](#)
- [2] Louis M. Pecora y Thomas L. Carroll, "Synhronization in chaotic systems". *Physical Review Letters*, Volumen 64, 8, 1990, pp. 821- 824. ↑[397](#), [401](#)
- [3] Jian Zhang, *An Image Encryption Scheme Based on Cat Map and Hyperchaotic Lorenz System*. *International Conference on Computational Intelligence & Communication Technology*. IEEE. 2015. ↑[398](#)
- [4] Chong Fu, Wen Jing Li, Zhao-yu Meng, Tao Wang, Pei-xuan Li, *A Symmetric Image Encryption Scheme Using Chaotic Baker map and Lorenz System*, *Ninth International Conference on Computational Intelligence and Security*, IEEE 978-1-4799-2548-3/13. 2013. ↑[398](#)
- [5] Yulling Luo, Lvchen Cao, Senhui Qiu, Hui Lin, Jim Harkin, Junxlu Liu, "A Chaotic map- control-based and the image-related cryptosystem". *Nonlinear Dyn*, Volumen 83 Springer, 2016. pp. 2293-2310. ↑[398](#), [400](#), [405](#), [410](#)
- [6] Yannick Abanda & Alain Tiedeu, *Image encryption by chaos mixing*. *Journal the Institution of Engineering and Technology IET*. ↑[398](#)
- [7] Buhalqam Awdun, Guodong Li, "The Color Image Encryption Technology Based on DNA Encoding & Sine Chaos". *International Conference on Smart City and Systems Engineering*, 978-1-5090-5530-2/16 IEEE, 2016. ↑[398](#)
- [8] Guodong Ye, Haiqing Zhao, Huajin Chai, "Chaotic image encryption algorithm using wave-line permutation. and block diffusion". *Nonlinear Dyn*, 83 Springer, 2016, pp. 2067–2077. ↑[399](#), [400](#), [403](#), [405](#), [410](#)



- [9] Jiangang Zhang, Li Zhang, Xinlei An, Hongwei Luo & Kutorzi Edwin Yao, "Adaptive Coupled Synchronization Among Three Coupled Chaos Systems and Its Application to Secure Communications". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking V*, 134, 2016. ↑399
- [10] Mariela Rodríguez, María González, Juan Estrada, Lúa Acosta y Octavio Florez, "Secure Point-To-Point Communication Using Chaos". *DYNA*, [S.l.], v. 83, n. 197, p. 180-186, may, 2016. ↑399
- [11] Wang Zhen, Huang Xia, Li Yu-Xia and Song Xiao-Na, "A New Image Encryption Algorithm Based on The Fractional-Order Hyperchaotic Lorenz System". *Chin. Phys. B.*, vol. 13, no. 3, 2012, pp. 1441–1450. ↑399, 405
- [12] H. Alsafasfeh and, Arfoa, "Image Encryption Based on the General Approach for Multiple Chaotic System". *Journal of Signal and Information Processing*, vol. 2, no. 3, 2011, pp. 238-244. ↑399, 405
- [13] L. Kocarev, "Chaos-based cryptography: A brief overview". *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2001, 1(2): pp. 6-21. ↑400
- [14] Steven H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos with Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Perseus Books, Reading, Estados Unidos, 1994, pp. 301-347. ↑400
- [15] José Moreno, Fabio Parra, Rafael Huérfano, César Suárez y Isabel Amaya, "Modelo de Encriptación Simétrica basada en atractores caóticos". *Ingeniería*, Vol. 21 No. 3, 2016, pp. 378-390. ↑401, 410
- [16] Guodong, Ye., K.W ,Wong, "An Efficient Chaotic Image Encryption Algorithm Based on a Generalized Arnold Map". *Nonlinear Dyn.* 69 Springer, 2012, pp. 2079– 2087. ↑403

Iván Felipe Rodríguez

Estudiante Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: ifrodriguezr@correo.udistrital.edu.co

Edilma Isabel Amaya

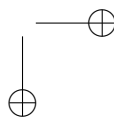
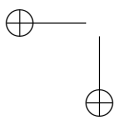
Licenciada en Matemáticas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Matemáticas, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: iamaya@udistrital.edu.co

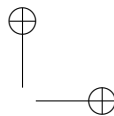
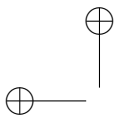
César Augusto Suárez

Ingeniero Mecánico e Industrial, Universidad INCCA de Colombia; magíster en Materiales y procesos de manufactura Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá; docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: casuarezp@udistrital.edu.co

José David Moreno

Ingeniero de Sistemas, Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: jdmorenop@correo.udistrital.edu.co





Instrucciones para los Autores

Introducción

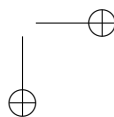
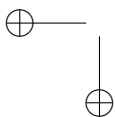
La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los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

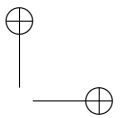
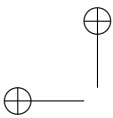
Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo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

Clasificación de los artículos

La clasificación de un artículo científico dependerá de la naturaleza del nuevo conocimiento que reporte, lo que nos lleva a plantear la siguiente tipificación:

- **Investigación:** son aquellos que abordan una pregunta sobre un aspecto disciplinar teórico o aplicado, usualmente mediante un estudio científico del comportamiento de un fenómeno o una situación bajo ciertas condiciones de control.
- **Metodología:** estudios enfocados en presentar un nuevo método de solución para una categoría particular de problemas, demostrando resultados favorables en comparación con el estado del arte o de la técnica. Son investigaciones específicamente dedicadas a validar las bondades y desventajas del método que proponen o a realizar caracterizaciones comparativas de varios métodos en dominios disímiles o inexplorados.
- **Revisión:** los que presentan análisis críticos, sistemáticos, delimitados y exhaustivos, sobre los avances, tendencias, resultados positivos y negativos, vacíos y futuras rutas de investigación encontrados en el actual estado del arte o de la técnica.
- **Perspectiva:** aquellos que, recurriendo a fuentes bibliográficas originales y con un discurso argumentativo y controversial, cuestionan el actual estado del arte o de la técnica, proponen visiones alternativas a las corrientes de pensamiento dominantes, critican la vanguardia de la disciplina o instigan un viraje hacia tópicos de investigación abandonados o desentendidos por la comunidad científica. Usualmente más que una reflexión personal, buscan establecer una posición colectiva (de comunidad científica), sustentada en una discusión que combina introspectiva, retrospectiva y prospectiva sobre el asunto en cuestión.
- **Reporte de Caso:** los que buscan divulgar un hallazgo novedoso encontrado durante o posterior a un caso particular de desarrollo tecnológico, que eventualmente podría





generalizarse mediante una investigación más amplia (aplicada a más casos) y que por lo tanto ameritan ser conocidos por la comunidad para convocarla en tal sentido. Más que enfatizar en el desarrollo tecnológico o innovación per sé, se enfocan en caracterizar el conocimiento descubierto en el caso de estudio respectivo.

- **Editoriales, Cartas al Editor, Artículo Invitado:** son las únicas categorías que no reportan nuevo conocimiento, sino que discuten temas de interés para la Revista, para su línea editorial o para su comunidad, con un carácter de opinión informada.

Para una mayor información de la explicación y/o diferencias de la anterior clasificación los invitamos a visitar el siguiente enlace “Guía breve de clasificación de artículos en INGENIERÍA”. <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11131/12114>

Procedimiento para el envío de artículos

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

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

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

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

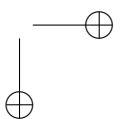
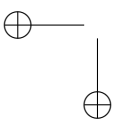
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

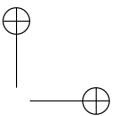
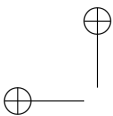
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

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

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

- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5091/6711>





Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

Aspectos a tener en cuenta

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

Derechos de autor

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

