

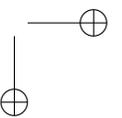
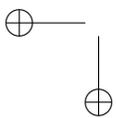
UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

REVISTA Ingeniería

Volumen 22 • Número 2 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

2017



REVISTA INGENIERÍA

Volumen 22 · Número 2 · 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

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

Germán Jairo Hernández, PhD.
Universidad Nacional
de 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

Juan Pablo Castrellón Torres, MSc.
Universidad Nacional de Colombia

David Andrés Zamora Ávila, PhD(c).
Universidad Nacional de Colombia

Luis Javier Cruz Riaño, PhD.
Universidad Pontificia Bolivariana

Nelson Obregón Neira, PhD.
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

John Ramiro Agudelo, PhD.
Universidad de Antioquia, Colombia

Daniel Ureña Muñoz, MSc.
Instituto Tecnológico de Costa Rica

Yris Olaya, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

German Méndez, PhD.
Universidad Distrital FJDC, Colombia

Carlos A. Forero Núñez, PhD.
Universidad Jorge Tadeo Lozano,
Colombia

Horacio Bautista Santos, PhD.
Instituto Tecnológico Superior de
Tantoyuca, México

Nelson Alexander Pérez, PhD.
Universidad de los Andes, Mérida,
Venezuela

Omar Suarez Tamara, PhD.
Universidad de Sucre, Colombia

Edgar Eduardo Muñoz Diaz, MSc.
Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

Raúl Mezquida, MSc.
Universidad de Córdoba, Colombia

Juan Pablo Casas Rodríguez, PhD.
Universidad de los Andes, Colombia

Tirso L. Reyes Carvajal, PhD.
Universidad del Amazonas, Brasil

Carolina Suárez Roldan, MSc.
Universidad Cooperativa de Colombia

Juan Carlos Botero Palacio, PhD.
Universidad EAFIT, Colombia

Edinson Franco Mejía, PhD.
Universidad del Valle, Colombia

Carlos Ramos Paja, PhD.
Universidad Nacional de Colombia

Camilo Alfonso Rodríguez Garzon, MSc.
Banco de la República, Colombia

Henry Antonio Roncancio Velandia, MSc.
University of São Paulo, Brasil

Luis Alejandro Builes Jaramillo, PhD(c).
Institución Universitaria Colegio Mayor
de Antioquia, Colombia

Darío Amaya Hurtado, PhD.
Universidad Militar Nueva Granada,
Colombia

Juan Sossa Ledezma, MSc(c).
Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia

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. Está 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 metáfora sobre el análisis de series de tiempo, en alusión a uno de los artículos publicados en este número donde procesan datos de ese tipo para la caracterización de calidad del agua.

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

TABLE OF CONTENTS

Editorial

- Érase una vez unos datitos...** 159
Once Upon a Time There was a Small Data...
Sergio A. Rojas

Industrial Engineering

- Towards a Common Reference Framework for Traceability in the Food Supply Chain** 161
Hacia un Marco Conceptual Común Sobre Trazabilidad en la Cadena de Suministro de Alimentos
Dora Lucía Rincón B. · Johan Esteban Fonseca Ramírez · Javier Arturo Orjuela Castro

Electric Engineering

- Selection of Alternatives for the Natural Gas Supply in Colombia Using the Analytic Hierarchy Process** 190
Selección de Alternativas para el Suministro de Gas Natural en Colombia empleando el Proceso Analítico Jerárquico
Mauricio Becerra Fernández · Ricardo Rodríguez Yee

Environmental Engineering

- Spectral Estimation of UV-Vis Absorbance Time Series for Water Quality Monitoring** 211
Estimación Espectral de Series de Tiempo de Absorbancia UV-Vis para el Monitoreo de Calidad de Aguas
Leonardo Plazas-Nossa · Miguel A. Ávila A. · Andres Torres

Computational Intelligence

- Characterization of EEG Signals Using Wavelet Packet and Fuzzy Entropy in Motor Imagination Tasks** 226
Caracterización de Señales EEG Mediante Wavelet Packet y Entropía Difusa para Tareas de Imaginación Motora
Boris Medina Salgado · Ramón Alvarez López

Special Section - WEA 2017

- Workshop on Engineering Applications 2016: A step closer towards international recognition** 239
El Workshop on Engineering Applications 2016: Avanzando hacia el Reconocimiento Internacional
Juan Carlos Figueroa García · Eduyn Ramiro López Santana · Roberto Ferro Escobar

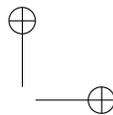
- Assessment of Effects of a Delay Block and a Nonlinear Block in Systems with Chaotic Behavior Using Lyapunov Exponents** 240
Evaluación del Efecto de un Retardo y una No Linealidad en Sistemas con Comportamiento Caótico Utilizando Exponentes de Lyapunov
Pablo Rodríguez-Gómez · Maikoll Rodríguez-Nieto · Jairo Soriano-Mendez

- Operation of a Photovoltaic Microinverter as Active Power Filter using the single phase P-Q Theory and Sliding Mode Control** 254
Operación de un Microinversor Fotovoltaico como Filtro Activo de Potencia Usando la Teoría P-Q Monofásica y Control en Modo Deslizante
Oswaldo Lopez-Santos · Sebastián Tilaguy-Lezama · Sandra P. Rico-Ramírez · Luis Cortes-Torres

- Assessment of the Input Substrate Characteristics Included in the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)** 269
Evaluación de las Características del Sustrato de Entrada Incluidas en el Modelo De Digestión Anaerobia No. 1 (ADM1)
Laura Andrea Morales · Ángel David Rodríguez · Herbert Enrique Rojas

- Orientation Assistance for Visually Impaired Passengers within a Bus Rapid Transit System (Transmilenio), Using Satellite Geolocation** 283
Orientación de Pasajeros con Discapacidad Visual Dentro del Sistema de Transporte Masivo Transmilenio, Mediante Geolocalización Satelital
Julián Camargo · Luis González · Diego Segura · Fabián Garay · Nubia Rincón

- Instructions for Authors** 298



Nota Editorial

Érase una vez unos daticos...



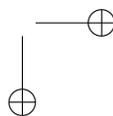
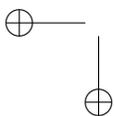
Open access

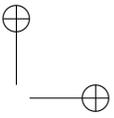
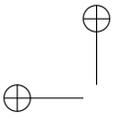


...Que de repente se convirtieron en unos grandes datos. Podría ser el comienzo de una fábula moderna, una que en inglés se llamase *Big Data*, acerca de una nueva era de la civilización donde la convivencia, la economía, la ciencia, la educación, los medios, el entretenimiento y la política estuvieran dominados por el aumento exagerado de los grandes volúmenes de datos. No estaríamos muy lejos de ese panorama, pues en efecto, los recientes avances en genética, física nuclear, astronomía, telecomunicaciones, redes sociales, internet de las cosas, junto con la penetración masiva de sensores de bajo costo (cámaras de seguridad, sistemas de navegación satelital, teléfonos celulares inteligentes, etc.), han vuelto cotidiano la disponibilidad de cantidades de datos medibles en la escala de los prefijos *tera-* y *peta-*, cuando un par de décadas atrás escasamente se alcanzaban los *kilos* o difícilmente las *megas*. Este nuevo escenario se caracteriza por un fenómeno común: montones nunca imaginados de datos fáciles de coleccionar pero difíciles de interpretar, esperando a ser escudriñados, correlacionados, filtrados, visualizados y actualizados de manera consistente y en tiempo real, de forma que revelen tendencias de uso o patrones de operación que contribuyan a un mejor entendimiento y control de los fenómenos que los generan.

En este contexto los ingenieros enfrentamos un reto comparable al presentado a los pioneros de la computación y la estadística en sus inicios. Veamos: en una época en la que tanto datos como cálculos eran realizados con lápiz y papel, la llegada de los dispositivos de cómputo automático significó la necesidad de ingeniar modelos, reglas y algoritmos para programarlos de manera efectiva y aprovechar así las ventajas de la entonces novedosa tecnología. Grandes científicos como Turing, Von Neumann, Dijkstra, Knuth, Shannon, Codd, Dantzig, Pearson o Fischer, entre otros, dedicaron a ello buena parte de sus esfuerzos. ¡Enhorabuena! De no haberlo hecho quizás hoy en día no conoceríamos la secuencia completa del genoma humano, ni la posible existencia real del bosón de Higgs, ni *Wikipedia*, ni *Google Earth*, ni *Angry Birds*, ni usaríamos *Ubers* o *Facebooks*. Claro, tampoco encontraríamos nuestros buzones de correo electrónico lleno de mensajes indeseados ni correríamos el riesgo de padecer un monitoreo no autorizado de nuestros hábitos virtuales por parte de agencias gubernamentales de espionaje, o peor, por parte de corporaciones ávidas de intereses comerciales, ni menos aún estaríamos expuestos a fraudes electrónicos buscando despojarnos de nuestros ahorros monetarios. Avances y contradicciones, que en últimas nos convocan en igual medida a asumir el reto de abordarlos desde una nueva perspectiva: la que nos brinda la posibilidad de contar con computadores y plataformas de procesa-

Citación: S. Rojas, "Érase una vez unos daticos..." INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 159-160, 2017.
 ©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
 En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.2.ne01>





Érase una vez unos daticos...

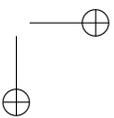
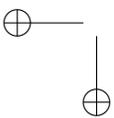
miento de datos más veloces, más ubicuos (“en la nube”), a gran escala y con todos los actores de la sociedad con posibilidad de participar en el ecosistema digital.

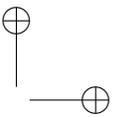
De allí que renazca el interés en refinar esos diseños pioneros, en actualizar dichos algoritmos, maquinarias y modelos de optimización y análisis de la información para que sean cada vez más eficientes, más livianos, más universales, más efectivos, más confiables dentro del contexto del *Big Data*. Quizás con nombres más estilizados (*machine learning, computational statistics, data mining, pattern recognition, data analytics*), pero igual deberían amoldarse no solo en estándares técnicos y disciplinares, sino también a principios éticos, altruistas, autosostenibles, en fin, humanitarios: modelos más incluyentes, más verídicos, más equitativos, más asequibles, más ecoamigables, más respetuosos de las libertades individuales. De esta forma se revalidaría la misión implícita del modelamiento y la optimización (en su acepción ingenieril) como generadoras del bienestar y a la supervivencia de los seres vivos, con base en sistemas colaborativos perfeccionados. Y bajo esta perspectiva, los “Grandes Datos” simplemente harán parte del engranaje de una “Gran Humanidad” o mejor, de una “Gran Co-existencia” de organismos vivos, organizaciones, sistemas naturales y artificiales. Recorrer ese camino puede ser más desafiante que el de interpretar el *Big Data*. Superarlo podría significar prosperar a nuevas eras de la civilización, quizás como continuaciones de la fábula imaginada, una primera llamada *Big Knowledge* y una final que sería la *Big Wisdom*.

Colofón: en este número encontrarán una selección de artículos extendidos de los mejores trabajos presentados en el Workshop of Engineering Applications (WEA 2016), felicitamos a los autores participantes y así mismo a los evaluadores y editores que contribuyeron en esta colaboración. Igualmente agradecemos a los autores y colaboradores de nuestros artículos regulares, que en esta edición abordan aspectos de trazabilidad en alimentos perecederos, alternativas para el suministro de gas natural, series de tiempo de calidad del agua (al cual alude nuestra carátula) y estudio de señales de imaginación motora. Esperamos sea de su agrado.

Sergio A. Rojas, PhD.

Editor General Revista INGENIERÍA





Research

REVISTA
Ingeniería

Towards a Common Reference Framework for Traceability in the Food Supply Chain

Hacia un Marco Conceptual Común Sobre Trazabilidad en la Cadena de Suministro de Alimentos

Dora Lucía Rincón B.¹, Johan Esteban Fonseca Ramirez², Javier Arturo Orjuela Castro²

¹Universidad Salamanca. España.

²Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá - Colombia

*Correspondence: doralucia@usa.es, fonseca_johan@hotmail.com, jorjuela@udistrital.edu.co

Recibido: 16/05/2016. Modificado: 05/09/2016. Aceptado: 14/02/2017.

Abstract

Background: The absence of a common conceptual framework on traceability in the food supply chain (SCF), prevents a cohesive development of this concept. The absence has generated confusion and has made it impossible to demonstrate the social and commercial advantages of its implementation. In addition, not having a common framework in countries such as Colombia obstructs the development of public policies.

Method: A systematic review of the literature was carried out in four stages: search protocol to consult articles in the databases Scopus, Science Direct and ISI Web; review and selection of relevant articles; extraction and incorporation of data into tables and formats designed for this purpose and elaboration of the conceptual framework.

Results: A common conceptual framework is proposed for the design and implementation of a traceability system in the SCF covering the following aspects: definition of traceability, characteristics and properties, schemes, traceable resource unit, motivators and recording systems. The international and national legislation is evaluated and aspects for its incorporation are established. The proposed conceptual framework is exemplified by the meat supply chain to guide the implementation of traceability systems in CSA in Colombia.

Conclusions: The conceptual framework for SCF traceability can be a guide for the implementation and development of food chains in the Colombian context. Implementing this in agricultural chains would allow the differentiation of origin, which can be a competitive factor for producers with good agricultural practices, as well as provide effective logistic capacities for all agents of the SCF. The effect of its implementation should be evaluated with special emphasis on the impact on brand positioning and the establishment of fair prices as an effect of tracking and tracing the traceability system.

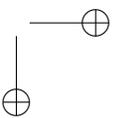
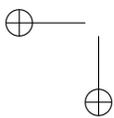
Keywords: Traceability System, Food Safety, Meat, Legislation

Language: Spanish



Citación: D.L. Rincón, J.E. Fonseca, J.A. Orjuela, "Towards a Common Reference Framework for Traceability in the Food Supply Chain" INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 161-189, 2017.

©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.2.a01>



Resumen

Contexto: La ausencia de un marco conceptual común sobre trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos (CSA), impide su desarrollo de manera unificada. Dicha ausencia ha generado confusión y no ha permitido evidenciar las ventajas sociales y empresariales de implementarla; además, no contar con un marco común en países como Colombia, impide el desarrollo adecuado de políticas públicas.

Método: Se realizó una revisión sistemática de la literatura en cuatro etapas: protocolo de búsqueda para consultar artículos de las bases Scopus, Science Direct, ISI Web; revisión y selección de artículos relevantes, extracción de datos en tablas y formatos diseñados para dicho fin y elaboración del marco conceptual.

Resultados: Se propone un marco conceptual común que abarca los siguientes aspectos, definición de trazabilidad, características y propiedades, esquemas, unidad de recurso trazable, motivadores y sistemas de captura; para el diseño e implementación de un sistema de trazabilidad en la CSA. Se evalúa la legislación internacional y nacional y se establecen elementos para su implementación. Se ejemplifica el marco conceptual propuesto para la cadena de suministro cárnica que permitiría orientar la implementación de sistemas de trazabilidad en CSA en Colombia.

Conclusiones: El marco conceptual para la trazabilidad de CSA puede ser una guía para la implementación y desarrollo en las cadenas alimentarias en el contexto colombiano. Una implementación en cadenas agropecuarias permitirá la diferenciación de origen, lo que puede ser un factor competitivo para aquellos productores que realicen buenas prácticas agrícolas, así como capacidades logísticas efectivas por los demás agentes de la CSA, el efecto de su implementación debe evaluarse en especial en la incidencia sobre posicionamiento de marca y el establecimiento de precios justos, como efecto del rastreo y seguimiento del sistema de trazabilidad.

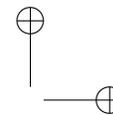
Palabras clave: Cárnicos, legislación, seguridad alimentaria, sistema de trazabilidad.

Agradecimientos: Este artículo es resultado del proyecto Modelos de Simulación de la Cadena de Suministro de Frutas, para lo cual se le agradece la participación a la Ingeniera, Nataly Páez Salamanca, del Grupo GICALyT.

Idioma: Español

1. Introducción

La trazabilidad en la cadena de suministro (CS) permite identificar información relacionada con el seguimiento y rastreo de unidades trazables durante el proceso de producción y comercialización. La trazabilidad ha sido abordada desde diferentes perspectivas como: tecnológicas, sociales y administrativas. Sin embargo, dicha interdisciplinariedad en estudios específicos ha provocado que no exista un marco conceptual común de trazabilidad [1] y que más allá de las diferencias de la definición, existe un desacuerdo teórico en las propiedades de la misma y en la estructura normativa [2]; por su parte, las particularidades de la industria alimentaria tales como la perecibilidad, hace necesaria una definición particular de dicho lenguaje común, que sea entendido y apropiado por todos los actores de la cadena de suministro alimentaria (CSA), para de este modo lograr una interacción eficiente entre los agentes de una CSA. Tal como lo plantea Crandall, *et al.* [3] la trazabilidad a través de la CSA debe darse desde la producción hasta el consumo final y es una necesidad urgente para la industria, los consumidores y el gobierno; sin embargo, si no hay un consenso del significado y características de la trazabilidad es imposible la coordinación en el intercambio de información. En este artículo se pretende precisamente mediante una revisión sistemática de la literatura, generar un marco común que permita tener claro conceptos esenciales para el diseño de un sistema de trazabilidad en las CSA, así como detectar elementos orientadores para esquemas normativos, ejemplificado con el caso de la CSA de la industria cárnica en Colombia. De igual



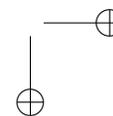
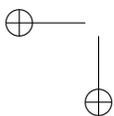
forma, se espera que la integración de los diferentes criterios facilite las nuevas actividades de investigación en este campo.

La trazabilidad es una herramienta importante para la CSA, dado que facilita los procesos de intercambio de información y producto entre cada uno de los eslabones que la componen, permitiendo acceder en cualquier momento a información inherente a procesos, movimientos y características del alimento, con lo cual se puede hacer seguimiento y controlar el suministro, distribución, calidad e inocuidad del mismo. Aunque los conceptos generales, las propiedades y las características básicas para cualquier sistema de trazabilidad pueden ser similares [1], para una CSA, las especificidades, características y necesidades de sistema de trazabilidad deben ser diferenciadas especialmente en alimentos altamente perecederos como las carnes, lácteos, frutas o verduras. No obstante, no se encuentra en la literatura un marco conceptual que permita orientar el diseño de un sistema de trazabilidad en las cadenas de CSA.

A menudo la CSA es tratada por separado del sistema de trazabilidad, sin tener en cuenta que ambas coexisten y a pesar que cada eslabón pueda funcionar de forma independiente, el impacto final no es mutuamente excluyente [4]. Es por esto que el diseño de un sistema de trazabilidad requiere un replanteamiento a fondo o la reorganización de toda la CSA [5]. Para ello, se necesita contar con bases comunes desde las cuales se generen diseños compatibles entre sí que permitan compartir información. Esto es imprescindible, dado que las empresas relacionadas con la CSA deberán implementar la trazabilidad o tendrán dificultades para mantenerse en el negocio [6].

La adopción de sistemas de trazabilidad no es fácil para los pequeños productores de alimentos y empresas de procesamiento, ya que carecen de capacidad financiera, información adecuada y conocimientos suficientes para ponerla en práctica [7], por lo tanto, la comunidad académica y el gobierno deben generar los mecanismos pertinentes para que puedan implementar la trazabilidad de acuerdo a sus capacidades y necesidades. En países como Colombia, donde la implementación de normas de seguridad alimentaria y sistemas de trazabilidad está en desarrollo, es necesario generar esquemas que permitan orientar al sector público y a los empresarios para el diseño y ejecución de sistemas eficientes que les permita ser competitivos. Según el informe del Banco Mundial [8] Colombia tuvo un índice de desempeño logístico (LPI) de 2,87 en el 2012, 2,64 en 2014 y 2,61 en 2016, pasando así del puesto 64 al 96 de entre promedio 160 países; el posicionamiento de Colombia, se debe principalmente a que de los seis factores que componen el LPI (proceso de despacho de aduana, calidad de infraestructura, facilidad de embarques a precios competitivos, calidad de servicio de logística, trazabilidad y frecuencia de cumplimiento de tiempos), el factor que mide la trazabilidad no presenta para Colombia mejoras substanciales, ni como indicador marginal para el país, ni de posicionamiento frente a los demás países; lo mismo ocurre con el de aduana.

Debido a que los sistemas de trazabilidad son sistemas diseñados para rastrear o seguir los atributos del producto a lo largo de toda la CSA, Golan & Krissoff [9] indican que las autoridades han comenzado a sopesar la utilidad de inducir sistemas obligatorios a fin de abordar cuestiones que van desde la seguridad alimentaria y el bioterrorismo, hasta el derecho de los consumidores a tener información de los alimentos. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la trazabilidad ha sido reconocida como una herramienta esencial para garantizar la seguridad alimentaria y la calidad de los alimentos [5], por lo cual su fuerza se encuentra en la prevención de la incidencia de los riesgos



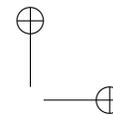
de seguridad y reducción de la magnitud y el impacto de tales incidentes, facilitando la identificación de alimento o lotes afectados, especificando lo que ocurrió, cuándo y dónde se produjo y la identificación de quién es el responsable [9], [10].

De acuerdo con ello, la seguridad es un componente importante del producto, ya que su ausencia puede provocar lesiones graves y riesgos letales para el consumidor, por lo cual la seguridad alimentaria es un compromiso de los gobiernos; mientras que la calidad de la comida es principalmente una cuestión económica decidida por el consumidor [11]. Es necesario entender que los sistemas de trazabilidad no garantizan productos seguros de alta calidad, ni determinan los grados de responsabilidad; pero actúan como un elemento de control y gestión para obtener información de los actores de la cadena, indicando si actúan correctamente o no, por lo cual la detección temprana y una respuesta rápida a cualquier problema se hace posible y es una responsabilidad directa de los encargados del sistema.

El desarrollo de los estudios de trazabilidad se divide en dos etapas: la primera, en la cual la trazabilidad se desarrolló bajo una iniciativa proactiva de las organizaciones, motivado principalmente por el aumento de los ingresos en los sistemas de distribución de menor costo, gastos de la recuperación reducidos y mayores ventas de productos de alta seguridad. La segunda etapa se inició en la década de 1990 con la aparición de escándalos alimentarios a nivel mundial; lo que originó una agenda de los gobiernos sobre trazabilidad de alimentos, especialmente los europeos, lo que condujo a que la trazabilidad se incorporara como regulación en alimentos [1], [12].

Organismos internacionales como la FAO [13] declararon que la gestión de la seguridad y calidad de los alimentos es una responsabilidad compartida de todos los actores de la CSA, incluidos los gobiernos, la industria y los consumidores; pero al no existir un consenso común o estandarización de criterios, no se pueden realizar acciones conjuntas. Por otro lado, tal como lo afirma Aung Min y Chang Seok [11], los sistemas de trazabilidad están asociados a dispositivos para integración del intercambio de información en todas las etapas de la cadena y al uso de tecnologías. Por lo cual, si se continúan realizando acciones de trazabilidad sin ningún estándar, países como Colombia seguirán quedando rezagados debido a los altos costos tecnológicos, ya que no podrá implementar tecnologías de uso compartido; así, toma relevancia lo planteado por Rafael Flórez, director general de GS1 Colombia, quien indica que la implementación de un lenguaje común para intercambiar información hace más eficiente las operaciones de la cadena y es de vital importancia para cualquier sistema de trazabilidad [14], [15].

Países de la unión Europea [16] y Estados Unidos, han sido los abanderados en el tema de la trazabilidad, con desarrollos empresariales y la legislación impuesta; sin embargo, de acuerdo con Smith *et al.* [6], Estados Unidos puede quedarse rezagado en comparación con otros países en el desarrollo de sistemas de trazabilidad para alimentos y en especial para ganado, aves de corral y sus derivados, lo cual puede ser el resultado de directrices de carácter voluntario, que no fueron adoptadas por las organizaciones en las CSA; este hecho evidencia la gran influencia que ejerce la legislación y su potencial para equilibrar las necesidades de todas las partes interesadas. Se debe tener claro que, si bien la puesta en práctica de la trazabilidad puede ser costosa, dicho costo no se equipara con los riesgos de no tenerla implementada, tanto para los gobiernos, consumidores, empresas individuales y la industria alimentaria en su conjunto [10], por lo cual es mejor desarrollar



acciones conjuntas que permitan un sistema eficiente.

En los últimos años las autoridades colombianas han emitido legislaciones con el fin de implementar sistemas de trazabilidad en diferentes sectores, en especial el agropecuario y el farmacéutico, como resultado de la necesidad de evitar afectaciones a la salud pública; estas legislaciones deben ser asumidas e implementadas en distintos eslabones de las cadenas productivas, pero su acogida y avance ha sido mínima. Estas legislaciones hacen evidente que el gobierno colombiano ha puesto de manifiesto la necesidad de implementar en el país sistemas de trazabilidad, por lo cual tanto las empresas, como la academia deben buscar formas eficientes que permitan no solo el cumplimiento de la normatividad existente, sino hacer de la trazabilidad un factor competitivo para el país. En el contexto anterior, el vacío conceptual reflejado en los documentos institucionales y artículos de referencia, implica la necesidad de definir un marco conceptual común que oriente la implementación de la trazabilidad en las CSA.

Este artículo está organizado en seis secciones, la sección dos muestra la metodología empleada en la elaboración del mismo. En la sección tres se desarrolla los elementos para el diseño de un sistema de trazabilidad, la cual comprende la definición, los objetivos y conductores, las características y propiedades; en la sección cuatro se hace una referencia general a la evolución de la legislación internacional y nacional sobre trazabilidad; en la sección cinco, se analizan artículos empíricos relacionados con la CSA de la industria cárnica, lo cual permitió identificar elementos orientadores para esquemas normativos y de diseño de un sistema de trazabilidad para CSA en países en vía de desarrollo como Colombia; por último, en la sección seis se presentan las conclusiones y los posibles ámbitos de futuros estudios.

2. Metodología

La revisión sistemática es empleada por diferentes autores para generar marcos conceptuales comunes; Kitchenham, B. [17] propone los pasos esenciales para garantizar rigor en la revisión. De acuerdo con Kitchenham y basados en las siguientes preguntas se orientó la investigación: ¿Qué aspectos debe bordar el marco conceptual sobre Trazabilidad para las CSA?, ¿Cuáles son los principios, objetivos, conductores, características y propiedades que debe tener un sistema de trazabilidad para las CSA? ¿Cuáles son los elementos normativos y legislativos que orienten y faciliten la adopción e implementación por los diferentes agentes de la CSA en países como Colombia?.

La revisión de la literatura permitió identificar la dinámica de las publicaciones relacionadas con trazabilidad en la CSA, dichas publicaciones se encuentran en una franja de tiempo de 1995 hasta 2016, evidenciándose una tendencia creciente desde el 2011, año en el cual se publicó cerca del 12 % de los artículos revisados, lo que muestra la relevancia dada al tema a nivel internacional. Con relación a las revistas con mayor número de publicaciones en orden de relevancia, se encontró que cerca del 60 % de los artículos están publicados en las revistas: *Food Control*, *Journal of food engineering*, *Food Policy*, *Biosystems Engineering*, *British Food Journal*, *Meat Science* y *Trends in Food Science* y *Techonology*. En lo que respecta a autores, Petter Olsen, Kine Karlsen y Kathryn Donnelly de Noruega, Maitri Thakur y Charles Hurburgh de Estados Unidos; Paolo Gay y Fabrizio Dabbene de Italia, son quienes han publicado mayor número de artículos sobre el tema, lo cual los

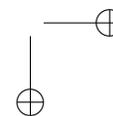
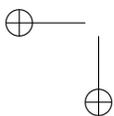


Tabla I. Pasos secuencias de la revisión de la literatura

Etapas	Actividades	Resultado
Protocolo y estrategia de búsqueda	<ul style="list-style-type: none"> • Búsqueda en la base de datos Science Direct, Scopus, ISI Web. • La búsqueda se realizó en inglés con los términos de búsqueda: "traceability" limitada a título, palabras claves y resumen; se enlace a la frase "Supply chain" limitada a contenido de texto. • Para el diseño del marco conceptual se utilizan los artículos teóricos encontrados y artículos empíricos referenciados frecuentemente en los mismos, a fin de unificar criterios teóricos. • Se establecen seis subtemas específicos sobre trazabilidad para ser unificados: definición, características y propiedades del sistema de trazabilidad, esquemas, unidades de recurso trazable, motivador y conductor de la trazabilidad, sistemas de captura de datos. • Tabulación en hoja de cálculo, empleado para la categorización de los artículos y análisis de información. • Se realiza una búsqueda general sobre legislación colombiana e Internacional en páginas web y bases de datos. • Para la revisión de artículos empíricos relacionados con la CSA cárnica, se seleccionó el primer tercio de los artículos encontrados debido a su relevancia, y se analizan los que tienen relación con dicha cadena. 	Se encontraron 227 artículos, de los cuales se descartan nueve de acuerdo a los términos de exclusión. Siendo así, 218 artículos viables, los cuales fueron publicados en 39 revistas, entre los años 1995–2016, de los cuales el 80 % fueron publicados en los últimos seis años (2012-2016), lo cual de muestra la relevancia y actualidad del tema.
Revisión, criterios de selección	<ul style="list-style-type: none"> • Criterios de selección: artículos multidisciplinarios de revisión teórica y empíricos ordenados por relevancia, no se excluyen artículos con respecto a su postura frente a la importancia de la trazabilidad, país o CSA para evitar sesgos. Se excluyen artículos relacionados con estudios químicos, moleculares o de electromagnetismo, análisis de ADN y artículos empíricos con estudios específicos de productos diferentes a alimentos como: madera, acero, hierro, etc. • Selección de cada uno de los artículos para verificar su calidad, procedencia (revista) y disponibilidad. • Lectura general de cada artículo para identificar si es teórico (basado en teorías) o empírico (con un estudio aplicado) y descartar los que no cumplan con los criterios de selección. 	De los 218 artículos seleccionados, 193 son empíricos y veinticinco teóricos.
Extracción de datos	<ul style="list-style-type: none"> • Diligenciamiento de la lista de referencia para los veinticinco artículos teóricos, con datos generales del artículo, objetivo, procedencia, sector, temática principal y secundaria, resultados y datos econométricos de ser el caso. • Se analizan los veinticinco artículos teóricos encontrados y con base en dichos artículos se estudiaron 46 documentos referenciados de forma constante para complementar el marco teórico; tres de los cuales era normativas. • Se diligencian formatos específicos para extraer la información relevante referente a los seis subtemas establecidos (definición de trazabilidad, objetivos, conductores motivacionales, características y propiedades del sistema, elementos para su implementación y contribuciones de artículos empíricos). • Revisión del primer tercio de los artículos empíricos, selección de los documentos relacionados con uno de los dos sectores y análisis de los mismos en los formatos establecidos. 	<p>Revisión de 62 documentos, para el marco conceptual.</p> <p>Del primer tercio de artículos empíricos (61), solo doce tenían relacionados con la cadena de carnes.</p> <p>Se revisaron catorce documentos para información de legislación, tres de los cuales también se utilizaron en la revisión teórica.</p>
Síntesis de datos e informe	<ul style="list-style-type: none"> • Se analiza cada uno de los aportes de los autores en las seis categorías definidas • Se realizó un resumen general de la legislación de trazabilidad • Se elaboraron cuadros comparativos y análisis de legislación y contribuciones de los diferentes a la CS de carne 	Se genera un marco conceptual y teórico común para la CSA.

hace los autores más relevantes para ser consultados cuando se desee desarrollar trabajos de investigación al respecto.

El total de documentos revisados fue de 94; 71 se utilizaron para la elaboración conceptual, doce artículos empíricos para la búsqueda de información relevante al sector de carnes y catorce para

información de legislación, de los cuales, tres normas se utilizaron también para la parte conceptual. La revisión teórica se realizó mediante un análisis sistemático que incluye cuatro pasos secuenciales que se describen en la Tabla I.

En la figura 1, se puede observar la procedencia de los artículos o la ubicación geográfica de los autores, se encontró que los países en los cuales se encuentran los autores que más relevancia le dan al tema son: Estados Unidos, Italia, China, Noruega, Reino Unido, Canadá y España. Sin embargo, no se encontró ningún artículo que referencie a Colombia.

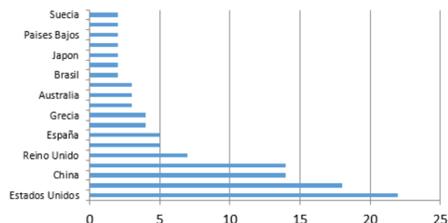


Figura 1. Procedencia de los artículos revisados

A partir de la aplicación de la metodología, se establecieron criterios de los diferentes autores en los seis categorías de análisis, para ello se utilizó la lista de referencias realizada en la hoja de cálculo a modo de base de datos, esto permitió evaluar aspectos generales y comparar entre autores utilizando cuadros específicos dependiendo del tema o categoría a tratar, a continuación se desarrollan las seis categorías de análisis: definición de trazabilidad, objetivos, conductores motivacionales, características y propiedades del sistema, elementos para su implementación y contribuciones de artículos empíricos.

3. Elementos para el diseño de un sistema de trazabilidad

3.1. Definición de trazabilidad

La trazabilidad no es un término trivial y la revisión de la literatura muestra que incluso en las revistas científicas existe confusión e incoherencia [18]. Según Dabbene, *et al.* [5], la definición de trazabilidad ha sido evaluada en artículos desde el 2013, sin llegar a ningún consenso; Badia-Melis, *et al.* [19] Indican que varias definiciones y principios diferentes de la trazabilidad están siendo utilizados, lo que hace el concepto confuso. De igual forma Kher, *et al.* [20] Indica que un estudio realizado con expertos arrojó que existe la necesidad de mejorar la definición de trazabilidad de la cadena alimentaria. Una conclusión similar es establecida por Bosona y Gebresenbet [7], quien determinó que existen limitaciones en todas las definiciones y que se requiere una nueva definición global de trazabilidad, debido a que diversos autores y organizaciones no utilizan claramente términos clave como rastreo y seguimiento, siendo a menudo empleados de forma incoherente e intercambiable creando confusiones.

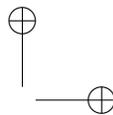
Por su parte Karlsen, *et al.* [1] incitan a la reflexión sobre ¿Por qué tenemos diferentes puntos de vista sobre las definiciones y los principios de trazabilidad?, a lo cual se puede responder a través de dos razonamientos principales: primero, la trazabilidad es un campo teórico relativamente nuevo que surgió debido a necesidades diversas y solo cuando fue visto con una necesidad urgente y apremiante para mitigar riesgos, fue cuando investigadores y autores empezaron a generar consensos; por otro lado, la trazabilidad se ha desarrollado en diferentes direcciones y en diversos campos científicos, lo cual ha derivado en el desarrollo de conceptos teóricos de acuerdo a las característi-

Tabla II. Análisis de definiciones de trazabilidad dadas por diferentes autores

Fuente	¿Qué es? Característica principal de la definición	¿De qué?	¿Cómo lo realiza?	¿En qué parte de la cadena se realiza?	¿Cuál es el objetivo?	¿Cuándo?
ISO 8402-1994 [22]	Capacidad para rastrear historia, aplicación o ubicación	Una entidad	Por medio de identificaciones registradas	-	-	-
ISO 9000-2000 [22]	Capacidad para rastrear historia, aplicación o ubicación	Una entidad	-	-	-	-
ISO 22005-2009 [23]	Capacidad de seguir	un alimento para consumo humano o un alimento para animales	-	En las etapa(s) especificada(s) de producción, procesamiento y distribución.	-	-
Reglamento de la Unión Europea (178/2002) [21]	La capacidad de rastrear y seguir	Un alimento, un pienso, un animal o una sustancia destinada a ser incorporada en un alimento	-	Todas las etapas de producción, transformación y distribución	-	-
Comisión Codex Alimentario- CAC [24]	La capacidad de seguir el desplazamiento	Un alimento	Por medio de papel o medio electrónico	A través de una o varias etapas especificadas de su producción, transformación y distribución	-	-
Moe (1998) [25]	Capacidad de rastrear	un lote de productos	-	Totalidad o parte de una cadena de producción desde la cosecha hasta el transporte, almacenamiento, procesamiento, distribución y venta	-	-
Olsen & Borit (2013) [18]	Capacidad de acceder a cualquiera o a toda la información	Relativa a lo que es considerado	Por medio de identificaciones registradas	A lo largo de toda la cadena	-	-
Bosona & Gebresenbet (2013) [7]	Parte de la gestión de la logística que captura, almacena y transmite información adecuada; realizando seguimiento y rastreo	Un alimento, pienso, un animal o una sustancia productora de alimentos	-	En todas las etapas de la CS de alimentos	Para el control de seguridad y calidad	En cualquier momento requerido.
Dabbene, Gay, & Tortia (2014) [5]	Capacidad de garantizar seguimiento y rastreo	Los productos en movimiento	-	a lo largo de la CS de alimentos	-	-
Smith <i>et al.</i> (2005) [6]	Rastreo físico	del producto alimenticio	Desarrollando un registro de información	-	-	-

cas y variables particulares que maneja cada campo.

Autores como [1], [5]–[7], [11], [16], [18], han encontrado que existen diferentes definiciones de trazabilidad y esto no permite la generación de un marco común para su implementación. Sin embargo, todos concuerdan en que las definiciones establecidas por la ISO y por el reglamento 178/2002 de la Unión Europea [21] son las más divulgadas. De acuerdo con lo anterior, es necesario generar una definición más amplia que contemple todos los aspectos necesarios para facilitar su implementación.



En la Tabla II, se puede identificar una serie de definiciones de amplia utilización y los principales aspectos a los que hace referencia, con la cual se puede tener un panorama amplio de los elementos que debe contener la definición estándar de trazabilidad.

Según Aung Min y Chang Seok [11] la definición genérica de trazabilidad se encuentra en las normas ISO y la más completa en Bosona y Gebresenbet [5], de igual forma Olsen y Aschan [26], indican que la definición establecida por ISO es la más precisa por ser la única que describe cómo se puede lograr. Por su parte, Olsen y Borit [18] indican que la definición establecida por Reglamento 178-2002 de la UE es ampliamente usada en artículos científicos, debido a que define lo que se debe rastrear, seguir y en dónde. Sin embargo, la definición no indica el cómo o qué tipo de propiedades son relevantes trazar.

Por otro lado Karlsen, Dreyer, Olsen y Elvevoll [1] muestra que no solo hay diferencias en el concepto de trazabilidad utilizado para alimentos, sino que esto también ocurre en otras industrias. Lo cual hace que el término trazabilidad sea más confuso. Sin embargo, encontró que varias de esas definiciones comparten características comunes de uso frecuente tales como: seguimiento, localización, rastreo y entidad; encontrándose las principales diferencias al hacer referencia a la entidad que se debe trazar.

Para Schwägele [16] la trazabilidad debe cubrir toda la CS, por lo cual debe tener dos acciones claves: seguimiento y rastreo; donde el seguimiento (tracking) es la capacidad de seguir el camino de un artículo a medida que avanza corriente abajo a través de la CS desde el principio hasta el final y el rastreo (tracing) capacidad de identificar el origen de un elemento a través de los registros, aguas arriba en la CS. Lo cual debe estar combinado con métodos de análisis de materiales y sistemas de tecnología de la información.

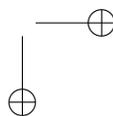
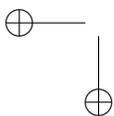
Algo que no se puede pasar por alto es que la trazabilidad no es el producto, ni la información del proceso en sí, es una herramienta que hace que sea posible encontrar esta información de nuevo en una fecha posterior [27], por lo cual la trazabilidad debe tener un claro enfoque en el que se incluya su análisis para la toma de decisión.

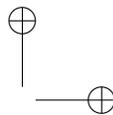
De acuerdo con lo anterior, basado en las definiciones de los diferentes autores, una definición que incluya todos los parámetros en los cuales se descomponen las definiciones anteriores para una CSA podría ser:

Capacidad de rastrear y seguir un alimento y su unidad trazable previamente identificada, por medio de registros físicos o digitales a lo largo de toda la CS para el control y localización en cualquier momento a lo largo del ciclo de vida de dicha unidad, para la toma de decisiones .

3.2. Objetivos de un sistema de trazabilidad

Entre los artículos más destacados en la literatura se observa el de Hobbs [28], quien recopila los principales objetivos de la trazabilidad; así como Bertolini, *et al.* [29] enfocados en la industria agroalimentaria y mencionan que el objetivo de la trazabilidad es identificar los actores relacionados en el sistema y rastrear los flujos relevantes identificando los materiales, procesos y opera-





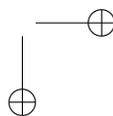
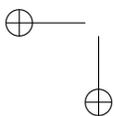
ciones de gestión. Por su parte Costa, *et al.* [30] indica que los consumidores ven la trazabilidad como una herramienta para asegurar aspectos relacionados con el procesamiento y el uso de estrategias correctas, mientras que para los productores significa mayor control de seguridad, apertura en mercados extranjeros. Además, debido precisamente a la globalización, el aumento y la difusión de productos alimenticios fraudulentos y la falsificación se ha convertido en un problema para la industria y pone en riesgo a los consumidores [31].

Para Bosona y Gebresenbet [7], la trazabilidad tiene cuatro objetivos específicos: cumplir con las normas y la legislación, garantizar la seguridad y calidad de los alimentos, satisfacer las necesidades sociales y de los stakeholders y generar beneficios económicos, tecnológicos y científicos. Mientras que Aung Min y Chang Seok [11] y Golan y Krissoff [9] establecen que las empresas tienen tres objetivos principales: mejorar la gestión de la oferta, facilitar el rastreo para la seguridad y calidad y contar con un enfoque diferenciador. Por lo cual asociados a estos objetivos se esperan beneficios que se traduzcan en ingresos para la empresa o seguridad para la sociedad en el caso del gobierno. Otros objetivos que destacan diferentes autores son: contar con una fuente de ventajas competitivas [32], facilitar la recuperación rápida y eficaz de productos, así como determinar y liquidar los deterioros [10], comunicar información de trazabilidad a los consumidores y otras partes interesadas [7], lograr una agricultura precisa, basada en datos útiles que orienten una agricultura inteligente [33] y optimizar la planificación y programación de la producción [1].

Se debe tener en cuenta que la adopción proactiva de mecanismos de trazabilidad durante todo el ciclo de vida del producto es una ventaja estratégica que puede reducir en gran medida los costos en caso de retiro de productos, refuerza la confianza de los clientes y consumidores, al igual que la integridad de los productos y marca de la empresa [6]. Además, los beneficios de los sistemas de trazabilidad para la gestión del suministro son mayores cuanto mayor sea la coordinación a lo largo de la CS [9]. Pero se debe tener en cuenta que existen programas de trazabilidad diseñados para abarcar la totalidad del ciclo de vida o alguna parte [34], por ende, es necesario determinar cuál es el más eficiente para los objetivos que se quieren alcanzar para la CS en la cual se implementará el sistema.

Kher, *et al.* [20] realizaron un estudio con 38 expertos y concluyó que los beneficios de la implementación de sistemas de trazabilidad superan cualquier costo o trabajo adicional que se tenga, de ahí la importancia de implementarla, lo cual es corroborado con el estudio de [35], quienes encontraron que los beneficios de mercado y operacionales se relacionaron positivamente con la implementación del sistema de trazabilidad. Sin embargo, Mattevi y Jones [36] indican que en Reino Unido los objetivos de retiros rápidos y mejora de la seguridad se cumple, pero un sistema de trazabilidad no reduce la probabilidad de retiros.

Con respecto a la CSA, la trazabilidad ha tomado un papel preponderante, debido al efecto directo y masivo que tiene sobre la sociedad, la economía y el medio ambiente, ya que con ella se puede controlar la seguridad, inocuidad y procedencia de los alimentos; por ejemplo, en caso de contaminación de los productos con elementos nocivos o el desconocimiento de la procedencia del producto que se encuentre en las vitrinas comerciales, como los recientes ocurridos en Colombia y reportados por el INVIMA en comunicados oficiales del 15 de octubre de 2016, de un lote de lominos de atún enlatado con niveles de mercurio superiores a los permitidos y del 24 de enero de



2017, al incautar carne de res en el Tolima por no contar con la documentación de procedencia (rastreo). Es por ello que se ha convertido en un reto importante en la CSA y un objetivo de las naciones y organizaciones a nivel mundial. Por su parte, para los gobiernos el principal beneficio con la implementación de la trazabilidad es garantizar la salud pública de sus habitantes, lo cual permite tener una sociedad sana, al mismo tiempo que permite desalentar el oportunismo de personas que buscan realizar fraude y adulteración [37].

Es conocido que muchos países cuentan con estrictas normas que exigen implementar sistemas de trazabilidad, por lo cual algunas organizaciones lo implementan únicamente en busca del cumplimiento de estas obligaciones, debido a que no han evidenciado el potencial de oportunidades que tiene. Por lo cual, es necesario que las organizaciones identifiquen los beneficios que ofrece para la toma de decisiones tanto operativas como estratégicas el contar con la información que ofrece el sistema de trazabilidad. Lo cual se puede evidenciar en el caso mostrado por Saltini, Akkerman y Frosch [38], quien indica que contar con un sistema de trazabilidad que reconozca el intercambio de datos entre la CSA, permitirá que eslabones posteriores cuenten con información respecto a técnicas de cultivo y siembra, que le permitirá potenciar los procesos de elaboración de los productos finales.

3.3. Principales motivadores de la trazabilidad

Se podría decir que los principales motivadores tienen un enfoque regulatorio, de calidad, social y económico [39], [7]. Sin embargo, la trazabilidad no solo debe considerarse como una forma de cumplir con la legislación, sino que debe ser vista con un interés propio en términos de responsabilidad del producto y encontrar formas viables de aplicar la normativa [40]. En la Tabla III se identifican los principales conductores motivacionales mencionados por autores como Golan y Krissoff [9], Aung Min y Chang Seok [11], Dabbene, Gay y Tortia [5], Bosona y Gebresenbet [7], se puede evidenciar que hay conductores que se afectan mutuamente, tal como lo plantea Karlsen, Dreyer, Olsen y Elvevoll [1]. De igual forma en la Tabla III, se puede ver que la legislación y la seguridad alimentaria son los principales conductores de la trazabilidad; varios de los autores establecen que hay una relación directa entre ambos, esta relación se debe principalmente a que los gobiernos por medio de la legislación pretenden mantener niveles de seguridad alimentaria, resolver disputas de propiedad y evitar fraudes o falsificaciones que pongan en riesgo la salud pública o afecten la economía. Sin embargo, tal como ocurrió en Canadá, la iniciativa de las empresas por garantizar la inocuidad de carne, llevó a que el gobierno basado en esas iniciativas diseñara la legislación [41], lo cual demuestra la importancia de las iniciativas proactivas de la industria.

Otros autores que resaltan conductores para la implementación de la trazabilidad son: Rodríguez-Ramírez *et al.* [42], quienes hacen énfasis en los principales conductores de trazabilidad en cadenas de alimentos: la seguridad alimentaria, la gestión de riesgos y de autenticación para evitar fraudes en etiquetado y certificar el origen de los alimentos. Por su parte Agrimonti, *et al.* [43], introducen el concepto de la certificación de las marcas DOP (Denominación de Origen Protegida) e IGP (Indicación Geográfica Protegida), para evitar prácticas fraudulentas que dañen el mercado. Por último, Crandall, *et al.* [3] incluyen temas relacionados con enfermedades de animales, seguridad de los alimentos, disputas sobre la propiedad y adulteraciones.

Tabla III. Identificación de los principales conductores motivacionales de la trazabilidad

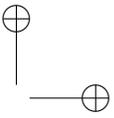
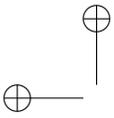
Conductor	Autor que menciona el conductor				
	[11]	[5]	[7]	[1]	[9]
Legislación	x	x	x	x	
Seguridad, alarmas alimentarias por contaminación del producto, retiro del mercado de producto (por agencias gubernamentales o privados), fraude o falsificación, bioterrorismo	x	x	x	x	x
Aseguramiento de calidad	x	x			x
Certificaciones				x	x
Ventaja competitiva / diferenciación de protección de marca	x			x	
Comercio globalizado	x				
Comunicación de la cadena	x			x	
Eficiencia de procesos en la CS (que influye en los costos y en los precios)	x		x		
Reducción de costos	x				
Identidad de marca		x			
Disputas de propiedad (robos de animales)				x	
Preocupaciones sociales (hábitos nutricionales, identificación de productos genéticamente modificados, valores añadidos)				x	x
Financiación de los gobiernos para promover sistemas de trazabilidad				x	
Preocupación tecnológica				x	
Preocupación por permanecer en el mercado y poder económico				x	
Sostenibilidad					x
Optimización producción					x

3.4. Características y propiedades del sistema de trazabilidad

Los factores a tener en cuenta para la preparación y planeación de un sistema de trazabilidad, son varios, y dependen en gran medida del entorno [1]. Las características de un buen sistema de trazabilidad varían de acuerdo al objetivo para el cual se diseña; según Golan y Krissoff [9], Bosona y Gebresenbet [7] y Dabbene, *et al.* [5], el diseño de un sistema de trazabilidad debe tener en cuenta las siguientes características:

- **Amplitud:** cantidad de información o atributos recopilados conectados a una unidad de rastreo.
- **Profundidad:** se define como la información hacia arriba y hacia abajo que es relevante para que pase entre cada eslabón.
- **Precisión:** es el grado de seguridad que le permite al sistema identificar un movimiento o característica particular de un producto. La precisión se determina por la unidad trazable utilizada en el sistema y la tasa de error aceptable.
- **Acceso:** la velocidad con que la información puede ser comunicada en la cadena
- **Fiabilidad de la identificación de la unidad de trazado:** dicha unidad trazable es el elemento clave para que se pueda realizar el seguimiento y rastreo de la información asociada a él, por lo tanto, se requiere su identificación clara y precisa.

La medición de estas características nos indica el rendimiento del sistema de trazabilidad [7], debido a que el flujo de información mejora la integración de las actividades de logística y mejora la



gestión de la CS. Sin embargo, varios de los costos de la trazabilidad están determinados por dichas características del sistema, cual mayor sean cada uno de las seis características mayor será el costo, por ende deben ser cuidadosamente definidas.

De igual forma, el mantenimiento de registros es un aspecto esencial de la trazabilidad y esto implica un costo, los datos vinculados al sistema de trazabilidad tienen que ser precisos, recogidos y almacenados de forma rápida y al menor costo posible [16]; además, se debe contar con métodos fiables para la identificación y autenticación de la unidad que se está trazando, lo cual permitirá contar con información rápida e inequívoca [42].

Sumado a lo anterior, el sistema debe tener las siguientes propiedades [18]:

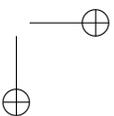
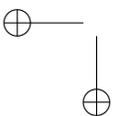
- Unidad de recurso trazable, en donde los Ingredientes y materias primas deben ser agrupados en unidades con propiedades similares.
- Asignación de identificadores a las unidades trazables.
- Registro de propiedades de producto o proceso, ya sea de forma directa o indirecta, pero siempre vinculadas a los identificadores establecidos.
- Mecanismo de acceso a la información.

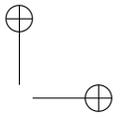
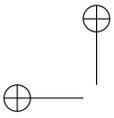
Estas propiedades permiten que el sistema pueda ser capaz de proporcionar acceso a la información sobre las características del producto en todos los eslabones de la cadena, facilitando el rastreo y seguimiento basado en grabaciones sistemáticas intercambiables con un mecanismo de identificación de la unidad trazable; es por ello que esto, unido con una buena definición del alcance de cada una de las características del sistema, permitirán contar con una herramienta eficiente para la toma de decisiones. Por otro lado, según [44] existen dos tipos de arquitecturas que definen la estructura del sistema de trazabilidad, la primera es de un paso adelante-un paso atrás, con la cual debe saber dónde están los productos alimenticios que utiliza proviene de y hacia dónde van (one-step), este tipo de estructura es aplicable incluso con el manejo de datos en papel; la segunda estructura se basa en compartir los datos con agentes de toda la cadena (Event-Oriented Approach).

3.4.1. Unidad de recurso trazable (TRU)

Kim, *et al.* [45] al desarrollar su modelo de trazabilidad, incorporaron el término unidad de recursos trazable (TRU) como la entidad identificada de forma única para ser rastreada; esta definición es actualmente utilizada para establecer “el que” se va a trazar a lo largo de la CS. Posteriormente Moe [25] señala que la trazabilidad se basa en la identificación única de los TRU, y propuso el concepto de unidad de recursos trazable (TRU) para la noción de lote, donde lote es “el conjunto de unidades de un alimento que se han producido, procesado o envasado en circunstancias similares”; dicha definición sigue siendo utilizada y es ratificada por autores como Dabbene, *et al.* [5] y Karlsen, *et al.* [1].

La identificación de los TRU se logra rompiendo el flujo del producto en lotes, o cualquier otra unidad discreta definida sobre un proceso común o atributos de contenido. Las empresas pueden





elegir entre una gama infinita de tamaños y suelen considerar diferentes factores para su determinación, ya que el tamaño varían entre las industrias y hasta dentro de la misma empresa para productos entrantes y salientes. Es por ello que es determinante definir claramente el TRU que se va a utilizar, ya que las grandes unidades de análisis dan lugar a una mala precisión, por ende, el sistema de trazabilidad puede fallar [46], pero unidades pequeñas puede resultar costoso. Varios ejemplos de TRU pueden encontrarse en el artículo de Dabbene, *et al.* [5] quienes realizan un resumen de diseños de modelización y optimización de sistemas de trazabilidad para varios alimentos. De igual forma, en la industria se suele utilizar el término unidad de envío (para la unidad de entrega); unidad logística (para transporte y distribución), unidad de comercio (unidad de medida en la que se negocia) y unidad de consumo (medida en la que se vende al consumidor final) [44].

3.4.2. Esquemas de trazabilidad

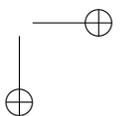
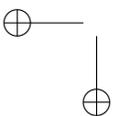
De acuerdo con las definiciones, la trazabilidad encierra conceptos de seguimiento y rastreo en todas las etapas de la CSA, con esto presente, Moe [25] propone la existencia de tres tipos de trazabilidad, las cuales dependen del punto donde se encuentre el TRU en la CSA. Las tipologías son: trazabilidad de rastreo a los proveedores, trazabilidad interna o de proceso y la trazabilidad de seguimiento hacia los clientes. Por su parte Bellon-Maurel, *et al.* [47] dividen la trazabilidad en: interna y externa, donde la trazabilidad externa hace referencia a lo que ocurre a lo largo de la CSA o parte de la misma y la trazabilidad interna es la que ocurre cuando el TRU está en las instalaciones de una empresa. Teniendo en cuenta ambas clasificaciones, se plantea el siguiente esquema: trazabilidad interna y trazabilidad externa, esta última comprende la trazabilidad de rastreo a los proveedores y trazabilidad de seguimiento hacia los clientes.

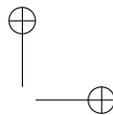
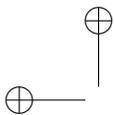
Según Folinas, *et al.* [48], los esquemas de trazabilidad tanto interna como externa pueden ser de tipo logístico o cualitativo; donde el logístico sigue solo el movimiento físico del producto y el cualitativo asocia información relativa a la calidad del alimento y la seguridad del consumidor; además, Hsio [49] reafirma la necesidad de la trazabilidad cualitativa, dado que no son solo una mercancía, sino que tienen cualidades que son afectadas por el tiempo y la temperatura; por lo cual es necesario una mezcla equilibrada de los dos esquemas, a fin de contar con un sistema de trazabilidad útil para todos los eslabones de la cadena.

Una definición adecuada del diseño del sistema de trazabilidad depende de factores como: la estructura de la CSA, la relación entre socios o eslabones, la capacidad (humano o tecnológico) de la gestión de las transacciones y los procesos de calidad y producción. Según Jansen-Vullers, *et al.* [32], es clave no pasar por alto que las características y propiedades de la trazabilidad podrían aplicar en cualquier cadena o sector, no obstante, requiere un marco conceptual común específico para las CSA.

3.5. Elementos para la implementación de sistemas de trazabilidad

Mancini y Giacomini [50], mencionan dos tipos de beneficios de la implementación de un sistema de trazabilidad, uno interno, en el que el agente obtiene un alto nivel de organización en la compañía y uno externo, en el que su implementación permite asegurar el cumplimiento de requerimientos específicos, la identificación de la marca u origen y la obtención de certificaciones de





calidad.

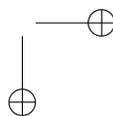
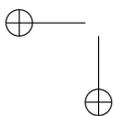
De acuerdo con Bosona y Gebresenbet [7], los principales problemas para la implementación de un sistema de trazabilidad se pueden clasificar en cinco grupos: Limitación de recursos, de información (falta de información completa, precisa, oportuna y de fácil acceso, además de la incertidumbre asociada a alimentos frescos) y de capacidad (técnica y de personal capacitado). Estandarización (estandarización de sistemas de trazabilidad, uniformidad de datos, integración de eslabones, protección datos). Resistencia de los actores de la cadena (resistencia inicial, falta de voluntad y falta de claridad de los beneficios).

Otros problemas que enfrentan los países en desarrollo son la mala regulación, el uso de productos químicos y contaminantes, falta de aprendizaje en trazabilidad, lo cual restringe a los cultivadores y procesadores. Además, los sistemas de trazabilidad son críticamente dependientes de la captura de información, por lo cual se necesitan mecanismos robustos para facilitar su recogida y autenticación, de manera que pueda ser actualizada y compartida a través de la CSA [11]. Por lo cual si no existe una correcta comunicación entre los actores de la cadena, al igual que acuerdos mínimos de manejo de información la trazabilidad no tendrá éxito.

La limitación de la capacidad es mencionada por Liao, Chang, y Chang [51], quienes señalan que la introducción de sistemas de trazabilidad en países en desarrollo no es fácil, debido a las limitaciones técnicas y la falta de conciencia, esto indica que los gobiernos al tratar de introducir un sistema de trazabilidad deben incluir programas de capacitación y educación eficaces para aumentar la capacidad técnica y el nivel de conciencia de los participantes. Debido a la falta de educación y capacitación la adopción en la agricultura de precisión es relativamente lento, allí también falta de apoyo para la investigación, el alto costo del capital humano y de consultoría son algunas de las principales limitaciones fundamentales [52].

La trazabilidad contribuye a mejorar la confianza de los consumidores. Sin embargo, para la implementación debe tenerse en cuenta que pueden existir diferencias transnacionales y culturales. Van, *et al* [53] indican que en Reino Unido, Escandinavia y Alemania, la seguridad alimentaria y la ética tienen prioridades, mientras que en los países del sur de Europa como Francia, España, Italia y Grecia la calidad de los alimentos es más importante, por su parte en Estados Unidos ha existido preocupación por el impacto de las radiaciones electromagnéticas y el uso de tecnologías RFID utilizados en la trazabilidad.

Un factor importante que se debe tener en cuenta al implementar sistemas de trazabilidad, es que los beneficios ofrecidos deben ser distribuidos a los largo de toda la CSA, lo que implica a su vez que los costos de la implementación no deben ser una carga para eslabones primarios que cuentan con menos capacidad económica, tecnológica y de capacitación. Si no se equilibra la carga de costo de implementación y beneficios obtenidos, los sistemas de trazabilidad no serán viables. Así mismo, las empresas deben tener programas de gestión en caso de un retiro del alimento, en las cuales se incluyan procedimientos y simulacros. Según Chilton [54], las empresas deben ser capaces de realizar un seguimiento al menos del 98 % del lote seleccionado en un período de 4 horas.



3.5.1. Sistemas de captura para gestión de datos del sistema de trazabilidad

Giacomini C. [55] resalta la influencia de los sistemas de captura de información en el desempeño de la CS y su relación con el desempeño del sistema de trazabilidad, mientras que [56] clasifica la información necesaria para un sistema de trazabilidad en la CSA. Se debe tener en cuenta que capturar la información correcta es vital para la operación efectiva del sistema de trazabilidad [57] y los sistemas de información son indispensables para los procesos logísticos de las CSA [58]. Por lo cual la interconexión de la trazabilidad con el sistema de control y documentación es la manera correcta de mejorar la percepción del cliente con relación a la calidad y seguridad de los alimentos [25]. Además, un sistema de trazabilidad bien diseñado en base a tecnologías avanzadas puede mejorar la eficiencia de la CS generando valor y convirtiéndose en una inversión rentable [59]. Según Scholten, *et al.* [44] hay tres tecnologías que permiten el desarrollo de sistemas de trazabilidad, los cuales son la identificación automática y captura de datos (AIDC), se refiere a métodos automáticos de identificación y recogida de datos (RFID, OCR, códigos de barras, etc.); la tecnología de conectividad y la inteligencia empresarial, que hace referencia a la minería de datos, procesamiento analítico, evaluación comparativa, entre otros.

Schwägele [16] señala que el registro de datos automatizado es la única opción posible para un sistema de trazabilidad confiable a lo largo de la CSA. No obstante, en países en desarrollo donde los pequeños agricultores y productores no tienen capacidad económica, técnica, ni subvención de los gobiernos para implementar sistemas de trazabilidad, el desarrollo e implementación es limitado. Es por ello que se podría pensar en sistemas de trazabilidad básicos como el propuesto por Manos y Manikas [60] implementando automatización de etiquetado con tecnologías de lectura mecánica y la introducción de tecnologías basadas en Internet como una solución de bajo costo.

En la literatura se encuentran diferentes herramientas para la gestión de la información en los sistemas de trazabilidad; por ejemplo: [61] menciona que las más usadas son los códigos alfanuméricos, el código de barras y la identificación por radio frecuencia (RFID); donde la tecnología RFID, asigna un código único a un producto para usar en el empaque, y pueden ser leídos por dispositivos desde su ubicación en el almacén; por estos beneficios y otros en comparación con las otras tecnologías, RFID es actualmente la tecnología más recomendada [62]; Landt [63] por su parte realiza una revisión de la historia de esta tecnología, describiendo su funcionamiento, el inicio de la idea y sus aplicaciones al pasar de los años y Aillo [59] indica que si bien los costos de la tecnología RFID siguen siendo uno de los principales obstáculos en la agricultura, el punto clave es determinar el nivel de granularidad óptimo del sistema que maximice la ganancia de toda la cadena.

Debido a que la trazabilidad va ligada a la tecnología y sus avances, [19] realiza una revisión de los avances tecnológicos de los últimos años, entre los cuales se incluye: RFID, NCF (Near field communication), DataMatrix, análisis isotópico, quimiometría NIRS y códigos de barras genéticos a través del ADN, sin embargo, concluye que RFID es la tecnología predominante debido a su eficiencia. Por su parte, los trabajos de [56] y [64] analizaron la implementación de RFID, evaluándolo los requerimientos de la trazabilidad e identificando las ventajas estratégicas que esta aporta en diferentes industrias [65]. Algunos de los beneficios asociados al uso de la tecnología RFID son: la reducción de las pérdidas de inventario, el crecimiento en la eficiencia y velocidad de los procesos, y el aumento de la exactitud [66], reducción de tiempos y cuellos de botella en inventarios [67] y

la disminución de costos en distribución [68].

De acuerdo con Bosona y Gebresenbet [7], la clasificación de las tecnológicas aplicadas a los sistemas de trazabilidad en CSA se puede dividir en: Identificación del producto (código barras, RFID). Identificación por análisis genético (pruebas de ADN). Medición de la calidad y medida de seguridad (infrarrojos, resonancia magnética, equipos de análisis químico, dispositivos de envase inteligente para el alimento, sensores manométricos). Equipos de Monitoreo Ambiental (sensores para medición del entorno). Captura de datos Geo-Espaciales (GIS, RS, GPS). Intercambio de datos (EDI, XML) y Desarrollo de software (QualTrace, EQM, Alimentos Trak). La selección de cada una de estas tecnológicas y la mezcla entre ellas para optimizar los sistemas de trazabilidad depende del alimento y la unidad trazable. Según Herrera Ramírez y Orjuela Castro [69] la decisión de cambios e implementación de tecnologías de trazabilidad en la CSA, requiere de modelos orientados al análisis integral de las relaciones y flujos entre los agentes de la cadena.

Para la identificación de alimento o la unidad trazable, se tienen dos mecanismos principales. Primero la *identificación primaria*, realizada en el primer eslabón de la cadena y para el caso de los alimentos va asociado a la identificación del animal o vegetal. Luego se tiene la *identificación secundaria* realizada por medio de instrumentos tecnológicos, en la cual se marca el alimento que llega a un eslabón, así, de forma automática la unidad trazable con datos y características adjuntas es identificada para que durante su paso por ese agente (trazabilidad interna) se le adicione información. Los principales instrumentos utilizados para la identificación secundaria del alimento son: códigos alfanuméricos, código de barras, radiofrecuencia RFID, código data Matrix, código Quick Response (QR); estos sistemas ópticos se han desplegado con éxito y sus aplicaciones a diferentes productos están en constante aumento [69].

En los eslabones primarios donde el acceso a la tecnología es limitado, se suele llevar registros de identificación y seguimiento en papel. Sin embargo, esto no permite una vinculación rápida de los datos, ni una integración de los mismos a lo largo de la CS, por ello el diseño del sistema debe ser cuidadoso, basado en acuerdos con los cuales se determine cuál es la información relevante que pasará de eslabón en eslabón. De igual forma, la trazabilidad puede facilitar el control en todos los procesos logísticos; por ello juega un papel importante en la integración de la CSA, como gestor de datos e instrumento de información. Alfaro *et al.* [70] combinan la integración y la trazabilidad en la relación empresa-proveedor de una cadena agroindustrial, mientras [71] presenta la interacción entre la trazabilidad e integración en la red de suministro.

Las tecnologías de identificación primaria sirven a su vez para realizar verificación de la unidad trazable en cualquier punto de la CSA, lo cual potencia la velocidad y precisión de la trazabilidad [10]. Otro método utilizado para el análisis de alimentos, es la espectrometría de masas para el análisis de proteínas, esta técnica se desarrolló para autenticación de alimentos y se ha concentrado en la detección de microorganismos que pueden causar deterioro de los alimentos o peligros para la salud humana y en la evaluación de la seguridad de los componentes de los alimentos. También se ha utilizado para detectar alimentos modificados genéticamente [72].

En los últimos años, la identificación por radiofrecuencia (RFID) ha recibido una importante cobertura por los diferentes *stakeholders*, gran parte del impulso para la utilización de esta tecnología

surgió por el interés de Wal-Mart (EE.UU.), Tesco (Reino Unido), el Departamento de Defensa (EE.UU.) y la Food and Drug Administration (FDA) de los EE.UU [4]. En comparación con el método tradicional de código de barras, RFID permite una “etiqueta inteligente” asignado a cada producto individual para ser leído en cualquier posición sin contacto físico con los lectores [44]. En la actualidad el mayor inconveniente del uso de las etiquetas RFID es su alto costo, en comparación con los códigos de barras.

Es evidente que existe una gran variedad de métodos y técnicas de identificación y seguimiento de las unidades trazables y que continuarán evolucionando. Sin embargo, es importante seleccionar métodos acordes con las necesidades de la organización y los acuerdos o estándares de la CS. Además, lo más relevante es contar con métodos fiables, que permiten obtener información rápida e inequívoca [42], [16].

4. Legislación internacional y colombiana

4.1. Legislación internacional

Las legislaciones se identifican como importantes fuerzas motrices de la trazabilidad [7], ya que con los brotes sanitarios con repercusión mundial (EEB en 1996, la dioxina en piensos en 1999, fiebre aftosa en 2001, la gripe aviar en 2003, las dioxinas en la carne de cerdo en 2008, gripe porcina en 2009) obligaron a que varios países desarrollaron e implementaron requisitos legales en materia de trazabilidad y las autoridades de control definieron métodos para vigilar los productos alimenticios inseguros para ser eliminados rápidamente del mercado. Esto se debe a que la legislación es un conductor que tiene como fin proteger o incentivar conductas en una sociedad; dichas acciones que la norma pretende implementar, con el tiempo son adaptadas por las diferentes partes y dejan de ser un mecanismo de presión normativo, debido a que se logra conciencia en la sociedad y es esta quien exige su cumplimiento.

La legislación por su carácter normativo y obligatorio, puede acelerar la implementación de mecanismos de trazabilidad. Sin embargo, los gobiernos deben ser cuidadosos en su formulación y seguimiento, debido a que se pueden generar dos problemáticas: Muchas compañías pueden implementar sistemas de trazabilidad únicamente para cumplir con cuestiones reglamentarias [7] y; surge cuando el Gobierno al reglamentar la trazabilidad genera ineficiencias en los sistemas de trazabilidad privados existentes, al imponer un sistema centralizado poco flexible, se obliga a las empresas (proactivas) a realizar ajustes en sus sistemas o crear técnicas paralelas para responder a las exigencias del gobierno [11].

Se debe tener en cuenta que las normatividades que se diseñen o implementen en un país, deben estimular a las empresas a reforzar sus sistemas de trazabilidad con exigencias tales como el retiro de productos en lapsos determinados y multas o cierres de plantas por distribución de alimentos no seguros, estos costos incentivan la implementación de los sistemas de trazabilidad. Sin embargo, el gobierno debe dar libertad a las empresas sobre la disposición de los procesos de eliminación de los alimentos inseguros, ya que así cada compañía, de acuerdo a sus capacidades y herramientas, podrá generar procesos eficientes, pero controlados gubernamentalmente [10].

Tabla IV. Principal normatividad o legislación sobre trazabilidad en diferentes países

País	Legislación	Entrada en vigor	Descripción general
Unión Europea	Ley general de alimentos UE 178/2002 [21]	Enero de 2005	Sistemas de etiquetado de productos alimenticios. Trazabilidad obligatoria para todos los alimentos y piensos que se venden en países de la Unión Europea. Establece que la trazabilidad ha de extenderse también a cada ingrediente de la comida
Estados Unidos	Ley de Bioterrorismo de 2002 [73]	Junio de 2002	Establece que la persona que fabrica, procesa, empaca, transporta, distribuye, recibe, posee o importa alimentos a Estados Unidos, tiene la responsabilidad de establecer y mantener registros
Estados Unidos	Ley de Modernización de Seguridad Alimentaria de la FDA (FSMA) [74]	Enero de 2011	Establece un nuevo sistema de supervisión de la inocuidad de los alimentos que se centre en aplicar de forma integral los mejores recursos científicos disponibles para prevenir los problemas que pueden causar enfermedades. Considera el sistema alimentario en su totalidad y por tanto el concepto de responsabilidad de todos sus participantes de la CS Busca garantizar la seguridad de oferta de alimentos importados y nacionales, centrándose en la prevención de la contaminación.
Influencia mundial	Familia ISO 9000 -ISO 22000 [23]	ISO 9001(2005) 22000:2005	Establece requisitos especificados para un sistema de gestión de seguridad alimentaria de una organización en la cadena alimentaria, con el fin que demuestre su capacidad para controlar los peligros de inocuidad. Estos estándares incluyen los métodos de análisis de los riesgos alimentarios de HACCP y el enfoque del sistema de gestión de la norma ISO 9001
Influencia mundial	Codex alimentario CAC [24]	2003	Armoniza normas alimentarias internacionales, directrices y códigos de práctica para proteger la salud de los consumidores y asegurar prácticas equitativas en el comercio alimentario.
Normas comerciales	GLOBALGAP, BRC, IFS, SQF [75]		Normas privadas comerciales avaladas por la Global Food Safety Initiative(GFSI), dichas normas requieren de la certificación de tercera parte y son en muchos casos un requisito para la compra del producto. Tienen como base sistemas de trazabilidad y análisis de los riesgos alimentarios de HACCP

Según Aung Min y Chang Seok [11], los esfuerzos legislativos para exigir la trazabilidad de los alimentos se han dado principalmente en la Unión Europea y Estados Unidos. Para el caso de Europa, desde el 2005 los sistemas de trazabilidad de los alimentos son legalmente obligatorios. De otra parte, se tiene normas o esquemas normativos de influencia mundial que son de carácter voluntario, pero debido a su alcance y la influencia de sus promotores, sirven como guía para la implementación de sistemas de trazabilidad y generar beneficios, a la vez que permitan el cumplimiento de los requisitos legales tanto del país donde se origina dicho esquema, como de países con potencial de exportación. Entre los principales esquemas normativos se tienen: GLOBALGAP (Good Agricultural Practices), BRC (British Retail Consortium), IFS (International Food standard), SQF Code (Safe Quality Food) y la FSC 22000. De acuerdo con Smith, *et al.* [34], en los mercados donde la trazabilidad se convierte en norma obligatoria, se pagan precios más altos por los productos, por lo cual para proteger la inversión de las empresas locales, se exige a proveedores de alimentos importados el rastreo desde origen y cumplir con los mismos requisitos que las empresas nacionales. Por lo cual Borit [2] indica que la trazabilidad fue elegida como herramienta de gestión para salvaguardar la seguridad de las personas y los reclamos relacionados con seguridad del producto. En la Tabla IV se sintetiza la principal legislación sobre trazabilidad a nivel mundial.

4.2. Legislación colombiana

Para el caso de Colombia, la reglamentación en torno a la trazabilidad se ha generado ligada al sector agroindustrial de animales y sus derivados para consumo humano, tal como se puede identificar en la Tabla V. Sin embargo, es de resaltar que a la fecha, la implementación del sistema

Tabla V. Principales normativas sobre trazabilidad En Colombia

Normatividad	Año	Objetivos principales
Ley 914 de 2004 [76]	2004	Crear el Sistema Nacional de Identificación e Información del Ganado Bovino desde el nacimiento hasta llegar al consumidor final. El Sistema estará a cargo del Gobierno Nacional a través del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
CONPES 3376 [77]	2005	lineamientos de política que permitirán mejorar las condiciones de sanidad e inocuidad de las cadenas de la carne la bovina y la leche con el fin de proteger la salud y vida de las personas y los animales, aumentar la competitividad y fortalecer la capacidad para obtener la admisibilidad de sus productos en los mercados internacionales
Decreto 1500 de 2007 [78]	2007	Establece el reglamento técnico a través del cual se crea el Sistema Oficial de Inspección, vigilancia y control de la carne, productos cárnicos comestibles y derivados cárnicos destinados para el consumo humano y los requisitos sanitarios y de inocuidad que se deben cumplir en su producción, procesamiento, almacenamiento, transporte, comercialización, expendio, importación o exportación. Pretende implementar un sistema de trazabilidad con propósitos sanitarios y de inocuidad
Resolución 242 de 2007 [79]	2007	Establece los procesos y procedimientos destinados al desarrollo e implementación del Sistema Nacional de Identificación e información del ganado Bovino - SINIGAN
Resolución 377 de 2009 [80]	2009	Establece estándares de identificación para el SINIGAN
Resolución 378 de 2009 [81]	2009	Incorporación de nuevos procesos para la operación del SINIAN
Ley 1695 de 2013 [82]	2013	Establece crear el Sistema Nacional de Identificación, Información y Trazabilidad Animal. Crea la Comisión Nacional del Sistema Nacional de Identificación, Información y Trazabilidad Animal. Los Sistemas de Trazabilidad que se desarrollen en los otros eslabones de la cadena productiva, particularmente en las etapas de transformación y comercialización de productos de origen animal, deberán articularse y complementarse con el sistema IDENTIFICA.

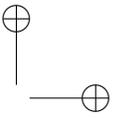
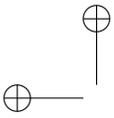
ha sufrido varias modificaciones y sigue en proceso de estudio y ajuste, lo cual fue evidente con la ley 1695 de 2013, que derogó cerca del 70 % la ley 914 de 2004. Esto demuestra que se tuvo una falla de tipo conceptual y de proyección de alcance de lo que significa tener un sistema de trazabilidad específico para la CSA, así como elementos claves.

Por otra parte, Colombia cuenta con la ley 1122 de 2007 [83], indica que el Instituto Nacional de Vigilancia de Medicamentos y Alimentos (INVIMA) tiene la competencia exclusiva de la inspección, vigilancia y control de la producción y procesamiento de alimentos; además, debe garantizar la identificación de los medicamentos en cualquier parte de la cadena de distribución, desde la producción hasta el consumidor final. Lo cual debe hacer mediante tecnología de señalización, con el objetivo de evitar la falsificación, adulteración, vencimiento y contrabando. Para la implementación de dicha ley, el INVIMA y organizaciones como GS1 Colombia en 2013 realizaron un piloto en siete ciudades con dieciséis laboratorios utilizando tecnología Datamatrix [51], cuyos resultados permitieron proyectar medidas en algunos laboratorios para implementar dicha tecnología.

Tabla VI. Marco Conceptual. Sistema de Trazabilidad en la CSA

Aspecto	Concepto
Definiciones básicas	
1. Trazabilidad:	<ul style="list-style-type: none"> • Capacidad de rastrear y seguir un alimento y su unidad trazable previamente identificada, por medio de registros físicos o digitales a lo largo de toda la CS para el control y localización en cualquier momento a lo largo del ciclo de vida de dicha unidad, para la toma de decisiones
2. Unidad de trazabilidad: TRU	<ul style="list-style-type: none"> • Entidad identificada de forma única para ser rastreada; “el que” se va a trazar en la CS. Para un lote es el conjunto de unidades de un alimento que se han producido, procesado y / o envasado en circunstancias similares. En la industria: Unidad de envío (para la entrega). Unidad logística (transporte y distribución). Unidad de comercio (unidad demedida en la que se negocia). Unidad de consumo (medida en la que se vende al consumidor)
Tipos de trazabilidad	
3. Lugar de Aplicación	<ul style="list-style-type: none"> • Trazabilidad interna o de proceso: cuando el TRU está en las instalaciones de una empresa • Trazabilidad externa: a lo que ocurre a lo largo de la CSA. Incluye rastreo a los proveedores y seguimiento hacia los clientes.
4. Seguimiento	<ul style="list-style-type: none"> • Tipo logístico: Sigue solo el movimiento físico del producto. • Tipo cualitativo: Asocia información relativa a la calidad del alimento y la seguridad del consumidor.
Sistema de Trazabilidad	
4. Características	<ul style="list-style-type: none"> • Amplitud: cantidad de información o atributos leídos con la una unidad de rastreo. • Profundidad: información relevante para que pase entre cada eslabón en la CSA • Precisión: grado de seguridad que le permite al sistema identificar un movimiento o característica particular de un producto. • Acceso: velocidad con que la información es comunicada en la CSA • Fiabilidad de la identificación del TRU: requiere su identificación clara y precisa.
5. Propiedades	<ul style="list-style-type: none"> • Unidad de recurso trazable, en donde los ingredientes y materias primas deben ser agrupados en unidades con propiedades similares. • Asignación de identificadores a las unidades trazables. • Registro de propiedades de producto o proceso, ya sea de forma directa o indirecta, pero siempre vinculadas a los identificadores establecidos. • Mecanismo de acceso a la información.
6. Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> • Monitorear la seguridad, inocuidad, calidad y procedencia de los alimentos. • Mejorar la gestión de la oferta y demanda. • Controlar el alimento aguas abajo y arriba. • Contribuir a la coordinación de los actores de la CSA. • Generar beneficios económicos, tecnológicos y científicos. • Cumplir con las normas y la legislación alimentaria.
7. Tecnologías para el desarrollo	<ul style="list-style-type: none"> • Identificación automática de producto: Etiquetado con tecnologías de lectura mecánica, códigos alfanuméricos, código de barras, Código electrónico de producto (IPC), Identificación por análisis genético, código data Matrix, Quick Response (QR). • Captura de datos: tecnologías basadas en Internet, RFID • Medición de la calidad y seguridad: (infrarrojos, resonancia magnética, equipos de análisis químico, dispositivos de envase inteligente para el alimento, sensores manométricos). • Equipos de Monitoreo Ambiental (sensores para medición del entorno). Captura de datos Geo-Espaciales (GIS, RS, GPS). • Conectividad e inteligencia empresarial: minería de datos, procesamiento analítico, evaluación comparativa, NCF (Near field communication), Intercambio de datos (EDI, XML) y Software (QualTrace, EQM, Alimentos Trak)

Es claro que en los últimos años las autoridades colombianas están emitiendo legislación conductora en la implementación de trazabilidad para diferentes sectores, en especial el agropecuario y el farmacéutico, para evitar afectaciones a la salud pública. Dichas legislaciones deben ser asumidas e implementadas en distintos eslabones de las cadenas productivas alimentarias, para ello, se necesita inversión en capacitación para los actores de la CSA, en tecnologías y en sensibilización de los consumidores ya que los esquemas de trazabilidad son complejos y es necesario que todos entiendan y apoyen su adopción. Esta necesidad manifiesta y evidente incluye tanto al gobierno, como a las empresas, las organizaciones y la academia para buscar formas eficientes que permitan no solo el cumplimiento de la normatividad existente, sino hacer de la trazabilidad un factor competitivo



para el país.

5. Marco conceptual para la CSA

En el desarrollo del texto se ha presentado la visión de diferentes autores sobre un sistema de trazabilidad, con énfasis en alimentos, a partir de los cuales proponemos un marco conceptual para un sistema de trazabilidad en las cadenas de suministro alimentarias, el cual es mostrado en la tabla VI.

6. Un caso de aplicación, retos de implementación de trazabilidad en la CS cárnica

En este apartado se establecen los elementos que conllevan a un marco para la implementación de un sistema de trazabilidad en la cadena cárnica, se realizó un análisis de doce artículos empíricos orientados al estudio de cadenas de carne, a fin de encontrar elementos orientadores que puedan ser utilizados en esquemas normativos para la CSA de carne para el consumo humano en Colombia.

Para estructurar un sistema de trazabilidad de identificación animal como el que se tiene planteado en Colombia, se debe identificar claramente los objetivos para los cuales se crea el sistema, de esta forma, tal como lo realizan en países exportadores se podrá diseñar un sistema que dé respuesta a las necesidades internas de salud y seguridad de la población y a las necesidades externas del mercado al cual se quiere llegar. Sin embargo, se debe tener presente que aunque los sistemas de trazabilidad voluntarios ayudan a generar desarrollos al interior del sector privado, también impide un desarrollo estandarizado y puede poner en peligro tanto la salud de los consumidores como la competitividad del sector. De los doce artículos analizados, se encontró que siete de ellos estudian la cadena de la carne de res, uno la carne de aves, uno la carne de cordero y otro la carne de cerdo. En la Tabla VII se pueden identificar las principales contribuciones de cada autor y la temática principal que maneja.

Según Hobbs [41] es imposible hablar de trazabilidad de la carne sin considerar también la trazabilidad de los animales de granja como un componente de los sistemas de trazabilidad de la carne, por lo cual garantizar el almacenamiento y rastreo de información desde el nacimiento del animal hasta que llega a la comercialización es primordial para garantizar que es seguro para el consumo.

Schroeder y Tonsor [93] compararon los sistemas de trazabilidad de animales, indicando que contar con un sistema de identificación animal (ID) es primordial para el mercado de la carne, especialmente la de res; dado que su ausencia genera pérdidas económicas y se puede perder el control en caso de presentarse un incidente de seguridad. Por ejemplo, en Estados Unidos al descubrirse el primer caso de encefalopatía espongiforme bovina (EEB) no se pudo hacer rastro, por ello el mercado perdió más del 80% de su venta y tardó más de siete años para recuperarse; caso similar ocurrió en Europa, donde al no poder identificar la procedencia de animales enfermos, se tuvieron que realizar sacrificios masivos.

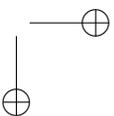
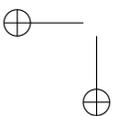


Tabla VII. Principales contribuciones de los artículos empíricos analizadas para la cadena de carne

Autor	Temática principal y país de estudio	Procedencia de la carne	Principales Conclusiones
[33]	Seguridad Alimentaria	Aves de corral	<ul style="list-style-type: none"> • La utilización de un sistema de trazabilidad se simplificó al implementar automatización en los procesos. • El sistema de trazabilidad puede permitir tanto la gestión de riesgos, como la aplicación y validación de mejoras en los procesos
[84]	Reciclado de etiquetas RFID China	Res	<ul style="list-style-type: none"> • Etiqueta RFID en la oreja del animal es la mejor alternativa para los sistemas de trazabilidad. • La introducción de información RFID y la lectura son complejos para los agricultores. • El precio de la tecnología todavía es alto, por lo cual es necesario reciclar etiquetas a lo largo de la CS
[85]	Decisión de compra de consumidor por origen del producto Sudafríca	Cordero	<ul style="list-style-type: none"> • El precio es el atributo más importante, seguido por seguridad, calidad, mientras que la trazabilidad y el origen fue calificado como de la importancia más bajo. • Los consumidores no creen que la trazabilidad es suficiente para garantizar la seguridad. • Los consumidores consideran trazabilidad de los alimentos como una obligación básica de los productores y los minoristas y por lo tanto no sienten la obligación de pagar un precio
[86]	Orientación para exportación Brasil	Res	<ul style="list-style-type: none"> • La introducción de procesos de trazabilidad permitió aumentar la cuota de mercado de exportación (UE).
[87]	Preferencias consumidor y su disposición de pago República de Georgia	Cerdo	<ul style="list-style-type: none"> • Deben preocuparse por mantener la apariencia de los productos del cerdo, con una entrega oportuna, utilizando una logística adecuada, almacenamiento y visualización de los productos. • La presencia de un atributo de calidad disminuye la utilidad marginal obtenido a partir de cualquier otro atributo
[88]	Preferencias consumidor Japón	Res	<ul style="list-style-type: none"> • El interés de los consumidores japoneses en la información proporcionada por los sistemas de trazabilidad de alimentos es en general baja. • Los resultados muestran que los jóvenes son más proclives a la información de seguimiento • Los consumidores están dispuestos a pagar una prima para los alimentos con atributos de trazabilidad
[89]	Preferencias consumidor por decisión de precio Estados Unidos	Res	<ul style="list-style-type: none"> • Los consumidores valoran la certificación del departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA) más que cualquiera otro atributo de seguridad alimentaria.
[90]	Identificación biométrica	Res	<ul style="list-style-type: none"> • Un sistema de trazabilidad integrado que incluya a todos los actores a lo largo de la CS puede servir para aumentar la confianza del consumidor en los productos de carne • Propone el uso de la identificación por radiofrecuencia (RFID) para la identificación individual del ganado, y los identificadores biométricos para la verificación de la identidad de ganado • Las ventajas de la identificación biométrica son que es una prueba de falsificaciones
[91]	Modelo de prototipo evolutivo de software China	Res	<ul style="list-style-type: none"> • Un sistema de trazabilidad puede ser categorizado en los niveles fundamentales, decisivos y estratégicos • Los sistemas de trazabilidad en los tres niveles permiten ganar la confianza de los consumidores y representa una forma óptima de supervisar lo que sucede a lo largo de toda la CS en todo momento.
[92]	Denominación origen por medio de ADN y marcadores SNP Unión Europea	Res	<ul style="list-style-type: none"> • Métodos de verificación de los productos con denominación de origen (DOP) y la Indicación Geográfica Protegida de productos (IGP) ayudarán a proteger a los alimentos regionales y promover el crecimiento económico • Sistemas de rastreo basados en el ADN son capaces de identificar el origen de los productos cárnicos y rastrearlos a través de la CS, aunque sigue siendo costoso

De acuerdo con los autores analizados, para un sistema de trazabilidad individual en la cadena de cárnica, es necesario contar con un mecanismo automatizado que permita realizar identificación al animal desde su nacimiento, el cual se puede realizar por medio de etiquetas RFID en la oreja del animal. Dicho mecanismo permitirá realizar cambios en la etiqueta cuando se requiera y lograr una identificación individual en la que pueda consultar la información de seguimiento y movimientos del animal y sus productos derivados, edad, origen, dieta y registro de salud, que permitan ofrecer todas las garantías de calidad y seguridad a los consumidores y al gobierno.

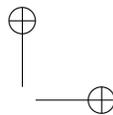
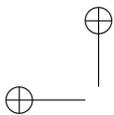
Se debe tener claro que un sistema de trazabilidad de la cadena de carne a través de RFID y mecanismos de identificación animal por medio de ADN y biometría, son costosos y requieren de la capacitación de los ganaderos y procesadores, por lo cual es indispensable que el gobierno realice inversión no solo en la generación del sistema y las bases de datos, sino en capacitación y una inversión planificada obligatoria en dicho sistema [94]. De igual forma, es necesario que se realicen estudios para determinar cuál sería la disposición de los compradores para apoyar el costo de la trazabilidad, dado que el precio es factor primordial en la venta del producto final y dicho precio debe reflejar el costo de los sistemas de trazabilidad, y dadas a la marcada estratificación económica de un gran sector de la población colombiana, se debe determinar cómo se costeará dicho sistema.

7. Conclusiones

La revisión sistemática sobre trazabilidad permite concluir que a pesar de los estudios que se han desarrollado en los últimos años, actualmente no existe un marco conceptual común sobre el tema en CSA, lo cual afecta el desarrollo e implementación en las diferentes Cadenas alimentarias. Se encontró que las definiciones establecidas por la ISO y por el reglamento de la Unión Europea (178-2002) son las más divulgadas a nivel internacional; sin embargo, varios autores y organizaciones han generado diferentes definiciones de trazabilidad que impiden manejar un lenguaje unificado. De acuerdo con esto, se propone la definición para las CSA que incluye los diferentes aspectos que se han analizado a lo largo de la literatura y que será de utilidad para estudios futuros.

Es claro que la implementación de sistemas de trazabilidad no es fácil para los pequeños productores de alimentos y empresas de procesamiento, ya que carecen de la capacidad financiera, la información de trazabilidad adecuada y de conocimientos suficientes para ponerlo en práctica. Es por ello que tanto la comunidad académica, como el gobierno deben generar los mecanismos pertinentes para que este primer actor de la cadena conozca y pueda implementar la trazabilidad de acuerdo a sus capacidades y necesidades. Lo cual podría constituirse en una herramienta básica de competitividad para el sector agropecuario, especialmente en certificación de origen, lo que permitiría la clara identificación de los productores por parte de los agentes aguas abajo, actualmente no existe una diferenciación de los campesinos que realizan buenas prácticas y obtienen productos con altos estándares, dada la falta de trazabilidad los alimentos producidos por ellos se confunden en el proceso de comercialización y flujo en la CS. De implementarse un sistema de trazabilidad, los alimentos obtenidos con buenas prácticas agrícolas y logísticas, posiblemente obtendrían un precio justo que retribuya los esfuerzos económicos de los productores, esto dado la posibilidad de realizar el rastreo y seguimiento del alimento. Con esto presente, en el artículo se presenta un marco conceptual para la trazabilidad en las CSA, desde la academia para investigaciones futuras, que permitan el diseño e implementación de sistemas de trazabilidad y la proyección de normas. Los sistemas de trazabilidad por sí solos no son los que garantizan seguridad alimentaria o el logro de los objetivos propuestos, son una herramienta de gestión para obtener información a lo largo de la CSA para ser utilizada por los analistas y directivos para la toma de decisiones.

Colombia ha tratado de generar mecanismos para implementar esquemas de trazabilidad en CSA, especialmente para la cadena de carne, sin embargo, la ambigüedad y la derogación en las mismas, ponen de manifiesto la necesidad de invertir en investigación en el tema, de tal forma que les permita proyectar los objetivos deseados e iniciar procesos de capacitación masivos e inversión en la tecnología adecuada. De acuerdo a los aportes de los artículos analizados, para estructurar un sistema de trazabilidad animal, se deben establecer los objetivos del sistema, de forma que su diseño dé respuesta a las necesidades de seguridad alimentaria de la población y a las necesidades del mercado. Las variables obligatorias del sistema son: identificación individual del animal, rastreo desde origen, de manera que se pueda determinar la edad del animal, seguimiento de los movimientos del animal (granja, distribuidor, lugar de sacrificio, etc.), además tener en cuenta que a pesar que para los países importadores de carne, las variables de dieta del animal y registros de salud no son obligatorios, se podría plantear incluirlos en el sistema para mayor confiabilidad y plus adicional del alimento.



Tanto el gobierno, como los productores, los distribuidores, los consumidores, y todas las actores que se articulan dentro de una CSA, deben entender que contar con sistemas de trazabilidad específicos para las CSA, en los cuales se realicen acuerdos para el intercambio de información y flujos de productos, como inversiones necesarias que permitirán garantizar la seguridad y calidad de los alimentos a la vez que se protege la vida de quienes los consumen. Es claro que esto tiene un costo, pero los beneficios se verán reflejados en la salud y tranquilidad de quienes participan en dicha cadena y se abrirán puertas de exportación hacia países con estándares y normativas más exigentes que la colombiana. Tanto los gobiernos como las empresas al implementar sistemas de trazabilidad deben abarcar toda la CSA, para lo cual necesitan acuerdos de cooperación y de mecanismos eficientes de recolección y almacenamiento de información, los cuales les permitan dar cumplimiento a los objetivos económicos y sociales; de igual forma, los gobiernos deben pensar que los sistemas de trazabilidad digitales y obligatorios basados en estándares comunes.

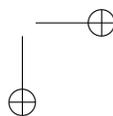
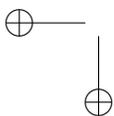
8. Posibles ámbitos de estudio

La trazabilidad por ser un tema que está en desarrollo y que tiene tan diversos campos científicos de estudio, ofrece a la comunidad investigadora un amplio campo para realizar análisis empíricos, teóricos, estudios de caso, desarrollo de software, entre otros. Las investigaciones se pueden realizar en torno a temas como: intercambio e integración de la información a lo largo de la CSA, percepción del agricultor o ganadero para la implementación de la trazabilidad, disposición de los clientes a los productos con sistemas de trazabilidad, motivación de las empresas para implementar sistemas de trazabilidad estandarizados, percepción de los clientes de tener información en tiempo real de los productos que compran, que tipo de información están interesados en recibir, disposición a un precio adicional para contar con información adicional del producto.

Para futuros estudios científicos, se deben tener en cuenta como afectan las variables culturales, económicas, posibilidad de acceso a avances tecnológicos y legislación que varían de un país o región a otro. Así mismo se pueden estudiar a detalle los variables que determinan la aplicación proactiva de sistemas de trazabilidad en las diferentes CSA y la existencia de variables mediadoras que influyen en esta decisión. La evaluación del desempeño de trazabilidad es un tema con poco desarrollo, su desempeño a lo largo de la CSA y como los beneficios se reparten entre todos los agentes es un campo poco explorado.

Referencias

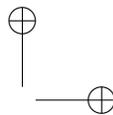
- [1] K. M. Karlsen, B. Dreyer, P. Olsen y E. O. Elvevoll, "Literature review: Does a common theoretical framework to implement food traceability exist?". *Food control*, pp. 409-417., 2013. ↑ [162](#), [163](#), [164](#), [167](#), [168](#), [169](#), [170](#), [171](#), [172](#), [173](#)
- [2] M. Borit, "Legal Requirements for Food Traceability in the European Union". *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, pp. pp. 225-235, 2016. ↑ [162](#), [179](#)
- [3] P. G. Crandall, C. A. O'Bryan, D. Babu, N. Jarvis, M. L. Davis, M. Buser, B. Adam, J. Marcy y S. C. Ricke, "Whole-chain traceability, is it possible to trace your hamburger to a particular steer, a U. S. perspective". *Meat science*, pp. 137-144, 2013. ↑ [162](#), [171](#)
- [4] T. McMeekin, J. Baranyi, J. Bowman, P. Dalgaard, M. Kirk, T. Ross, S. Schmid y M. Zwietering, "Information systems in food safety management". *International Journal of Food microbiology*, pp. 181-194, 2006 ↑ [163](#), [178](#)



- [5] F. Dabbene, P. Gay y C. Tortia, "Traceability issues in food supply chain management: A review". *Biosystems engineering*, pp. 1-6, 2014. ↑ [163](#), [167](#), [168](#), [169](#), [171](#), [172](#), [173](#), [174](#)
- [6] G. Smith, J. D. Tatum, K. E. Belk, J. A. Scanga, T. Grandin y J. N. Sofos, "Traceability from a US perspective". *Meat science*, pp. 174-193, 2005. ↑ [163](#), [164](#), [168](#), [170](#)
- [7] T. Bosona y G. Gebresenbet, "Food traceability as an integral part of logistics management in food and agricultural supply chain". *Food control*, pp. 32-48, 2013. ↑ [163](#), [167](#), [168](#), [170](#), [171](#), [172](#), [175](#), [177](#), [178](#)
- [8] Banco-Mundial, "Índice de desempeño logístico". 2014. [En línea] Disponible en: <http://datos.bancomundial.org/indicador/LP.LPI.OVRL.XQ> ↑ [163](#)
- [9] E. Golan y B. Krissoff, *Traceability in the uS food supply: economic theory and industry studies*. 2014. ↑ [163](#), [164](#), [170](#), [171](#), [172](#)
- [10] L. U. Opara, "Traceability in agriculture and food supply chain: A review of". *Science and Technology*, pp. 101-106, 2003. ↑ [164](#), [170](#), [177](#), [178](#)
- [11] M. Aung Min y Y. Chang Seok, "Traceability in a food supply chain: Safety and quality perspectives". *Food control*, pp. 172-184, 2014. ↑ [164](#), [168](#), [169](#), [170](#), [171](#), [172](#), [175](#), [178](#), [179](#)
- [12] Y. Sarig, J. De Baerdemaker, P. Marchal, H. Auernhammer, L. Bodria, I. A. Nääs y H. Centrangolo, "Traceability of Food Products". *Agricultural Engineering International: CIGR Journal.*, 2003. ↑ [164](#)
- [13] AO, "FAO's Strategy for a Food Chain Approach to Food Safety and Quality: A framework document for the development of future strategic direction". 2003. [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/meeting/006/y8350e.htm> ↑ [164](#)
- [14] GS1, 25 2 2015. [En línea] Disponible en: <http://www.youtube.com/watch?v=32oqDdyKXdY> ↑ [164](#)
- [15] GS1-Colombia, 2014. [En línea] Disponible en: <http://www.gs1co.org/comunidad/proyectoseiniciativas/trazabilidad.aspx> ↑ [164](#)
- [16] F. Schwägele, "Traceability from a European perspective". *Meat science*, pp. 164-173, 2005. ↑ [164](#), [168](#), [169](#), [173](#), [176](#), [178](#)
- [17] B. Kitchenham, "Procedures for performing systematic reviews". *Joint technical report*, 2004. ↑ [165](#)
- [18] P. Olsen y M. Borit, "Traceability of genetically modified Roundup Ready soybean: A case study on sampling and analytical uncertainty along processing chain". *Trends in Food science e tehnology*, pp. 142-150, 2013. ↑ [167](#), [168](#), [169](#), [173](#)
- [19] R. Badia-Melis, P. Mishra y L. Ruiz-García, "Food traceability: New trends and recent advances. A review". *food control*, vol. 57, pp. pp. 393-401, 2015. ↑ [167](#), [176](#)
- [20] S. V. Kher, L. J. L. J. Frewer, J. D. Jonge, M. Wentholt, O. H. Davies, N. B. Luijckx y H. J. Cnossen, "Experts' perspectives on the implementation of traceability in Europe". *British Food Journal*, vol. 112, no 2, pp. 261- 274, 2010. ↑ [167](#), [170](#)
- [21] Parlamento-Europeo y Consejo-UE, 2002. ↑ [168](#), [179](#)
- [22] raceFood, 2014. [En línea] Disponible en: http://www.tracefood.org/index.php/Fundamentals:Traceability_definition ↑ [168](#)
- [23] Icontec, 2009. [En línea] Disponible en: <http://tienda.icontec.org/brief/NTC-ISO22005.pdf> ↑ [168](#), [179](#)
- [24] FAO-OMS, "Alimentarius, Comision del Codex". 2014. ↑ [168](#), [179](#)
- [25] T. Moe, "Perspectives on traceability in food manufacture". *Trends in Food Science & Technology*, vol. 9, pp. 211-214, 1998. ↑ [168](#), [173](#), [174](#), [176](#)
- [26] P. Olsen y M. Aschan, "Reference method for analyzing material flow, information flow and information loss in food supply chains". *Trends in Food Science & Technology*, vol. 21, no 6, pp. 313-320, 2010. ↑ [169](#)
- [27] K. M. Karlsen, P. Olsen y K. Donnelly, "Implementing traceability: practical challenges at a mineral water bottling plant". *British Food Journal*, vol. 112, no 2, pp. 187-197, 2010. ↑ [169](#)
- [28] J. E. Hobbs, "Information asymmetry and the role of traceability systems." *Agribusiness*, vol. 20, no 4, pp. 397-415, 2004. ↑ [169](#)
- [29] M. Bertolini, M. Bevilacqua y R. Massini, "FMCEA approach to product traceability in the food industry.". *Food Control*, vol. 17, no 2, pp. 137-145, 2006. ↑ [169](#)
- [30] C. Costa, F. Antonucci, F. Pallottino, J. Aguzzi, D. Sarriá y P. Menesatti, "A Review on Agri-food Supply Chain Traceability by Means of RFID Technology". *Food Bioprocess Technology*, vol. 6, no 2, pp. 353-366, 2013. ↑ [170](#)
- [31] E. Evizal, S. Rahim, T. Rahman y S. Rosa, "Traceability Software for the". *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, pp. pp. 191-206, 2016. ↑ [170](#)
- [32] M. H. Jansen-Vullers, C. A. Van Dorp y J. M. Beulens A, "Managing traceability information in manufacture". *International journal of information management*, vol. 23, no 5, pp. 395-413, 2003. ↑ [170](#), [174](#)

- [33] V. Lavelli, "High-warranty traceability system in the poultry meat supply chain: A medium-sized enterprise case study". *Food control*, pp. 148-156, 2013.†170, 183
- [34] G. C. Smith, D. L. Pendell, J. D. Tatum, K. E. Belk y J. N. Sofos, "Post-slaughter traceability.". *Meat science*, pp. 66-74, 2008.†170, 179
- [35] A. Abd Rahman, H. Barau Singhry, M. Hizam Hanafiah y M. Abdul, "Influence of perceived benefits and traceability system on the readiness for Halal assurance system implementation among foos manufactures". *Food Control*, 2016.†170
- [36] M. Mattevi y J. A. Jones, "Traceability in the food supply chain: Awareness and attitudes of UK Small and Medium-sized Enterprises". *Food Control*, vol. Vol. 64, pp. pp. 120-127, 2016.†170
- [37] L. Zach, M. E. Doyle, V. Bier y C. Czuprynski, "Systems and governance in food import safety: A U.S. perspective". *Food control*, pp. 153-162, 2012.†171
- [38] R. Saltini, R. Akkerman y S. Frosch , "Optimizing chocolate production through traceability: A review of the influence of farming practices on cocoa bean quality". *Food control*, pp. 167-187, 2013.†171
- [39] J. S. & L. S. N. Bagshaw, "Quality management systems in Australian vegetable and fruit industries". *Preface 11 Opening Address 12*, 2000.†171
- [40] H. Aguinis y A. Glavas, "What we know and don't know about corporate social responsibility: A review and research agenda". *Journal of management*, vol. 38, no 4, pp. 932-968, 2012.†171
- [41] J. Hobbs, "Effective Use of Food Traceability in Meat Supply Chains". *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, pp. pp. 321-335, 2016.†171, 182
- [42] R. Rodríguez-Ramírez, A. F. González-Córdova y B. Vallejo-Córdova, "Review: Authentication and traceability of foods from animal origin by polymerase chain reaction-based capillary electrophoresis". *Analytica Chimica Acta*, pp. 120-126, 2011.†171, 173, 178
- [43] C. Agrimonti, M. Vietina, S. Pafundo y N. Marmirol, "The use of food genomics to ensure the traceability of olive oil.". *Trends in Food Science e Tehnology*, pp. 237-244, 2011.†171
- [44] H. Scholten, C. Verdouw, A. Beulens y V. d. J. Vorst, "Defining and Analyzing Traceability Systems in Food Supply Chains". *Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition*, pp. pp. 9-33, 2016.†173, 174, 176, 178
- [45] H. M. Kim, , M. S. Fox y M. Gruninger, "An ontology of quality for enterprise modelling.". de *In Proceedings of the fourth Workshop on Enabling Technologies: Infrastructure for Collaborative Enterprises*, 1995.†173
- [46] A. Banterle y S. Stranieri, "The consequences of voluntary traceability system for supply chain relationships. An application of transaction cost economics". *Food police*, vol. 33, no 6, pp. 560-569, 2008.†174
- [47] V. Bellon-Maurel, M. D. Corto, P. Roux, M. Schul y G. M. Peters, "Streamlining life cycle inventory data generation in agriculture using traceability data and information and communication technologies – part I: concepts and technical basis". *Journal of cleaner production*, pp. 60-66, 2014.†174
- [48] D. Folinas, I. Manikas y B. Manos, "Traceability data management for food chains". *British Food Journal*, vol. 108, no 8, pp. 622-633, 2006.†174
- [49] H.-I. Hsio y K.-L. Huang, "Time-temperature transparency in the cold chain". *Food Control*, vol. Vol. 64, pp. pp. 181-188, 2016.†174
- [50] C. M. M. C. & M. C. Giacomini, "Case study on the traceability systems in the fruit and vegetable sector". *17th Symposium of the International Farming Systems Association*, Lake Buena Vista FL, 2002.†174
- [51] P. A. Liao, H. H. Chang y C. Y. Chang, "Why is the food traceability system unsuccessful in Taiwan? Empirical evidence from a national survey of fruit and vegetable farmers". *Food Policy*, vol. 36, no 5, pp. 686-693, 2011.†175, 180
- [52] A. Suprem, N. Mahalik y K. Kim, "A review on application of technology systems, standards and interfaces for agriculture and food sector". *Computers and electronics in agriculture*, pp. 355-364, 2013.†175
- [53] R. W. Van, L. J. Frewer, Menozzi y Faioli, "Consumer perceptions of traceability: A cross-national comparison of the associated benefits". *Food Quality and Preference*, vol. 19, no 5, pp. 452-464, 2008.†175
- [54] J. Chilton, "Lessons learned: Laying the ground work for a successful recall". *Meat & Poultry*, vol. Issue, no December, p. 48-52, 2004.†175
- [55] X. Zhang, "Does ICT influence supply chain management and performance?". *International Journal of Operations & Production Management*, 2011.†176
- [56] T. Kelepouris, "RFID-enabled traceability in the food supply chain". *Industrial Management & data systems*, 2007.†176
- [57] M. Thakur, "Modeling traceability information in soybean value chains". *Journal of Food Engineering*, 2010.†

- 176
- [58] Y. Rahadian, "Logistics Information System for Supply Chain of Agricultural Commodity". *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012. ↑ 176
- [59] G. Aiello, M. Enea y C. Muriana, "The expected value of the traceability information". *European Journal of Operational Research*, vol. Vol. 244, pp. pp. 176-186, 2015. ↑ 176
- [60] B. Manos y I. Manikas, "Traceability in the Greek fresh produce sector: drivers and constraints". *British Food Journal*, vol. 112, no 6, pp. 640-652, 2010. ↑ 176
- [61] a. Regattieri, M. Gamberi y R. Manzini, "Traceability of food products: General framework and experimental evidence.". *Journal of Food Engineering*, 2007. ↑ 176
- [62] E. D. Y. & G. S. Sahin, "Performance evaluation of a traceability system. An application to the radio frequency identification technology.". *Systems, Man and Cybernetics*, pp. 3-6, 2002. ↑ 176
- [63] J. Landt, "The history of RFID". *IEEE Potentials*, 2005. ↑ 176
- [64] A. Sabbaghi y G. Vaidyanathan, "Effectiveness and efficiency of RFID technology in Supply Chain Management Strategic values and Challenges.". *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 2008. ↑ 176
- [65] X. Zhu, "A review of RFID technology and its managerial applications in different industries". *Journal of Engineering and Technology Management*, 2012. ↑ 176
- [66] A. Sarac, "A literature review on the impact of RFID technologies on supply chain management". *International Journal of Production Economics*, 2010. ↑ 176
- [67] K. Chen, y F. Hwang, "Applying RFID to Picking Operation in Warehouses, Economy and Ecology". de *Global Perspective for Competitive Enterprise, Economy and Ecology*, 2009. ↑ 176
- [68] A. De Marco, A. Cagliano, M. Nervo y C. Rafele, "Using system dynamics to assess the impact of RFID technology on retail operations". *International Production Economics*, vol. 135, no 1, pp. 333-344, 2012. ↑ 177
- [69] M. M. Herrera y J. A. Orjuela, "Perspectiva de trazabilidad en la cadena de suministros de Frutas: Un enfoque desde Dinámica de Sistemas". *Ingeniería*, vol. 19, no 2, 2014. ↑ 177
- [70] J. Alfaro Tanco, L. Rabade Herrero y J. Alvarez, "Relaciones de integración empresa-proveedor: influencia de la trazabilidad". *Universia Business Review*, no 15, pp. 54-67, 2007. ↑ 177
- [71] P. Engelseth, "Food product traceability and supply network integration". *The Journal of Business and Industrial Marketing*, vol. 24, no 5-6, pp. 421-430, 2009. ↑ 177
- [72] G. Mamone, G. Picariello, S. Caira, F. Addeo y P. Ferranti, "Analysis of food proteins and peptides by mass spectrometry-based techniques". *Journal of chromatography*, pp. 7130 - 7142, 2009. ↑ 177
- [73] Congreso de Estados Unidos, "U.S. Food y Drog". [En línea] Disponible en: <http://www.fda.gov/RegulatoryInformation/Legislation/ucm148797.htm> ↑ 179
- [74] Congreso de los Estados Unidos, "U.S. Food y Drug". [En línea] <http://www.fda.gov/Food/GuidanceRegulation/FSMA/> ↑ 179
- [75] GFSI, "Global Food Safety Initiative". [En línea] Disponible en: <http://www.mygfsi.com/schemes-certification.htm> ↑ 179
- [76] Congreso de la Republica de Colombia, "Ley 914 de 204". Bogotá D.C., 2004. ↑ 180
- [77] Consejo Nacional de politica Economica y Social de Colombia, "Conpes 3376". Bogotá D.C., 2005. ↑ 180
- [78] Ministerios de proteccion social de Colombia, "Decreto de 1500 de 2007". Bogotá D.C., 2007. ↑ 180
- [79] Ministerio de salud y proteccion social, "Resolucion 242 de 2013". Bogotá D.C., 2013. ↑ 180
- [80] Ministerio de agricultura y desarrollo rural, "Resolucion 377 de 2009". Bogotá D.C., 2009. ↑ 180
- [81] Ministerio de agricultura y desarrollo rural de Colombia, "Resolucion 278 de 2009". Bogotá D.C., 2009. ↑ 180
- [82] Congreso de la Republica de Colombia, "Ley 1695 de 2013". Bogotá D.C., 2013. ↑ 180
- [83] Congreso de Colombia, "Ley 1122 de 2007". Bogotá D.C., 2007. ↑ 180
- [84] J. Feng, Z. Fu, Z. Wang, M. Xu y X. Zhang, "Development and evaluation on a RFID-based traceability system for cattle/beef quality safety in China". *Food control*, vol. 31, no 2, pp. 314-325, 2013. ↑ 183
- [85] H. D. Plessis y G. D. Rand, "The significance of traceability in consumer decision making towards Karoo lamb". *Food Research International*, vol. 47, no 2, pp. 210-217, 2012. ↑ 183
- [86] C. Favarini Ruviano, J. O. Jardim Barcellos y H. Dewes, "Market-oriented cattle traceability in the Brazilian Legal Amazon". *Land Use Policy*, vol. 38, pp. 104-110, 2014. ↑ 183
- [87] D. Ubilava y K. Foster, "Quality certification vs. product traceability: Consumer". *Food Policy*, vol. 34, no 3, pp. 305-310, 2009. ↑ 183
- [88] S. Jin y L. Zhou, "Consumer interest in information provided by food". *Food Quality and Preference*, p. 2014. ↑ 183



- [89] M. L. Loureiro y W. J. Umberger , “A choice experiment model for beef: What US consumer responses tell us about relative preferences for food safety, country-of-origin labeling and traceability”. *Food Policy*, vol. 32, no 4, pp. 496-514, 2007.↑183
- [90] C. Shanahan, B. Kernan, G. Ayalew, K. McDonnell, S. Ward y F. Butler, “A framework for beef traceability from farm to slaughter”. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 66, no 1, pp. 62-69, 2009.↑183
- [91] X. Zhang, S. Lv, M. Xu y W. Mu, “Applying evolutionary prototyping model for eliciting system”. *Food control*, vol. 21, no 11, pp. 1556-1562, 2010.↑183
- [92] R. Negrini, L. Nicoloso, P. Crepaldi, E. Milanesi, R. Marino, D. Perini, L. Pariset, S. Dunner, H. Leveziel, Williams y P. Ajmone Marsan, “Traceability of four European Protected Geographic”. *Meat Science*, vol. 80, no 4, pp. 1212-1217, 2012.↑183
- [93] T. C. Schroeder y G. T. Tonsor, “International cattle ID and traceability: Competitive implications for the US”. *Food Policy*, vol. 37, no 1, pp. 31-40, 2012.↑182
- [94] A. P. Marchante, A. Alvarez-Melcon y M. Trebar, “Advanced traceability system in aquaculture supply chain”. *Journal of food engineering*, pp. 50-60, 2014.↑183

Dora Lucia Rincón B.

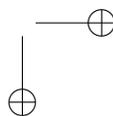
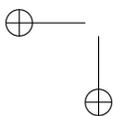
Ingeniera Industrial, Especialista en Ingeniería de Producción y Logística e la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; estudiante de Doctorado Universidad de Salamanca.
Correo electrónico: doralucia@usa.es

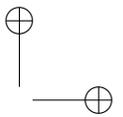
Johan Esteban Fonseca Ramírez

Ingeniero Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; integrante del Grupo GICALyT.
Correo electrónico: fonseca_johan@hotmail.com

Javier Arturo Orjuela Castro

Ingeniero de Alimentos, Ingeniero Industrial, especialista en Ingeniería de producción, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Investigación y Estadística, Universidad Tecnológica de Pereira; doctor (C) en Ingeniería Industria y Organizaciones, Universidad Nacional de Colombia; profesor e investigador en las áreas de Logística en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; director del Grupo de investigación en Cadenas de Abastecimiento, Logística y Trazabilidad, GICALyT.
Correo electrónico: jorjuela@udistrital.edu.co





Case study

REVISTA
Ingeniería

Selection of Alternatives for the Natural Gas Supply in Colombia Using the Analytic Hierarchy Process

Selección de Alternativas para el Suministro de Gas Natural en Colombia empleando el Proceso Analítico Jerárquico

Mauricio Becerra Fernández^{*1}, Ricardo Rodríguez Yee²

¹Universidad Católica de Colombia, Facultad de Ingeniería. Bogotá - Colombia.

² Contraloría Delegada para el Sector de Minas y Energía de Colombia.

Correspondence: *mbecerra@ucatolica.edu.co, ricardo.rodriguez@contraloria.gov.co

Recibido: 15/11/2016. Modificado: 26/03/2017. Aceptado: 10/04/2017.

Abstract

Context: Colombia consumes natural gas in different sectors, especially in the ones that are residential and vehicular transport. Gas consumption serves as backup for power generation in situations of reduced hydroelectric capacity. Nowadays, gas reserve levels have been reduced and it is essential to ensure the uninterrupted supply of the resource. To achieve such objective, there are some alternatives which are difficult to implement at the same time, given the limited financial budget and implementation times that they demanded. In this way, several studies have advanced in the application of models to prioritize alternatives for both supplying power and reducing emissions in the generation, especially regarding the evaluation of energy sources and technology selection for supply.

Method: The Analytic Hierarchy Process (AHP) based in the Delphi method to define preferences according to the experts judgment, was applied to evaluate the selection of alternatives supply of natural gas in Colombia, considering technical, environmental and social criteria, which is reliable and policy oriented to guarantee supply of resources in the country.

Results: Once the model was applied, we evaluated the criteria and alternatives for infrastructure to support gas supply, finding that reliability is the most relevant criterion as well as alternative of building the 'Regasification Pacific Plant' followed by the construction of the 'Buenaventura-Cali pipeline' and the 'Storage Plant in Bogotá'.

Conclusions: As the results indicate, in Colombia efforts should be focus on imports of the resource through the construction of regasification plants and pipelines to facilitate transport inland to demand points. The latter may help decision makers facing various alternatives to ensure the supply of this resource, which is relevant to various economic sectors, including generation of electricity in the country.

Keywords: Analytic Hierarchy Process, natural gas, supply.

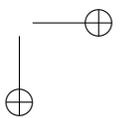
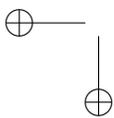
Acknowledgements: The authors are grateful with the Deputy Comptroller for the Sector of Mines and Energy of Colombia, for their participation in the development of this article.

Language: Spanish



Citación: M. Becerra, R. Rodríguez, "Selection of Alternatives for the Natural Gas Supply in Colombia Using the Analytic Hierarchy Process" INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 190-210, 2017.

©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.2.a02>



Resumen

Contexto: Colombia es un país que consume gas natural en los sectores residencial, transporte vehicular y como respaldo para la generación de energía eléctrica ante situaciones de reducción de capacidad hidroeléctrica. En la actualidad, los niveles de reservas se han reducido y es indispensable garantizar el suministro ininterrumpido del recurso, ante lo cual se cuenta con diversas alternativas de difícil aplicación dados los recursos financieros limitados y los tiempos de implementación demandados. En esta vía, diversos trabajos se han adelantado en la aplicación de modelos que permitan priorizar alternativas en torno a la consecución de un objetivo para el abastecimiento o reducción de emisiones en la generación de energía, especialmente en la evaluación de fuentes energéticas y selección de tecnologías para el suministro.

Método: Mediante la aplicación del modelo de Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y apoyado en el método Delphi para definir preferencias de acuerdo con el juicio de expertos, se evalúa la selección de alternativas de abastecimiento de gas natural en Colombia considerando criterios técnicos, de confiabilidad, ambientales y sociales orientados a las políticas de garantía de suministro del recurso en el territorio nacional.

Resultados: Una vez aplicado el modelo, evaluando los criterios y alternativas para la infraestructura que respalde el suministro del recurso, se encuentra una mayor relevancia en el criterio de “confiabilidad” y en las alternativas de la construcción de la “planta de regasificación del Pacífico” seguida por la “Construcción del tramo Buenaventura-Cali” y la “planta de almacenamiento Bogotá”.

Conclusiones: Los resultados indican que se deben orientar los esfuerzos en las importaciones del recurso por medio de la construcción de plantas de regasificación y los tramos que faciliten el transporte hacia el interior, donde se encuentran los puntos de demanda; lo anterior como soporte para los tomadores de decisiones que se enfrentan a diversas alternativas para garantizar la oferta de dicho recurso, el cual es relevante para varios sectores económicos, así como en el respaldo a la generación de energía eléctrica en el país.

Palabras clave: Gas natural, Proceso Analítico Jerárquico, suministro.

Agradecimientos: Los autores agradecen a la Contraloría Delegada para el Sector de Minas y Energía de Colombia por la participación en el desarrollo del presente artículo.

Idioma: Español

1. Introducción

El gas natural es una mezcla de componentes naturales y una fuente de energía no renovable obtenida directamente del medio ambiente, compuesto principalmente de metano (entre 87 y 96 partes). Alrededor del mundo es demandado por diversos sectores como el de generación de energía, transporte, consumo comercial y residencial [1].

El procesamiento de gas natural requiere pocos pasos entre la fuente de extracción y la entrega al consumidor final, se transporta de manera eficiente y segura por el mundo generando un mínimo impacto al medio ambiente, ya sea en forma de Gas Natural Licuado (GNL) por medio de barcos metaneros o camiones, incluso empleando tuberías que recorren grandes distancias al interior de una nación o a través de continentes. El gas natural es una de las fuentes más eficientes en la generación de energía convencional, con una participación mundial del 22 %; para las centrales eléctricas que emplean este gas el costo de generación es relativamente bajo, se encuentra mayor flexibilidad y menor tiempo de construcción de las instalaciones. Cuando se emplea el gas natural en hogares o en la industria, se generan entre 25 y 30 % menos emisiones de CO₂ que empleando petróleo, y entre 40 y 50 % menos emisiones de CO₂ que al emplear carbón en relación con cada unidad energética producida; al usarlo para la generación de energía eléctrica, se libera cerca de

60 % menos CO₂ que al emplear carbón por cada kWh producido; si es empleado en transporte por medio del Gas Natural Vehicular (GNV), se generan entre 20 y 25 % menos emisiones de CO₂ que al emplear combustibles tradicionales. Todo esto contribuye a la reducción de impacto del efecto invernadero, especialmente en las áreas urbanas (todas las anteriores estadísticas son reportadas en [2]).

A finales del 2014, las mayores reservas probadas a nivel mundial de gas natural se encontraban en Oriente Medio con un 42.7 %, lo que equivale a 2818.6 trillones de pies cúbicos, dentro de esta participación Irán cuenta con el 18.2 %, siendo de esta manera la nación con mayores reservas en el mundo. En Sur y Centro América se cuenta con 4.1 % de las reservas mundiales de este recurso, siendo Venezuela el país que posee la mayor participación de las reservas en la zona, con un 3.0 % que equivale a 197.1 trillones de pies cúbicos. Colombia tiene una participación del 0.1 % de las reservas probadas mundiales, equivalente a 5.7 trillones de pies cúbicos [3].

En Colombia el gas natural es consumido por dos grandes grupos: el sector generación eléctrica y el sector no-generación eléctrica compuesto por refinerías, industria petroquímica, industria en general, consumo vehicular (gas natural comprimido) y el consumo hogares o residencial. Entre el año 1997 y el año 2014, el consumo general en Colombia se incrementó en un 74 %, entre 567 a 989 Millones de Pies Cúbicos Día (MPCD). En dicho periodo, el sector de generación eléctrica creció un 8 %, en contraste el sector de no-generación eléctrica creció en un 145 %; en este último grupo, el mayor incremento se presentó en el consumo vehicular con un 1414 % y en el sector residencial con un 327 % [4].

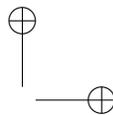
En el Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural 2016 [5], elaborado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), con el objetivo de evaluar el abastecimiento de gas natural en Colombia, se contrastan y combinan diferentes escenarios de oferta y demanda, considerando principalmente el crecimiento de la economía, la evolución de la población y el desempeño macro-económico del país. El resultado de los análisis muestra un déficit del recurso después del año 2024 en todas los escenarios combinados, entre 100 a 600 GBTUD (Giga British Thermal Unit Day), lo que equivale a entre 97 y 583 Millones de Pies Cúbicos Día (MPCD).

El desabastecimiento que se presenta en diversas regiones a nivel mundial generó que para el año 2014 se comercializaran en el mundo 663.9 billones de metros cúbicos por medio de gasoducto y 333.3 billones de metros cúbicos de GNL; siendo para la región de Sur y Centro América Brasil y Argentina los países de mayores importaciones vía gasoducto y Chile y Argentina los países de mayores importaciones de GNL [3].

Una vez dada una introducción al problema de abastecimiento de gas natural a nivel mundial y en Colombia, se muestra el impacto del marco político y regulatorio en cuanto al gas natural en el país.

1.1. Marco político y regulatorio del gas natural en Colombia

En el Artículo 365 del Capítulo 5 de la Constitución Política de Colombia (de la finalidad social del estado y de los servicios públicos) [6], se consideran los servicios públicos como inherentes a



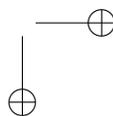
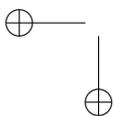
la finalidad social del Estado y es deber de este asegurar la prestación eficiente a todos los habitantes del territorio nacional; de igual manera, el Estado colombiano debe mantener la regulación, control y vigilancia de los servicios públicos, con el fin de garantizar el mejoramiento continuo en su prestación y la satisfacción de los intereses sociales.

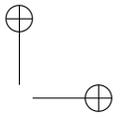
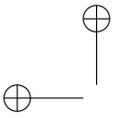
Como se mencionó, el país se expone a un déficit a partir del año 2024 (entre 100 a 600 GBTUD), dada esta condición de desabastecimiento de gas natural y la obligación del Estado a garantizar su suministro ininterrumpido, el Gobierno Nacional ha introducido y profundizado un marco legislativo entorno al desarrollo de su mercado, a través de la Ley 142 de 1994 [7]. Por medio de una combinación de mercado y política energética, el sector logró su consolidación no solo en algunos mercados locales, como los de la Costa Atlántica, Santander y Huila, sino en general a nivel nacional, llevando el gas natural a sitios alejados de los campos de producción, como el Valle del Cauca y el Norte de Santander.

Pese a esto, a la fecha el mercado de gas natural comienza a enfrentar dificultades, el sector padece dos problemas principales que impiden su desarrollo; por una parte, no tiene oferta comercial suficiente para suplir la demanda a largo plazo del sector térmico de generación de energía, de otro lado, no presta un servicio que garantice la confiabilidad del abastecimiento para los usuarios en el día a día, situaciones que ratifican que en la actualidad la oferta de gas natural no puede satisfacer la demanda en situaciones inestables, como por ejemplo ante la presencia de factores climáticos como el fenómeno de El Niño (presente en el país en los años 2015 y 2016) y en situaciones de contingencia por pérdida de capacidad en las redes de transporte y dada la creciente demanda en zonas no interconectadas. Esto ha derivado formas contractuales entre productores de gas, transportadores y generadores eléctricos, que distorsionan los propios principios del mercado e impiden una expansión concertada de la oferta de gas, pero también de la oferta de generación eléctrica.

La ausencia de una oferta económica en firme de gas natural para el sector térmico compromete la confiabilidad en el suministro eléctrico, aunque este problema se identificó en el año 2000 se ha agudizado en los últimos años, esto debido al aumento del consumo de otros sectores y las exportaciones a Venezuela desde el año 2007. Ante la ausencia de perspectiva de suministro de largo plazo, Colombia se encuentra entonces en la difícil situación de repartir la producción doméstica entre distintos sectores de consumo, sin que se cuente con una salida de política, de mercado o de regulación de corto plazo.

Ante la mencionada situación de escasez, una alternativa se encuentra en la asignación administrada de gas natural, por medio de la categorización de los usuarios en criterios de importancia en el abastecimiento. En Colombia el proceso de comercialización regulado por la CREG (Comisión de Regulación de Energía y Gas) a través de contratos de capacidad firme (se garantiza servicio de suministro de una cantidad máxima de gas natural sin interrupciones), con interrupciones (no se asume compromiso de continuidad en la entrega), y firmeza condicionada (se garantiza suministro sin interrupciones de una cantidad máxima de gas natural, excepto cuando se presentan condiciones de probable escasez), lo que ha dado un alto valor al lugar que el usuario ocupa en el reparto del recurso [8]. Este reparto administrado es una situación inusual y dificulta el desarrollo del sector a futuro. A esto se suma que el sector de gas natural también sufre de un alto grado de vulnerabilidad ante las interrupciones en otros elementos del sistema, por una parte el sistema de transporte, el





cual tiene limitaciones de interconexión (no se desarrolló en forma radial), y por otra el sistema de suministro, el cual cuenta en la actualidad con pocos campos productores.

Esta situación no es desconocida por las autoridades sectoriales, adicionalmente el Ministerio de Minas y Energía ha dado algunos lineamientos de política sobre el manejo de la oferta y la demanda de gas natural por medio del Decreto 2100 de 2011 [9], de los cuales se resaltan los siguientes:

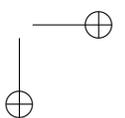
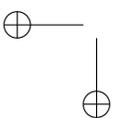
- Reglamentación del gas no convencional.
- Nuevas políticas de comercialización (mercado secundario, subastas de venta de corto plazo, entre otras).
- Gestión de la información operativa y comercial por medio de un nuevo agente institucional.
- Exportación de gas con criterio flexible.
- Construcción de una planta de regasificación en la Costa Atlántica (Cartagena, Bolívar).
- La posibilidad de autorizar inversiones en confiabilidad con una metodología que desarrollará la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG).

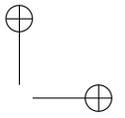
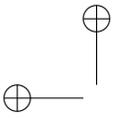
No obstante, estos lineamientos no están operando con la celeridad que se requiere y el país puede enfrentar un racionamiento de gas natural hacia el año 2024 [5], por lo cual es relevante para la nación analizar en qué radica la falta de confiabilidad, además de identificar las variables que pueden incrementarla según diversas alternativas factibles, para lo cual se debe contar con elementos de análisis, metodológicos y de reflexión acerca de los impactos que tiene sobre la política energética y la regulación, el incremento de la confiabilidad en el sector de gas natural, habida cuenta de que este problema se ha generalizado en América Latina, de la mano de los bajos niveles de reservas probadas en la región [3].

Mientras que la planificación de la expansión de los sistemas de abastecimiento y transporte de gas natural en Colombia se fundamenta en esquema integrado y bajo criterios de garantía de suministro ininterrumpido, el suministro del recurso en la realidad presenta alta complejidad, ya que es un sistema guiado por la maximización de beneficios y con actores de exploración, producción, transporte y comercialización no integrados [5]. La masificación del consumo de gas natural se realizó bajo estos criterios hasta la privatización de Ecogas (empresa transportadora) y la capitalización de Ecopetrol (empresa productora).

Por otra parte, las particularidades presentadas en la demanda de gas natural como respaldo para generación de electricidad, donde el gas opera como garantía de confiabilidad del sector eléctrico en años de sequía (cuando se presenta el fenómeno de El Niño), ha implicado formas contractuales entre productores de gas, transportadores y generadores eléctricos que distorsionan los propios principios del mercado e impiden una expansión concertada de la oferta de gas, pero también, como se mencionó, de la oferta de generación eléctrica.

Para el año 2010 ante el fenómeno de El Niño, el Sistema de Suministro Gas Natural presentó contratimientos para atender la demanda, en especial por los requerimientos del sector eléctrico, ya que





el gas natural funciona como respaldo para las termoeléctricas en la generación eléctrica frente a condiciones de baja hidrología [5]. Evaluadas las diferentes causas que originaron dicha situación el Gobierno Nacional de Colombia observó que la infraestructura de transporte presentaba déficit de capacidad y que las fuentes de gas natural (reservas) efectivamente venían en declive. Es así como el Gobierno Nacional, reorganizó el mercado del gas natural, cambiando su política de “masificación” por una de “aseguramiento del abastecimiento” y planteó como una estrategia el atraer inversión al sector para la búsqueda de más fuentes de abastecimiento, con el incentivo de permitir la exportación y el desarrollo de la infraestructura renumerándose vía tarifaria. A pesar de dichos incentivos, el Gobierno Nacional no obtuvo los resultados esperados, pues las reservas de gas natural siguieron disminuyendo sin adicionar nuevas reservas y exportando las ya conocidas.

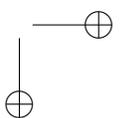
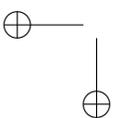
El sector del gas natural se encuentra ante la perspectiva de la pérdida de su autosuficiencia, debido a los pobres resultados de exploración y a los escasos descubrimientos de nuevas fuentes diferentes a las conocidas como la Guajira y Cuasina (en el periodo comprendido entre el año 2005 y el año 2014 se presentó una reducción promedio del 1.7 % de las reservas de gas natural [5]), junto con la dinámica del consumo, que convertiría al país de exportador en importador. Con el hallazgo de reservas de gas natural en la Guajira (que en años de mayor participación representaron el 85 % de las reservas del país [10]), el gobierno nacional se propuso masificar el uso de este combustible en los hogares colombianos, y remplazar el uso de combustibles líquidos como el cocinol. Esta política se extendió a otros sectores tales como el vehicular, el industrial y el eléctrico, este último usa el gas natural para respaldar la generación eléctrica en especial en épocas de baja hidrología que afecta el nivel de agua en las hidroeléctricas por sequía (cabe recordar que en el año 1992 el país sufrió un apagón eléctrico por este fenómeno y el gobierno se propuso respaldar el sistema eléctrico con las plantas térmicas).

En la actualidad se presentan restricciones en los contratos que requieren firmeza en el suministro de gas natural, estos contratos se negocian de manera interrumpible en especial para las termoeléctricas, debido a la poca holgura que permiten las reservas actuales atendiendo las prioridades establecidas por el Gobierno Nacional. Cabe resaltar que cualquier proyecto de desarrollo que requiera gas natural en la actualidad tiene dificultades para obtener este combustible, además de requerir no menos de seis años para su desarrollo, periodo para el cual ya se ha perdido la autosuficiencia según el Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural [11].

Dados los principales elementos del escenario mundial y nacional frente al abastecimiento del gas natural, se presenta el marco teórico en cuanto a los métodos planteados para la selección de alternativas de suministro del recurso; posteriormente, se aplica el modelo AHP para el caso colombiano basado en el juicio de expertos y, finalmente, se analizan los resultados obtenidos y se proponen trabajos futuros.

2. Marco teórico

Colombia cuenta con diversas alternativas orientadas a favorecer el abastecimiento ininterrumpido de gas natural, las cuales, por sus tiempos de ejecución y niveles de inversión, pueden resultar complejas de realizar en paralelo. Por esto se plantea como opción para priorizar los proyectos en



pro de atender la demanda de este recurso, la aplicación del modelo AHP combinado con el método Delphi para la recolección de información.

2.1. Método Delphi

El método Delphi es una forma de obtener una opinión colectiva de los individuos sobre temas en los que no se cuenta con información suficiente o histórica; consiste en un ejercicio de cuestionario iterativo con retroalimentación controlada a un grupo de expertos (cualquier persona con conocimiento y experiencia relevantes de un tema en particular), aplicado de manera individual. Para la selección del tamaño del panel de experto se debe considerar el costo y el tiempo de desarrollo de las rondas. Su aplicación se relaciona particularmente a problemas que son complejos y requieren interpretación intuitiva. Su proceso requiere al menos una encuesta de tres iteraciones; el propósito de la iteración inicial es identificar cuestiones generales relacionadas con los diversos componentes del tema en estudio. Un cuestionario de preguntas abiertas se distribuye a un panel de expertos y líderes de opinión; posteriormente, las respuestas a las preguntas abiertas se analizan cualitativamente clasificando, categorizando y buscando temas comunes. Estas respuestas se editan y luego se utilizan para construir el segundo cuestionario; la segunda y siguientes rondas son más específicas, ya que se orientan a la calificación o clasificación de varios ítems y se analizan cuantitativamente. A medida que el investigador retroalimenta los resultados de las rondas anteriores, tiende a convergir hacia un consenso de opinión [12].

2.2. Modelo AHP

El modelo de Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés que corresponden a Analytic Hierarchy Process), es un método basado en preferencias en el cual se definen criterios de decisión y sus pesos por medio de matrices; posteriormente, se determina el ranking de una serie de alternativas de clasificación que se comparan entre sí con respecto a los criterios definidos. Este procedimiento se repite teniendo en cuenta todos los criterios; la suma ponderada de estos valores indica las alternativas dominantes y por lo tanto la clasificación de los mismos [13].

La metodología del modelo considera los siguientes pasos [14]:

- Paso 1: el problema se descompone jerárquicamente en objetivos o metas, criterios, y alternativas. Esta relación se plantea por niveles y de esta manera se busca que todos los elementos queden interconectados, al menos de manera indirecta. La Figura 1 muestra una estructura jerárquica general.

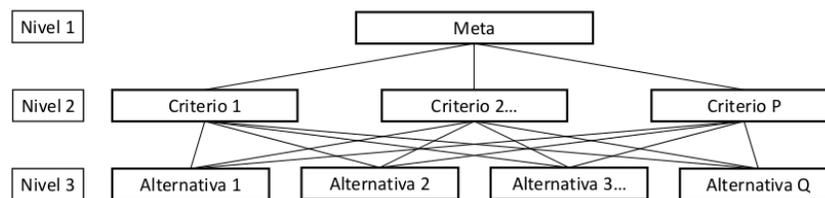


Figura 1. Estructura general para el modelo AHP

- Paso 2: se recolectan datos de expertos o responsables de la toma de decisiones correspondientes a la estructura jerárquica definida en el primer paso. Se realiza una comparación por pares de alternativas en una escala cualitativa como se muestra en la Tabla I [13].

Tabla I. Escala de preferencia

Opción	Valor numérico
Ambos criterios tienen la misma importancia	1
Un criterio es modernamente más importante que los otros (preferencia débil)	3
Un criterio es más importante que los otros	5
Un criterio es mucho más importante que los otros	7
Un criterio es extremadamente más importante que los otros	9
Valores intermedios	2-4-6-8

- Paso 3: las comparaciones por pares de los criterios generados en el segundo paso se organizan en una matriz cuadrada. Los elementos diagonales de la matriz son 1. El criterio en la i -ésima fila será mejor que el criterio en la j -ésima columna si el valor del elemento (i, j) es mayor que 1; de lo contrario el criterio de la j -ésima columna es mejor que el de la i -ésima fila. El elemento (i, j) de la matriz es el recíproco del elemento (j, i) .
- Paso 4: el autovalor principal (eigenvalue) y el autovector (eigenvector) normalizado correspondiente de la matriz de comparación, dan la importancia relativa de los diversos criterios que se comparan. Los elementos del autovector normalizado se denominan ponderaciones con respecto a los criterios y calificaciones con respecto a las alternativas.
- Paso 5: se evalúa la consistencia de la matriz de orden n . Las comparaciones realizadas por este método son subjetivas y el modelo AHP puede tolerar la inconsistencia a través de la cantidad de redundancia. Si este índice de consistencia no alcanza un nivel requerido, los resultados de las comparaciones deben ser reevaluados. El índice de consistencia CI , se calcula con base en la Ecuación 1, donde λ_{max} es el autovalor máximo de la matriz. Este CI se puede comparar con el de una matriz aleatoria, RI planteada por Saaty [15] y como se muestra en la Tabla II. La razón derivada CI/RI , se denomina relación de consistencia CR . Saaty sugiere que el valor de CR debe ser menor que 0,1 (10%).

$$CI = (\lambda_{max} - n) / (n - 1) \quad (1)$$

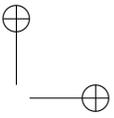
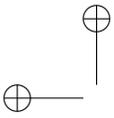
Tabla II. Matriz aleatoria

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	0.58	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

- Paso 6: la calificación de cada alternativa se agrega para obtener calificaciones locales con respecto a cada criterio. Las calificaciones locales se multiplican por los pesos de los criterios y se agregan para obtener calificaciones globales.

El modelo AHP ha sido aplicado en diversos escenarios en la toma de decisiones como lo son [14]:

- Selección de una alternativa a partir de un conjunto de alternativas.



- Priorización de un conjunto de alternativas.
- Asignación de recursos para encontrar la mejor combinación de alternativas sujetas a una variedad de restricciones.
- Benchmarking de procesos o sistemas.
- Gestión de la calidad.

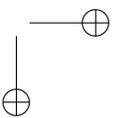
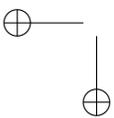
Algunas áreas de aplicación se encuentran en salud, planificación de proyectos y tecnológica, comercialización, fijación de precios de nuevos productos, proyección económica, evaluación de políticas, ciencias sociales, análisis de conflictos, investigación de operaciones militares, planeación urbana, gestión de I+D, exploración espacial, entre otros [14].

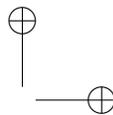
2.3. Aplicación del modelo AHP en la evaluación de alternativas energéticas

Dentro de los modelos AHP aplicados en la evaluación de fuentes energéticas se encuentra [16], en el cual plantean como objetivo la selección de la mejor política energética bajo los criterios tecnológicos, ambientales, sociopolíticos, económicos y evaluando las alternativas de producción como lo son biomasa, hidroeléctrica, geotérmica, eólico y solar. En [17], el objetivo se centra en identificar el mejor recurso renovable para la generación de electricidad en Malasia, considerando criterios como el técnico, el económico, el social y el ambiental para las alternativas de generación hidroeléctrica, solar, eólica y biomasa. Se presenta en [18] como objetivo la selección de la mejor energía renovable, con criterios de calidad de la fuente energética, ambiente socio político, económico, tecnología y medio ambiente para las alternativas hidroeléctrica, geotérmica, biomasa, eólica y solar.

Con respecto a los modelos aplicados en la selección de tecnología, en [19] se buscan priorizar las tecnologías en energía con respecto a los altos precios del petróleo bajo criterios de economía en spin-off, posibilidad de comercialización, capacidad interior, elementos técnicos en spin-off; lo anterior con alternativas de tecnología de la construcción, tecnología de la industria, tecnología de transporte, tecnología de mitigación de la huella de carbono, tecnología no convencional y tecnología de biomasa. En [20] se plantea el objetivo de priorizar la construcción de estaciones de recarga para vehículos eléctricos con criterios de ambiente urbano, grupo usuario, impacto en la red eléctrica local, factores económicos del proyecto, geografía regional para las alternativas de áreas funcionales de la ciudad y ventanas de atención de dichas estaciones. Por su parte, en [21] aplican un modelo para definir los proyectos de generación de energía híbridos que utilizan fuentes alternativas de energía renovable, en los criterios de aspectos técnico-económicos y aspectos socio-ambientales, evaluando características de la tecnología a implementar.

Otros modelos aplicados en energía como el desarrollado en [22], donde se establece el objetivo de promover la conservación de energía en Jordania considerando criterios de demanda de energía básica, crecimiento económico, utilización de fuentes de energía renovables, con las alternativas de política de precios, reglamentación y legislación, capacitación, educación y calificación, incentivos financieros e investigación y desarrollo. En [23] plantean como objetivo la priorización de las barreras a la eficiencia energética en clusters industriales a pequeña escala, con criterios de





intensidad de la barrera, facilidad de eliminación de barreras, impacto de eliminación de barreras para la eficiencia energética, impacto de la eliminación de barreras en los resultados económicos; lo anterior teniendo en cuenta alternativas de sensibilización e información barreras, obstáculos financieros y económicos, barreras estructurales e institucionales, política y barreras regulatorias, comportamiento y barreras personales. [24] muestra como objetivo la importancia del criterio de la educación social en relación con la promoción de ahorro energético y reducción de carbono, observando los criterios de acciones positivas del gobierno, apoyo de unidades de educación social, ejecución de las actividades de educación y propaganda e integración con los recursos sociales.

En cuanto a las aplicaciones del modelo AHP en el sector energético, las presentadas en [16] y [18] se emplean para la selección de alternativas que garanticen el suministro energético, resaltando la posibilidad de ampliar esta aplicación al suministro de gas natural, por lo cual este artículo surge como una orientación para la identificación de alternativas que puedan impactar con mayor favorabilidad el suministro de este recurso empleando el modelo AHP.

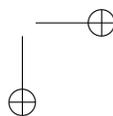
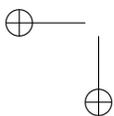
3. Metodología de aplicación del modelo AHP

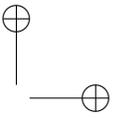
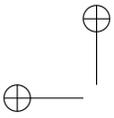
3.1. Elementos iniciales para la aplicación del modelo

La Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), como ente técnico, es responsable de la planeación y coordinación de las entidades del sector minero energético, tanto público como privado en Colombia, en el desarrollo y aprovechamiento de los recursos energéticos y mineros, mediante la generación y divulgación de la información relacionada con este sector. El estado colombiano por medio del Decreto 2345 de 2015 [25], presenta la evolución en la planeación y ejecución de la infraestructura del servicio público domiciliario de gas natural, y da el punto de partida para el desarrollo de proyectos de confiabilidad y de abastecimiento necesarios para asegurar la continuidad y seguridad en el suministro de gas natural en el país. En concordancia con esto, y en respuesta a sus funciones, la UPME presenta el Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural 2016 [5], por medio del cual identifica los proyectos necesarios a ejecutar en los próximos cinco años con el objeto de lograr los objetivos señalados en este último decreto. Con base en este plan, se establece que mediante la aplicación del modelo AHP se logra determinar la mejor opción para Colombia que permita mantener el abastecimiento continuo de gas natural bajo las condiciones actuales de oferta y demanda.

A partir de lo anterior, se aplicó el método Delphi a un grupo de expertos pertenecientes a Contraloría Delegada para el Sector de Minas y Energía de Colombia, en las siguientes rondas:

- Ronda 1: aplicación de cuestionario para la definición de criterios y alternativas del modelo, considerando el Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural 2016 [5] mencionado.
- Ronda 2: aplicación de cuestionario para la definición de la importancia relativa de los criterios y alternativas seleccionadas.
- Ronda 3: aplicación de segundo cuestionario para la definición de la importancia relativa de los criterios y alternativas seleccionadas, con el objetivo de ajustar la relación de consistencia del modelo AHP.





3.2. Criterios de selección para el modelo AHP

Los criterios resultantes se dividen en:

- Criterios técnicos.
- Criterios de confiabilidad.
- Criterios ambientales y sociales.

3.2.1. Criterios técnicos

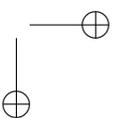
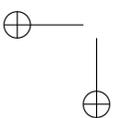
Los criterios técnicos contemplan las siguientes características:

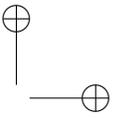
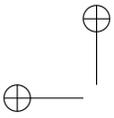
- El tiempo considerado para la entrada en operación de proyectos de regasificación es mínimo de seis años a partir de su etapa de planificación.
- El periodo de tiempo considerado para la comercialización del gas proveniente de nuevos hallazgos es mínimo de seis años a partir de la fecha de su descubrimiento.
- El periodo considerado para la entrada en operación de nuevos gasoductos es, como mínimo, tres años desde su etapa de proyección.
- El tiempo considerado para la entrada en operación de nuevas estaciones de compresión no será inferior a dos años a partir de su etapa de planificación.
- El sistema de transporte no deberá operar con presiones superiores a las presiones de diseño de los diferentes gasoductos.
- El sistema de transporte no deberá operar a capacidades de flujo superiores a la capacidad de diseño de cada gasoducto.
- Las caídas de presión en los nodos de demanda no podrán estar por fuera del rango permitido en las condiciones de diseño de cada gasoducto.
- Las expansiones propuestas al sistema de transporte deberán acogerse a las especificaciones técnicas y de operación dispuestas por el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT) [26].

3.2.2. Criterios de confiabilidad

Los criterios de confiabilidad contemplan las siguientes características:

- Durante todo el periodo de planificación se debe garantizar el suministro para el 100 % de los sistemas de compresión, usuarios residenciales y pequeños usuarios comerciales.
- En ningún año del periodo de planificación se debe tener un déficit de suministro que supere el 2 % de la máxima demanda promedio mensual.





- Se debe contar con la infraestructura necesaria para atender el 100 % de la demanda regulada en ciudades o grupos de ciudades con un número de usuarios superior a un millón (mercados geográficos), ante eventos de interrupción de hasta tres días en el suministro, con una periodicidad no mayor a tres veces al año.
- La exportación de gas se podrá efectuar siempre que el factor calculado como la sumatoria de todas las reservas probadas de gas natural sobre la demanda de cada año, sea superior a siete años.

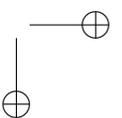
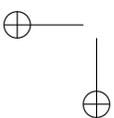
3.2.3. Criterios ambientales y sociales

Se considera la minimización de las consecuencias negativas para la sociedad colombiana en cuanto a la situación de abastecimiento e impacto ambiental de las alternativas evaluadas.

3.3. Alternativas de abastecimiento para el modelo AHP

Frente a un posible déficit de gas natural en Colombia, dentro de los planes de abastecimiento de este recurso se busca establecer una gama de alternativas para incrementar el suministro, buscando resolver las dificultades en el suministro resultantes tanto de la falta de reservas probadas, como de infraestructura para el transporte a las diferentes zonas de consumo del país. Las siguientes son las alternativas resultantes a considerar en el modelo AHP:

- Construcción loop campo la Creciente-Cartagena.
- Construcción tramo Porvenir-Belleza.
- Construcción tramo Cusiana-Apiay.
- Construcción tramo y compresión Belleza-Vasconia.
- Bidireccional Cartagena-Barranquilla.
- Construcción loop Alvarado Piedras-Gualanday.
- Construcción loop Mariquita-Alvarado Piedras.
- Compresión Cartagena-Barranquilla.
- Bidireccional e interconexión gasoducto Ballena-Barrancabermeja.
- Planta de almacenamiento Bogotá.
- Construcción tramo Buenaventura-Cali.
- Planta de Regasificación del Pacífico.
- Bidireccional de transporte Cali-Manizales.



Los criterios y alternativas descritas para el abastecimiento de gas natural en Colombia, se muestran bajo la estructura AHP en la Figura 2.

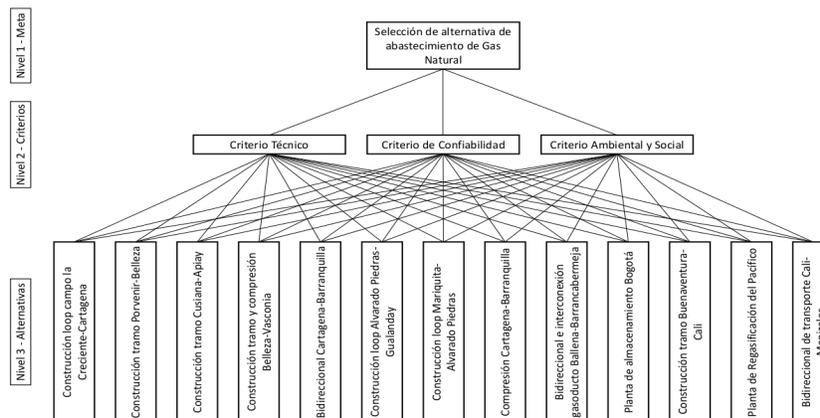


Figura 2. Estructura AHP para el análisis de selección de alternativa de abastecimiento

4. Resultados

4.1. Identificación de criterios y alternativas en el modelo AHP

Los criterios empleados en el desarrollo del modelo se etiquetaron desde la letra “A” hasta la letra “C” como se muestran en la Tabla III.

Las alternativas empleadas en el desarrollo del modelo se etiquetaron desde el número 1 al número 13 como se muestra en la Tabla IV.

Tabla III. Criterios

Item	Criterio
A	Técnico
B	Confiabilidad
C	Ambiental y social

Tabla IV. Alternativas empleadas

N ^o	Nombre de la alternativa
1	Construcción loop campo la Creciente-Cartagena
2	Construcción tramo Porvenir-Belleza
3	Construcción tramo Cusiana-Apiay
4	Construcción tramo y compresión Belleza-Vasconia
5	Bidireccional Cartagena-Barranquilla
6	Construcción loop Alvarado Piedras-Gualanday
7	Construcción loop Mariquita-Alvarado Piedras
8	Compresión Cartagena-Barranquilla
9	Bidireccional e interconexión gasoducto Ballena-Barrancabermeja
10	Planta de almacenamiento Bogotá
11	Construcción tramo Buenaventura-Cali
12	Planta de Regasificación del Pacífico
13	Bidireccional de transporte Cali-Manizales

4.2. Cálculo de pesos alternativos para los criterios

El cálculo de los pesos alternativos para los criterios se muestra en la Tabla V.

Tabla V. Pesos alternativos para los criterios

Criterio	A	B	C	$\prod_{i=1}^3$	$(\prod_{i=1}^3)^{1/3}$	Pesos Alternativos
A	1	1/6	2	0.333	0.693	0.156
B	6	1	6	36.000	3.302	0.745
C	1/2	1/6	1	0.083	0.437	0.099
Total	7.500	1.333	9.000		4.432	1.000

El criterio que obtuvo el mayor de los pesos alternativos fue el criterio de confiabilidad, como se muestra en la Figura 3.

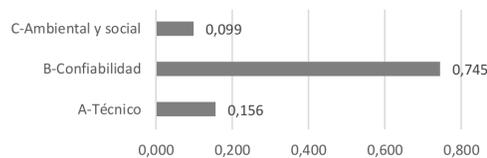


Figura 3. Pesos alternativos para los criterios

El análisis de consistencia para los criterios muestra un índice aleatorio por debajo del 10%, como lo recomienda Saaty [15] y se muestra en la Tabla VI.

Tabla VI. Consistencia de los criterios

Descripción	Valor
λ_{max}	3.054
Criterios (n)	3
Índice de Consistencia (CI)	0.027
Índice Aleatorio (RI)	0.580
Relación de Consistencia (CR)	4.62 %

4.3. Cálculo de pesos alternativos para el criterio técnico

El cálculo de los pesos alternativos para el criterio técnico se muestra en la Tabla VII.

Tabla VII. Cálculo de pesos alternativos para el criterio técnico

Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	$\prod_{i=1}^{13}$	$(\prod_{i=1}^{13})^{1/3}$	Pesos Alternativos
1	1	1/5	1/2	1/6	1	5	5	1/5	1/7	1/3	3	3	5	1.79E-01	0.876	0.054
2	5	1	2	1	1	8	8	3	2	5	2	2	6	4.61E+05	2.727	0.169
3	2	1/2	1	1/3	2	2	2	1/3	2	3	3	3	5	2.40E+02	1.524	0.094
4	6	1	3	1	4	9	9	3	2	2	2	2	6	1.68E+06	3.012	0.186
5	1	1	1/2	1/4	1	5	5	1	1	3	2	2	2	7.50E+01	1.394	0.086
6	1/5	1/8	1/2	1/9	1/5	1	1	1/7	1/3	1/2	1/4	1/4	1	4.13E-07	0.323	0.020
7	1/5	1/8	1/2	1/9	1/5	1	1	1/7	1/3	1/2	1/4	1/4	1	4.13E-07	0.323	0.020
8	5	1/3	3	1/3	1	7	7	1	2	2	1	1	2	6.53E+02	1.646	0.102
9	7	1/2	1/2	1/2	1	3	3	1/2	1	4	1/2	1/2	1	3.94E+00	1.111	0.069
10	3	1/5	1/3	1/2	1/3	2	2	1/2	1/4	1	1/2	1/2	1/2	2.08E-03	0.622	0.038
11	1/3	1/2	1/3	1/2	1/2	4	4	1	2	2	1	1	2	1.78E+00	1.045	0.065
12	1/3	1/2	1/3	1/2	1/2	4	4	1	2	2	1	1	3	2.67E+00	1.078	0.067
13	1/5	1/6	1/5	1/6	1/2	1	1	1/2	1	2	1/2	1/3	1	9.26E-05	0.489	0.030
Total	31.267	6.150	12.700	5.472	13.233	52.000	52.000	12.319	16.060	27.333	17.000	16.833	35.500		16.171	1.000

La alternativa que desde el punto de vista del criterio técnico obtuvo el mayor de los pesos alternativos, fue la construcción tramo y compresión Belleza-Vasconia como se muestra en la Figura 4.

Selection of Alternatives for the Natural Gas Supply in Colombia Using the Analytic Hierarchy Process

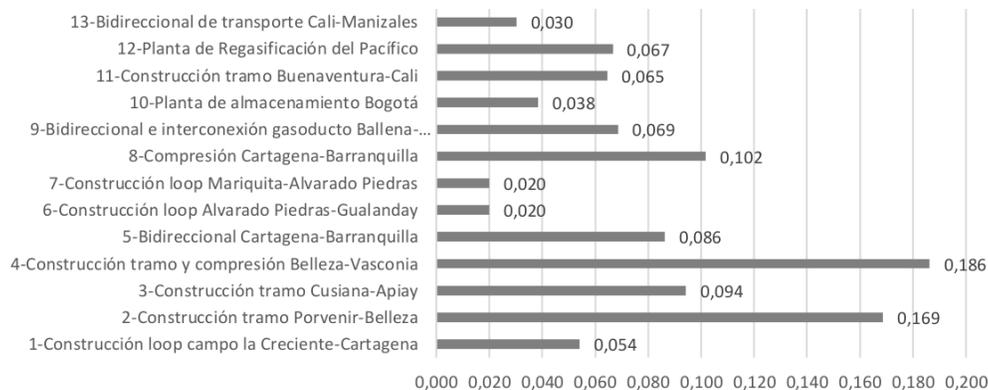


Figura 4. Pesos alternativos para el criterio técnico

El análisis de consistencia para las alternativas considerando el criterio técnico, muestra un índice aleatorio por debajo del 10 % como se observa en la Tabla VIII.

Tabla VIII. Consistencia de las alternativas para el criterio técnico

Descripción	Valor
λ_{max}	14.868
Alternativas (n)	13
Índice de Consistencia (CI)	0.156
Índice Aleatorio (RI)	1.560
Relación de Consistencia (CR)	9.98 %

4.4. Cálculo de pesos alternativos para el criterio confiabilidad

El cálculo de los pesos alternativos para el criterio confiabilidad se muestra en la Tabla IX.

Tabla IX. Cálculo de pesos alternativos para el criterio confiabilidad

Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	$\prod_{i=1}^{13}$	$(\prod_{i=1}^{13})^{1/3}$	Pesos Alternativos
1	1	2	1/2	1	5	4	4	2	1/3	1/5	1/3	1/3	2	2.37E+00	1.069	0.063
2	1/2	1	1/2	3	3	5	5	3	3	1/4	1/5	1/5	2	1.01E+01	1.195	0.070
3	2	2	1	4	2	5	5	2	1	1/3	1/4	1/4	2	6.67E+01	1.381	0.081
4	1	1/3	1/4	1	1	2	2	2	1/3	1/2	1/4	1/4	2	1.39E-02	0.720	0.042
5	1/5	1/3	1/2	1	1	3	3	1	1	1/3	1/4	1/4	2	1.25E-02	0.714	0.042
6	1/4	1/5	1/5	1/2	1/3	1	1	1/2	1/3	1/5	1/7	1/7	1/2	5.67E-07	0.331	0.019
7	1/4	1/5	1/5	1/2	1/3	1	1	1/2	1/3	1/5	1/7	1/7	1/2	5.67E-07	0.331	0.019
8	1/2	1/3	1/2	1/2	1	2	2	1	1	1/4	1/5	1/5	2	3.33E+03	0.645	0.038
9	3	1/3	1	3	1	3	3	1	1	1/2	1/3	1/3	2	3.00E+00	1.088	0.064
10	5	4	3	2	3	5	5	4	2	1	1/2	1/2	2	3.60E+04	2.241	0.132
11	3	5	4	4	4	7	7	5	3	2	1	1	3	4.23E+06	3.234	0.191
12	3	5	4	4	4	7	7	5	3	2	1	1	7	9.88E+06	3.452	0.203
13	1/2	1/2	1/2	1/2	1/2	2	2	1/2	1/2	1/2	1/3	1/7	1	7.44E-04	0.575	0.034
Total	20.200	21.233	16.150	25.000	26.167	47.000	47.000	27.500	16.833	8.267	4.936	4.745	28.000		16.975	1.000

La alternativa que desde el punto de vista del criterio confiabilidad obtuvo el mayor de los pesos alternativos, fue la planta de regasificación del Pacífico como se muestra en la Figura 5.

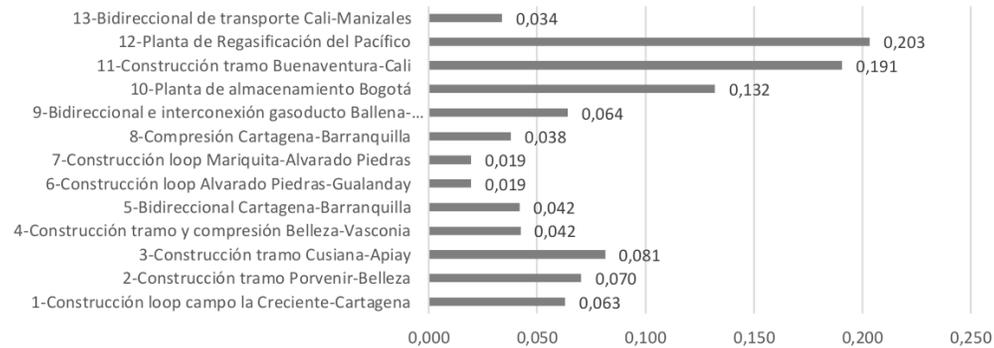


Figura 5. Pesos alternativos para el criterio confiabilidad

El análisis de consistencia para las alternativas considerando el criterio confiabilidad, muestra un índice aleatorio por debajo del 10 % como se observa en la Tabla X.

Tabla X. Consistencia de las alternativas para el criterio confiabilidad

Descripción	Valor
λ_{max}	14.141
Alternativas (n)	13
Índice de Consistencia (CI)	0.095
Índice Aleatorio (RI)	1.560
Relación de Consistencia (CR)	6.09 %

4.5. Cálculo de pesos alternativos para el criterio ambiental y social

El cálculo de los pesos alternativos para el criterio ambiental y social se muestra en la Tabla XI.

Tabla XI. Cálculo de pesos alternativos para el criterio ambiental y social

Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	$\prod_{i=1}^{13}$	$(\prod_{i=1}^{13})^{1/3}$	Pesos Alternativos
1	1	6	4	3	1/4	1	1	1/4	1/5	2	3	3	1/2	8.10E+00	1.175	0.067
2	1/6	1	1	1	1/5	1/3	1/3	1/8	1/6	1	1	1	1/3	2.57E-05	0.444	0.025
3	1/4	1	1	1	1/5	1/3	1/3	1/8	1/6	1	1	1	1/3	3.86E-05	0.458	0.026
4	1/3	1	1	1	1/5	1/3	1/3	1/8	1/6	1	1	1	1/3	5.14E-05	0.468	0.027
5	4	5	5	5	1	3	3	1	1	4	4	4	1	2.88E+05	2.630	0.151
6	1	3	3	3	1/3	1	1	1/8	1/6	1	1	1	1/3	6.25E-02	0.808	0.046
7	1	3	3	3	1/3	1	1	1/8	1/6	1	1	1	1/3	6.25E-02	0.808	0.046
8	4	8	8	8	1	8	8	1	1	4	4	4	1	8.39E+06	3.409	0.196
9	5	6	6	6	1	6	6	1	1	4	4	4	1	2.49E+06	3.105	0.178
10	1/2	1	1	1	1/4	1	1	1/4	1/4	1	1	1	1/5	1.56E-03	0.608	0.035
11	1/3	1	1	1	1/4	1	1	1/4	1/4	1/4	1	1	1/5	1.04E-03	0.590	0.034
12	1/3	1	1	1	1/4	1	1	1/4	1/4	1	1	1	1/5	1.04E-03	0.590	0.034
13	2	3	3	3	1	3	3	1	1	5	5	5	1	16.08E+04	2.333	0.134
Total	19.917	40.000	38.000	37.000	6.267	27.000	27.000	5.625	5.783	27.000	28.000	28.000	6.767		17.424	1.000

La alternativa que desde el punto de vista del criterio ambiental y social obtuvo el mayor de los pesos alternativos, fue la compresión Cartagena-Barranquilla como se muestra en la Figura 6.

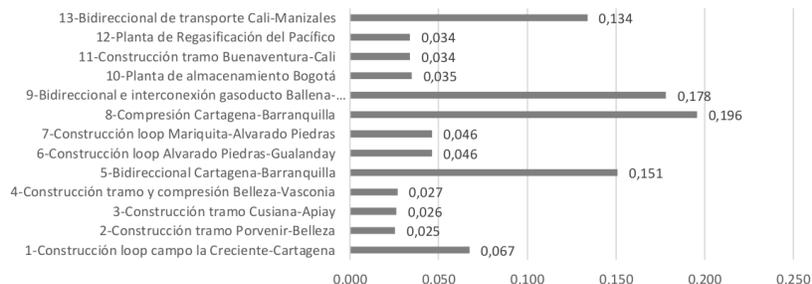


Figura 6. Pesos alternativos para el criterio ambiental y social

El análisis de consistencia para las alternativas considerando el criterio ambiental y social, muestra un índice aleatorio por debajo del 10 % como se observa en la Tabla XII.

Tabla XII. Consistencia de las alternativas para el criterio ambiental y social

Descripción	Valor
λ_{max}	13.677
Alternativas (n)	13
Índice de Consistencia (CI)	0.056
Índice Aleatorio (RI)	1.560
Relación de Consistencia (CR)	3.62 %

4.6. Selección de la mejor alternativa

Como resumen de los cálculos para todas las alternativas, se tienen los pesos alternativos para cada criterio como se muestra en la Tabla XIII.

Tabla XIII. Valores alternativos para los criterios

Criterios / Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Total
A	0.054	0.169	0.094	0.186	0.086	0.020	0.020	0.102	0.069	0.038	0.065	0.067	0.030	1.000
B	0.063	0.070	0.081	0.042	0.042	0.019	0.019	0.038	0.064	0.132	0.191	0.203	0.034	1.000
C	0.067	0.025	0.026	0.027	0.151	0.046	0.046	0.196	0.178	0.035	0.034	0.034	0.134	1.000

Considerando el peso de cada criterio y los obtenidos en el cálculo de las alternativas, se obtienen los valores ponderados como se muestra en la Tabla XIV.

Tabla XIV. Valores ponderados para las alternativas

Pesos de los Criterios / Criterios / Alternativas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
0.156 A	0.008	0.026	0.015	0.029	0.013	0.003	0.003	0.016	0.011	0.006	0.010	0.010	0.005
0.745 B	0.047	0.052	0.061	0.032	0.031	0.015	0.015	0.028	0.048	0.098	0.142	0.151	0.025
0.099 C	0.007	0.003	0.003	0.003	0.015	0.005	0.005	0.019	0.018	0.003	0.003	0.003	0.013
Total	0.062	0.081	0.078	0.063	0.060	0.022	0.022	0.064	0.076	0.108	0.155	0.165	0.043

Según el análisis realizado mediante la aplicación del método AHP, la mejor alternativa para garantizar el abastecimiento de gas natural en Colombia, considerando los criterios técnicos, de confiabilidad, ambientales y sociales, es la planta de regasificación del Pacífico seguida por la construcción tramo Buenaventura-Cali, como se muestra en la Figura 7.

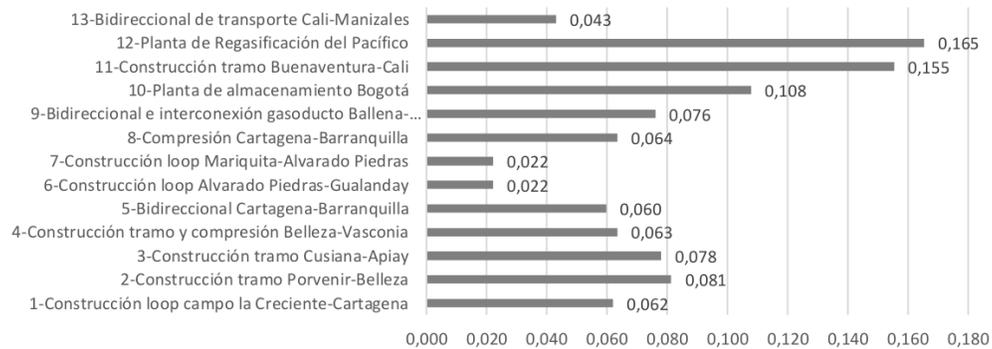


Figura 7. Valores ponderados para las alternativas

En resumen, y como resultado de la aplicación del modelo AHP a las alternativas políticamente viables para el abastecimiento de gas natural en Colombia, se encuentra un mayor peso alternativo en el criterio de confiabilidad, del cual se deriva un mayor peso en la alternativa de la construcción de la planta de regasificación del Pacífico, tanto en la evaluación de los criterios como en la evaluación final de las alternativas (ver Tabla XV).

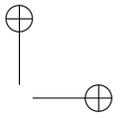
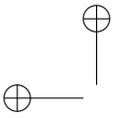
Tabla XV. Resumen de la aplicación del modelo AHP

Ítem	Criterio	Peso alternativo	N ⁰	Alternativa	Peso alternativo en la evaluación de criterios	Peso alternativo en la evaluación de alternativas
A	Técnico	0.156	4	Construcción tramo y compresión Belleza-Vasconia	0.186	0.063
B	Confiabilidad	0.745	12	Planta de Regasificación del Pacífico	0.203	0.165
C	Ambiental y social	0.099	8	Compresión Cartagena-Barranquilla	0.196	0.064

5. Conclusiones y discusión

A partir del trabajo desarrollado en este artículo, se encuentra un creciente interés de la comunidad académica en la aplicación de modelos AHP en el sector energético como una herramienta para la toma de decisiones de especial utilidad en la selección de tecnologías para en la generación, el suministro y la confiabilidad del recurso.

Frente a alternativas para el suministro de gas natural en Colombia que involucran recursos financieros y tiempos para su implementación, la aplicación de modelos como el propuesto en este artículo, brindan elementos a los tomadores de decisiones en la priorización en la asignación de los recursos públicos como indicativo para la implementación de este tipo de infraestructura.



Colombia debe diversificar el suministro de gas natural, considerando el nivel de reservas con el que cuenta, la capacidad de producción y de transporte actual; adicionalmente, el gas natural sirve de alternativa y respaldo para la generación termoeléctrica que depende en su mayoría de fuentes hídricas, las cuales presentan alta variabilidad debido a fenómenos periódicos como El Niño. Por ello, se deben destinar esfuerzos entorno a la investigación sobre estos aspectos.

El resultado luego de aplicar el modelo AHP, da como criterio principal la confiabilidad, es decir, el país debe privilegiar los activos de flexibilidad que maximicen las condiciones de firmeza en la oferta de gas natural, y en ese mismo orden de ideas las plantas de Regasificación se presentan como las mejores alternativas frente a los activos de confiabilidad y con respecto al criterio ambiental y social, la mejor alternativa es la compresión en Cartagena y Barranquilla, lo que podría indicar que los esfuerzos se deben orientar al desarrollo de la infraestructura alrededor de la importación de gas natural.

Frente a las otras alternativas presentadas, el modelo indica que se debe priorizar la inversión en infraestructura que permita la importación de GLP (gas licuado del petróleo), ya que esto puede resultar de gran favorabilidad por el nivel de reservas de países vecinos y el aumento en la capacidad de suministro al sistema de transporte de gas natural hacia el interior del país que esto representa; pero en este aspecto se debe considerar el tiempo de implementación de este tipo de proyectos, tiempo que puede resultar riesgoso dado los niveles decrecientes de reservas nacionales, siendo entonces de interés revisar proyectos que aunque no obtuvieron las ponderaciones más altas en la aplicación del modelo, sí podrían implementarse con mayor rapidez.

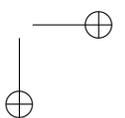
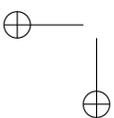
En relación con lo anterior, una de las alternativas relevante para garantizar el suministro de gas natural a Colombia son las importaciones desde Venezuela; sin embargo, esto está condicionada a la voluntad política, lo que se convierte en un riesgo geopolítico el cual debe ser atenuado y por ende las plantas de regasificación ubicadas en las costas Colombianas surgen como la mejor opción para la importación desde países como Trinidad y Tobago.

Las alternativas analizadas no consideran proyectos de exploración en búsqueda de nuevas reservas probadas de gas natural en el país, es acá donde debería considerarse la implementación de políticas por parte del Estado para incentivar a la industria privada a adelantar este tipo de proyectos, que resultando en su mayoría de mediano y largo plazo, podrían aportar mayor confianza en el suministro y estabilidad en el mercado.

6. Trabajos futuros

En los criterios incluidos no se considera uno relacionado con la inversión necesaria para el desarrollo de los proyectos de infraestructura del sistema de suministro de gas natural, lo cual se puede soportar en un análisis de mayor profundidad con estudios de respaldo que faciliten el establecimiento de las preferencias con base en un criterio asociado al mínimo costo.

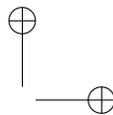
La aplicación del modelo AHP puede mezclarse con técnicas de simulación que permitan, de



manera prospectiva, estudiar el impacto en el tiempo que tiene la priorización de la inversión en los proyectos estudiados, permitiendo analizar con mayor amplitud las variables involucradas, sirviendo como contraste a las hipótesis planteadas y dando mayor soporte para la toma de decisiones.

Referencias

- [1] Y. Demirel, *Energy: Production, Conversion, Storage, Conservation, and Coupling*, vol. 69. 2012. ↑191
- [2] International Gas Union and Eurogas, *The Role of Natural Gas in a Sustainable Energy Market*. 2010. ↑192
- [3] British Petroleum, *Primary energy consumption - leading countries* 2014. 2015. ↑192, 194
- [4] Sistema de Información de Petróleo y Gas Colombiano (SIPG), *Demanda de Gas Natural*. 2016. ↑192
- [5] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), *Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural 2016*. 2016. ↑192, 194, 195, 199
- [6] Gobierno de la República de Colombia, *Constitución Política de Colombia*. 1991. ↑192
- [7] R. de C. Congreso de Colombia, *Ley 142 de 1994*. 1994. ↑193
- [8] Ministerio de Minas y Energía, *Resolución 089-2013*. 2013. ↑
- [9] Ministerio de Minas y Energía, *Decreto 2100*. 2011. ↑194
- [10] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), *La Cadena del Gas Natural en Colombia*. 2006. ↑195
- [11] Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), *Plan Indicativo de Abastecimiento de Gas Natural*. 2015. ↑195
- [12] S. Thangaratnam and C. W. Redman, “The Delphi technique”. *Obstet. Gynaecol.*, vol. 7, no. 2, pp. 120–125, 2005. ↑196
- [13] N. Munier, *A Strategy for Using Multicriteria Analysis in Decision-Making*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2011. ↑196, 197
- [14] R. Navneet, Bhushan; Kanwal, “The Analytic Hierarchy Process”. in *Strategic Decision Making*, London: Springer-Verlag London, 2004, pp. 1–11. ↑196, 197, 198
- [15] T. L. Saaty, “A scaling method for priorities in hierarchical structures”. *J. Math. Psychol.*, vol. 15, no. 3, pp. 234–281, Jun. 1977. ↑197, 203
- [16] C. Kahraman, İ. Kaya, and S. Cebi, “A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process”. *Energy*, vol. 34, no. 10, pp. 1603–1616, Oct. 2009. ↑198, 199
- [17] S. Ahmad and R. M. Tahar, “Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia”. *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 458–466, Mar. 2014. ↑198
- [18] A. Tasri and A. Susilawati, “Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia”. *Sustain. Energy Technol. Assessments*, vol. 7, pp. 34–44, Sep. 2014. ↑198, 199
- [19] S. K. Lee, G. Mogi, and J. W. Kim, “Decision support for prioritizing energy technologies against high oil prices: A fuzzy analytic hierarchy process approach”. *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 6, pp. 915–920, Nov. 2009. ↑198
- [20] B. Li and X. Chang, “Application of Analytic Hierarchy Process in the Planning of Energy Supply Network for Electric Vehicles”. *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 1083–1089, 2011. ↑198
- [21] D. Hernández-Torres, A. J. Urdaneta Urdaneta, and P. De Oliveira-De Jesus, “A hierarchical methodology for the integral net energy design of small-scale hybrid renewable energy systems”. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 52, pp. 100–110, 2015. ↑198
- [22] M. M. Kablan, “Decision support for energy conservation promotion.”. *Energy Policy*, vol. 32, no. 10, pp. 1151–1158, Jul. 2004. ↑198
- [23] N. Nagesha and P. Balachandra, “Barriers to energy efficiency in small industry clusters: Multi-criteria- based prioritization using the analytic hierarchy process”. *Energy*, vol. 31, no. 12, pp. 1969–1983, Sep. 2006. ↑198
- [24] Y.-T. Tung et al., “Analytic Hierarchy Process of Academic Scholars for Promoting Energy Saving and Carbon Reduction in Taiwan”. *Procedia Environ. Sci.*, vol. 20, pp. 526–532, 2014. ↑199
- [25] Ministerio de Minas y Energía, *Decreto 2345*. 2015. ↑199
- [26] Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG), *Resolución 071 Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT)*. 1999. ↑200



Mauricio Becerra Fernández

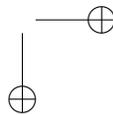
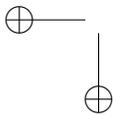
Ingeniero de Producción y Tecnólogo en Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magister en Ingeniería Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; doctor (c) en Modelado en Política y Gestión Pública, Universidad Jorge Tadeo Lozano de Bogotá; y PhD. (c) in Model Based Public Planning, Policy Design and Management de la Universidad de Palermo, Italia; se desempeña como profesor e investigador en las áreas de Logística, Producción, Modelado y Simulación en la Universidad Católica de Colombia, director del Grupo de investigación en Producción GIP.

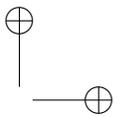
Correo electrónico: mbecerra@ucatolica.edu.co, mauriobecerrafernandez@gmail.com

Ricardo Rodríguez Yee

Ingeniero Industrial, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en ingeniería Industrial, Universidad de los Andes; máster en Gestión de Organizaciones, Université du Québec de Québec, Canada; doctor (c) en Modelado en Política y Gestión Pública en la Universidad Jorge Tadeo Lozano de Bogotá, Colombia, y PhD. (c) in Model Based Public Planning, Policy Design and Management de la Universidad de Palermo, Italia; se ha desempeñado como Viceministro de Energía e Hidrocarburos, director de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) de Colombia; asesor del Jefe de Estado Mayor del Ejército Nacional y del Comandante General de las Fuerzas Militares de Colombia en temas de Inversión, asesor del Despacho del Viceministerio de Minas y Energía, del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en temas de Combustibles y de la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios (SSPD) de Colombia; actualmente se desempeña como Contralor Delegado para el Sector Minas y Energía de la Contraloría General de la República.

Correo electrónico: ricardo.rodriquezy@contraloria.gov.co, ricardo.rodriquezy@utadeo.edu.co





Research

Spectral Estimation of UV-Vis Absorbance Time Series for Water Quality Monitoring

Estimación Espectral de Series de Tiempo de Absorbancia UV-Vis para el Monitoreo de Calidad de Aguas

Leonardo Plazas-Nossa^{*1}, Miguel A. Ávila A.¹, Andres Torres²

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá - Colombia.

²Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá - Colombia.

*Correspondence: lplazasn@udistrital.edu.co

Recibido: 22/06/2016. Modificado: 20/01/2017. Aceptado: 20/02/2017.

Abstract

Context: Signals recorded as multivariate time series by UV-Vis absorbance captors installed in urban sewer systems, can be non-stationary, yielding complications in the analysis of water quality monitoring. This work proposes to perform spectral estimation using the Box-Cox transformation and differentiation in order to obtain stationary multivariate time series in a wide sense. Additionally, Principal Component Analysis (PCA) is applied to reduce their dimensionality.

Method: Three different UV-Vis absorbance time series for different Colombian locations were studied: (i) El-Salitre Wastewater Treatment Plant (WWTP) in Bogotá; (ii) Gibraltar Pumping Station (GPS) in Bogotá; and (iii) San-Fernando WWTP in Itagüí. Each UV-Vis absorbance time series had equal sample number (5705). The estimation of the spectral power density is obtained using the average of modified periodograms with rectangular window and an overlap of 50 %, with the 20 most important harmonics from the Discrete Fourier Transform (DFT) and Inverse Fast Fourier Transform (IFFT).

Results: Absorbance time series dimensionality reduction using PCA, resulted in 6, 8 and 7 principal components for each study site respectively, altogether explaining more than 97 % of their variability. Values of differences below 30 % for the UV range were obtained for the three study sites, while for the visible range the maximum differences obtained were: (i) 35 % for El-Salitre WWTP; (ii) 61 % for GPS; and (iii) 75 % for San-Fernando WWTP.

Conclusions: The Box-Cox transformation and the differentiation process applied to the UV-Vis absorbance time series for the study sites (El-Salitre, GPS and San-Fernando), allowed to reduce variance and to eliminate tendency of the time series. A pre-processing of UV-Vis absorbance time series is recommended to detect and remove outliers and then apply the proposed process for spectral estimation.

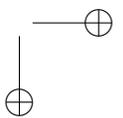
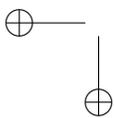
Keywords: Box-Cox Transformation, Periodogram, Principal Components Analysis, Power spectral density, Stationarity, UV-Vis sensor.

Language: Spanish



Citación: L. Plazas, M.A. Ávila, A. Torres, "Spectral Estimation of UV-Vis Absorbance Time Series for Water Quality Monitoring" INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 211-225, 2017.

©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.2.a03>



Resumen

Contexto: Las señales registradas como de series de tiempo por sensores de espectrometría UV-Vis en diferentes instalaciones de saneamiento urbano, pueden ser no estacionarias, lo cual complica el análisis del monitoreo de la calidad del agua. Este trabajo propone realizar la estimación espectral aplicando la transformación de Box-Cox y la diferenciación con el fin de obtener series de tiempo estacionarias en sentido amplio y reducir su dimensionalidad con base en el análisis de componentes principales (PCA, por sus siglas en inglés).

Método: La metodología se aplica a series de tiempo de absorbancia UV-Vis para tres sitios de estudio en Colombia: (i) Planta para el tratamiento de agua residual (PTAR) El-Salitre (Bogotá); (ii) Estación de Bombeo Gibraltar (EBG) (Bogotá); y (iii) Planta para el tratamiento de agua residual (PTAR) San-Fernando (Itagüí). Las series de tiempo de absorbancia UV-Vis se registran con igual tamaño de 5705 muestras. Se realiza la estimación de la densidad espectral mediante el promedio de periodogramas modificados con ventana rectangular con un traslape del 50 %, utilizando en el procedimiento DFT (Discrete Fourier Transform) e IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) con los veinte armónicos más relevantes.

Resultados: Al reducir la dimensionalidad de las series de tiempo de absorbancia con PCA, se obtienen para cada sitio de estudio seis, ocho y siete componentes principales respectivamente, explicando en conjunto más del 97 % de la variabilidad. Para los tres sitios de estudio, se obtuvieron valores de diferencias inferiores al 30 % para el rango UV, mientras que para el rango visible se obtiene máximas diferencias de: (i) 35 % para El-Salitre; (ii) 61 % para EBG; y (iii) 75 % para San-Fernando.

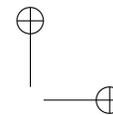
Conclusiones: Con la transformación de Box-Cox y el proceso de diferenciación aplicado a tres series de tiempo de absorbancia UV-Vis para los sitios propuestos de estudio, se logra reducir la varianza y se elimina la tendencia de las series de tiempo. Se recomienda realizar un pre-procesamiento de las series de tiempo de absorbancia UV-Vis para detectar y remover los valores extremos y posteriormente aplicar el proceso propuesto para la estimación espectral.

Palabras clave: Análisis por componentes principales, densidad espectral de potencia, estacionariedad, periodograma, sensor UV-Vis, transformación Box-Cox.

Idioma: Español

1. Introducción

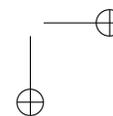
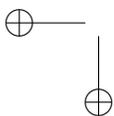
El ciclo natural del agua se altera y se transforma en el ciclo urbano del agua. En este ciclo urbano el agua se utiliza en los asentamientos humanos (ciudades pequeñas, medianas y grandes) y se devuelve al ambiente con una calidad inferior [1]–[3]. Las actividades humanas han generado procesos que cambian el ciclo natural del agua tales como: (i) el agua se retira de un curso superficial (ríos), de un sistema subterráneo (pozos profundos) y de embalses naturales o construidos; (ii) es transportada a las plantas de tratamiento con el fin de lograr un nivel de calidad que permite su distribución (agua tratada se transportará a los usuarios por medio de bombas, tuberías y almacenes); (iii) se utiliza para diversas actividades de consumo humano; (iv) es recogida y transportado a través de un sistema de alcantarillado (aguas residuales); y (v) se envía a una Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR), sometiéndola a diferentes procesos hasta llegar a un nivel de calidad que permite su retorno al medio ambiente [1]–[3]. Son posibles dos infraestructuras diferentes: sistema combinado o sistema separado [4], [5]. En el sistema combinado, el agua de lluvia y el agua residual utilizan el mismo sistema. En tiempo seco, todo el flujo es transportado y tratado en la PTAR, mientras que, en clima húmedo, como la escorrentía aumenta y puede superar la capacidad



del sistema, los flujos de exceso son vertidos directamente (sin tratamiento) a las aguas receptoras a través de aliviaderos Combined Sewer Overflows (CSOs, por sus siglas en inglés) [1]. Así, agua de escorrentía se devuelve al medio natural con o sin tratamientos limitados (estanques de retención, cuencas de infiltración, sistemas de bio-filtración, sistemas de humedales, etc.), debido al alto volumen a tratar [6], [7].

La creciente impermeabilidad en las zonas urbanas trae cambios significativos en las propiedades de la tierra. En particular, la vegetación nativa se reduce y se limitan los patrones de drenaje natural que interceptan, almacenan e infiltran el agua lluvia [8]. El área impermeable efectiva en una cuenca hidrográfica es el área impermeable conectada directamente con el sistema de drenaje de escorrentía y que contribuye a aumentar los volúmenes hidrológicos. La creciente urbanización genera impactos ambientales negativos en los ecosistemas acuáticos desde el punto de vista hidrológico, físico-químico y biológico. En efecto, diferentes productos químicos (contaminantes) se han identificado en aguas residuales y de escorrentía pluvial que podrían afectar a la salud humana y la vida acuática, tales como sólidos, trazas de metales, cloruro, nutrientes (N y P), pesticidas, hidrocarburos aromáticos policíclicos y bacterias, entre otros [6], [9]. Además, la calidad del agua es consecuencia de fenómenos naturales y el actuar del ser humano, además es una función de uso del suelo en el área de captación. Hoy en día se reconoce que la forma en que los seres humanos utilizan y ocupan la tierra tiene una implicación directa en la calidad del agua y, por lo tanto, se preconiza que el control de calidad del agua se asocia con una planificación global a nivel de área de captación entera y no de forma individual para cada fuente que recibe un impacto directo [10], [11].

Por otro lado, los avances relacionados con la óptica y la electrónica en las últimas décadas, han permitido obtención de instrumentos robustos a pequeña escala aplicados a la espectrometría Ultravioleta y Visible (UV-Vis) de espectro completo. Tales instrumentos o sensores se utilizan en el monitoreo de la calidad de aguas en línea [12]. Los sensores o captores de espectrometría UV-Vis (rango entre 200 nm y 745 nm, son 219 longitudes de onda, con separación de 2,5 nm) son dispositivos que registran la atenuación de la luz, este proceso se conoce como absorbancia y registran valores de calidad de aguas en tiempo casi-continuo (espectro de absorbancia registrado por minuto). Se utilizan estos captores UV-Vis *in-situ* y en línea en las plantas para el tratamiento de agua residual (PTAR) en el monitoreo de las entradas y las salidas en estas, también en el monitoreo de diferentes etapas de tratamiento de la calidad del agua, con el objetivo de determinar la dinámica de cargas contaminantes y eficiencia en los procesos de remoción o de eliminación de nitratos, nitritos, materiales orgánicos (v.g. demanda química orgánica y demanda bioquímica de oxígeno) y sólidos totales en suspensión [13]–[15]; se pueden ajustar diferentes escalas de tiempo y utilizar esa información como herramienta complemento en sistemas de toma de decisiones en tiempo real. En estos sensores se deben realizar procesos para su calibración, esta puede ser de tipo global o de tipo local [16]–[18]. Se debe realizar el procesamiento y análisis de dichas series de tiempo con el fin de estimar la densidad espectral para descubrir su comportamiento periódico que puede estar oculto [19]–[21]. Si estas series de tiempo son no estacionarias en media y varianza, será necesario realizar las respectivas transformaciones sobre estas para obtener series de tiempo estacionarias en sentido amplio y poder aplicar procesos lineales, comprendiendo el comportamiento del fenómeno que las genera y si es posible aplicar técnicas de pronóstico para complementar procesos de control en tiempo real en las PTAR [22].



Este trabajo propone analizar los espectros de absorbancia UV-Vis que son registrados por los sensores instalados en diferentes sistemas utilizados para el saneamiento urbano, por medio de la transformación de Box-Cox para reducir la varianza y eliminar la tendencia [23], [24], también realizar la estimación espectral de series de temporales y poder interpretar el comportamiento que puede estar oculto [25], [26]. El análisis propuesto se aplicó a tres diferentes series de tiempo multivariadas de espectros UV-Vis registrados en tres diferentes sitios de estudio: (i) entrada PTAR El-Salitre (Bogotá); (ii) EBG (Bogotá); (iii) entrada PTAR San-Fernando (Itagüí).

2. Materiales y métodos

2.1. Sensores UV-Vis

Se utilizaron sensores UV-Vis de la compañía austriaca s::can (spectro::lyserTM) son instrumentos sumergibles de 44 mm de diámetro y de 64,7 cm de longitud, una lámpara de Xenón que actúa como fuente luminosa y un conjunto de foto-detectores que registran la absorbancia en un aproximado tiempo continuo (un espectro de absorbancia por minuto). Los espectros de absorbancia se encuentran en el rango desde el Ultravioleta-UV y Visible-Vis (200 nm - 750 nm) con pasos de 2,5 nm para un total de 219 longitudes de onda y ofrecen resultados en tiempo real [27], [28]. Los espectrómetros UV-Vis realizan una medición de la absorbancia de la luz en longitudes de onda desde ultravioleta a visible. La absorbancia es generada por partículas disueltas o en suspensión. Estos sensores son capaces de registrar y proporcionar información del orden de una medición por minuto, que puede traducirse en términos de concentraciones equivalentes tales como Sólidos Suspendidos Totales (SST), Demanda Química de Oxígeno (DQO), nitratos, nitritos, entre otros. Además, cuenta con un sistema de limpieza automática por aire o agua [27]–[29]. La medición es realizada directamente en el sitio (*in situ*) sin necesidad de realizar el muestreo y el tratamiento a las muestras. Por lo tanto, mediante estos sensores es posible obtener una medición confiable y a alta resolución, puesto que una sola medición toma generalmente cerca de quince segundos [17], [29], [30].

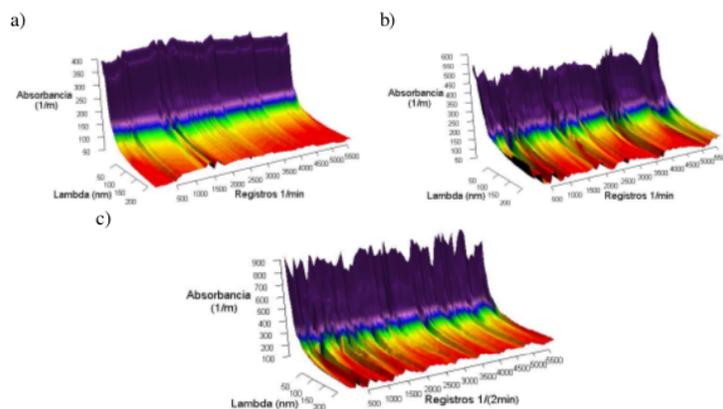
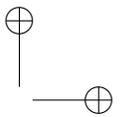
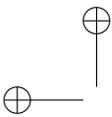


Figura 1. Series temporales de absorbancia UV-Vis para El-Salitre (a), EBG (b) y San-Fernando (c). (adaptado de [40]).



El proceso de análisis propuesto se aplicó en series temporales con una longitud de 5705 espectros de absorbancia para cada uno de los sitios de estudio: (i) El-Salitre, desde 29-06-2011 – 09:03 h hasta 03-07-2011 – 17:33 h con una configuración temporal de un espectro por minuto; (ii) Estación Bombeo Gibraltar (EBG) desde 18-10-2011 – 11:08 h hasta 22-10-2011 – 15:21 con una configuración temporal de un espectro por minuto; y (iii) San-Fernando desde 24-09-2011 – 06:04 h hasta 02-10-2011 – 09:16 h con una configuración temporal de un espectro por cada dos minutos como se observa en la Figura 1.

2.2. Series de tiempo estacionarias y no estacionarias

Cuando se analizan series de tiempo, estas pueden clasificarse en estacionarias y no estacionarias. Una serie de tiempo estacionaria es estable a lo largo del tiempo, es decir, su media y su varianza son constantes en el tiempo [19], [22], [35], [36]: los valores de la serie de tiempo tienden a oscilar alrededor de una media constante y la variabilidad respecto a la media también permanece constante en el tiempo. Una serie de tiempo no estacionaria se caracteriza porque la tendencia o variabilidad cambian en el tiempo [22]. Los cambios en la media determinan una tendencia a crecer o decrecer a largo plazo, por lo que la serie no oscila alrededor de un valor constante [44], [46]. Pueden permanecer durante periodos largos con valores por encima o por debajo de la media, debido a la presencia de una tendencia determinística, al problema de raíces unitarias o a la presencia de una varianza heterocedástica. Las series de tiempo no estacionarias pueden transformarse en series de tiempo estacionarias aplicando los correspondientes procedimientos. Las series de tiempo pueden ser no estacionarias en media y no estacionarias en varianza [36].

A las series de tiempo no estacionarias en varianza se requiere realizar la transformación de estabilización de su varianza, para que esta sea constante. George E. P. Box y David Cox en 1964, propusieron aplicar transformaciones de potencias [23], [24], como se indica en la ecuación 1.

$$T(x) = \begin{cases} \frac{x_t^\lambda - 1}{\lambda} & \lambda \neq 0 \\ \text{Ln}(x_t) & \lambda = 0 \end{cases} \quad (1)$$

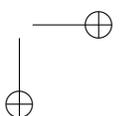
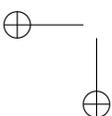
donde, x_t es la serie de tiempo y λ es el parámetro que se agrega para obtener la estabilización en varianza [23]–[25].

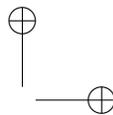
Se realiza la transformación a cada una de las 219 series de temporales para cada sitio de estudio; siendo estas series de tiempo no estacionarias. Se reduce la varianza calculando el logaritmo natural a cada dato de la serie de tiempo. Cuando la serie de tiempo es no estacionaria en varianza, es posible transformarla en una serie de tiempo estacionaria en media utilizando la ecuación 2. En este proceso la longitud de valores de la serie de tiempo se reduce en uno. Cuando se realiza el proceso inverso, la longitud de la serie de tiempo vuelve a tener el valor original [33], [34].

$$\Delta T_t = T_t - T_{t-1} \quad (2)$$

2.3. Análisis por componentes principales – adaptado de [37], [39]

Con las series de temporales UV-Vis estacionarias en media y varianza, el siguiente paso consta en realizar la correspondiente transformación de tipo lineal, hallando un nuevo sistema de ejes





coordenados utilizando de los valores originales. En el nuevo sistema de ejes coordenados, la mayor variabilidad de la información es retenida por el primer eje, que es conocido como primer componente principal; la siguiente mayor variabilidad es retenida por el segundo eje, la tercer siguiente variabilidad es retenida por el tercer eje y se continua con todas las demás variabilidades de los valores originales. Esta transformación de tipo lineal se base en la matriz de covarianza. Por consiguiente, se transforma conjunto de datos X que tiene dimensiones $n \times m$, donde n es el número de observaciones y m el número de variables, a otro conjunto de datos de menor dimensión $n \times l$, donde n sigue siendo el número de observaciones y l es el número de componentes principales. Este nuevo conjunto de datos es menor que m y presenta la mínima pérdida en la cantidad de información útil. El proceso comienza encontrando la matriz de covarianzas que relaciona todas las variables de los valores originales como lo indica la ecuación 3.

$$COVARIANZA_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N [(x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})] \quad (3)$$

donde N indica el número total de datos y n es cada uno de los valores en la matriz.

Es sugerido que para la transformación los valores no deben tener media diferente de cero, esto se consigue restando cada valor del promedio en cada columna (variable) como se muestra en la ecuación 4.

$$Valor - Adjustado = x_i - \bar{x} \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

donde i es cada uno de los valores por cada columna en la matriz de datos.

El proceso continúa obteniendo los datos normalizados, se utiliza la ecuación 5.

$$Datos - normalizados = \frac{x_i - \bar{x}}{\sigma} \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

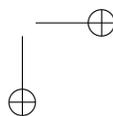
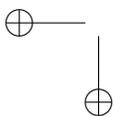
donde i hace referencia a los valores en cada una de las columnas en la matriz y σ es la desviación estándar de cada columna en la matriz de datos.

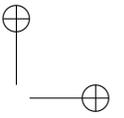
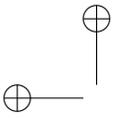
Se obtienen los autovalores y los autovectores de la matriz de covarianza, esto permite obtener las componentes principales (*Principal Component-PC*) como lo indica la ecuación 6.

$$PC = (\text{autovectores}(COV))^T \cdot (\text{Datos} - \text{normalizados})^T \quad (6)$$

Después de cualquier proceso realizado sobre las componentes principales, es necesario hacer la transformación inversa reconstruyendo los datos con el fin de retornar a las dimensiones originales mediante la ecuación 7; esta ecuación se aplicará después de haber realizado el proceso de transformación del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, realizar el pronóstico y aplicar la transformada inversa del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo.

$$Datos_Reconstruidos = [(\text{autovectores}(COV)^T)^{-1} \cdot PC^T] \cdot \sigma + \bar{x} \quad (7)$$





2.4. Análisis espectral

La estimación de la densidad espectral de potencia, Power Spectral Density (PSD, por sus siglas en inglés) de una señal estacionaria permite identificar periodicidades ocultas, estimar la entropía de la señal para comprimirla con o sin pérdidas, o proporcionar información sobre la dinámica interna de un sistema (su función de transferencia). Se realiza una estimación de la PSD de la señal, porque según la naturaleza estocástica de la señal, no es posible determinar la PSD con exactitud [38], [41].

Se puede realizar la estimación espectral por uno de dos posibles métodos: (i) clásicos o no paramétricos, para los cuales se estima la secuencia de autocorrelación a partir de un conjunto de datos y calculando la transformada de Fourier de la secuencia de autocorrelación estimada se obtiene una estimación del espectro; y (ii) no clásicos o paramétricos, los cuales utilizan un modelo (AR, MA, ARMA, etc.) determinado del proceso para estimar el espectro de potencia [42], [43].

La estimación espectral se realiza por medio del método clásico o no paramétrico, asumiendo que la señal es estacionaria en el sentido amplio (Wide-Sense Stationarity WSS). Una señal es estacionaria en sentido amplio, si esta tiene media constante y su función de autocorrelación solo depende del lapso de tiempo transcurrido entre dos periodos [42]. Cuando se tiene una señal discreta (con tiempo determinado), para estudiar e inferir las propiedades del proceso que la genera, un estimado de la densidad espectral es el periodograma, siendo este estimado la magnitud al cuadrado de la transformada discreta de Fourier (DFT) [42], [44] de la secuencia de datos como se indica en la ecuación 8.

$$P(\Omega) = \frac{1}{N} |X_k|^2 \quad (8)$$

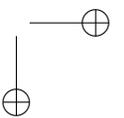
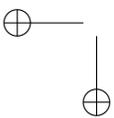
donde N es el número de datos y X_k es la DFT de la secuencia de datos como lo indica la ecuación 9.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

Con la estimación del periodograma se presenta el problema de enmascaramiento espectral y es necesario realizar otro proceso con el fin de obtener el decremento de la varianza del periodograma. Los algoritmos de Barlett y de Welch calculan la media de múltiples periodogramas de D segmentos de longitud L , estos pueden o no estar traslapados, a partir de los cuales se debe obtener valor promedio de los periodogramas obtenidos en cada segmento [45]. El proceso aplicado es el de promedio de periodogramas modificados con ventana rectangular con un traslape del 50%. Se aplica la matemática modular para determinar el número de segmentos D con tamaño L [31].

Al realizar la estimación espectral de la señal en el dominio de la frecuencia es necesario realizar el proceso de transformación inversa utilizando la IFFT (Inverse Fast Fourier Transform) [44], como lo indica la ecuación 10.

$$X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{-j2\pi \frac{k}{N} n} \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$



Para comparar los resultados obtenidos se utiliza el cálculo del porcentaje de diferencia absoluto o APD (Absolute Percentage Difference) como lo indica la ecuación 11.

$$APD = \frac{|Val_{original} - Val_{obtenido}|}{Val_{original}} \times 100\% \quad (11)$$

donde $Val_{original}$ es el valor de absorbancia original de cada serie de tiempo y $Val_{obtenido}$ es el valor resultante de absorbancia al aplicar el proceso de análisis espectral [46], [47].

3. Resultados y discusión

Antes de presentar los resultados de este trabajo se realizará una discusión del método propuesto según los trabajos y resultados obtenidos por otros investigadores. El método propuesto es considerado como el pre-procesamiento que se debe aplicar a las series de tiempo multivariadas. Las series de tiempo de absorbancia UV-Vis analizadas no son estacionarias y, como varios trabajos lo indican, estas deben ser sometidas a procesos de transformación con el fin de estabilizarlas en varianza y obtener una distribución normal tal como lo indican [24] y [26]. En estos trabajos los autores pre-procesan diferentes series de tiempo (financieras, imágenes, enfermedades, etc.) utilizando la transformación de Box-Cox y varios procesos para encontrar el mejor valor para el parámetro λ . Los estudios indican que si el valor para λ es mayor a 1 el resultado de la transformación es de tipo convexo, si el valor es igual a 1 los datos no sufren cambios y si el valor está entre 0 y 1 el resultado de la transformación es de tipo cóncavo. Existen alternativas para obtener el óptimo valor de λ : los autores del trabajo [26] indican que para predicción en series de tiempo de tipo financieras el mejor valor es 0,5 y que para el caso lognormal el valor a utilizar es 0. Cuando las series de tiempo son multivariadas es necesario realizar la reducción de la dimensionalidad con el fin de procesar más rápido las series de tiempo: el trabajo presentado por [24] utiliza imágenes con resolución de 64x64 y aplica PCA para reducir la dimensionalidad a 158 componentes capturando una variabilidad del 99 %. Respecto al análisis espectral, los autores del trabajo [31] aplican el análisis espectral a sistemas de comunicación basados en OFDM. Los autores indican que utilizando periodogramas Barlett-Welch, el valor óptimo (reducción óptima de la estimación de la varianza) del traslape de estos es del 50 %. Este valor garantiza que el promedio de los periodogramas obtenidos con la FFT permite encontrar los armónicos relevantes que en el dominio de la frecuencia representa la serie de tiempo analizada. Después se aplica la transformación inversa IFFT para retornar al dominio del tiempo y obtener la serie de tiempo que representa el fenómeno en estudio. Si se ha aplicado PCA se debe realizar la transformación inversa PCA^{-1} .

Se aplica el proceso descrito en la sección 2.2 a todas las series de temporales de absorbancia registradas por los sensores instalados en los sitios para el presente estudio. Como ejemplo, la Figura 2 muestra la transformación realizada a la primera longitud de onda (200 nm) para el sitio de estudio El-Salitre.

La Figura 2a muestra que la serie de tiempo original tiene un rango de valores desde 370 a 441 unidades de absorbancia UA (1/m). En la Figura 2b se observa la transformación para la reducción de la varianza teniendo la nueva serie de datos un rango de valores desde 5.93 UA a 6.07 UA y finalmente en la Figura 2c se observa que el resultado de la diferenciación de la serie de tiempo, esta

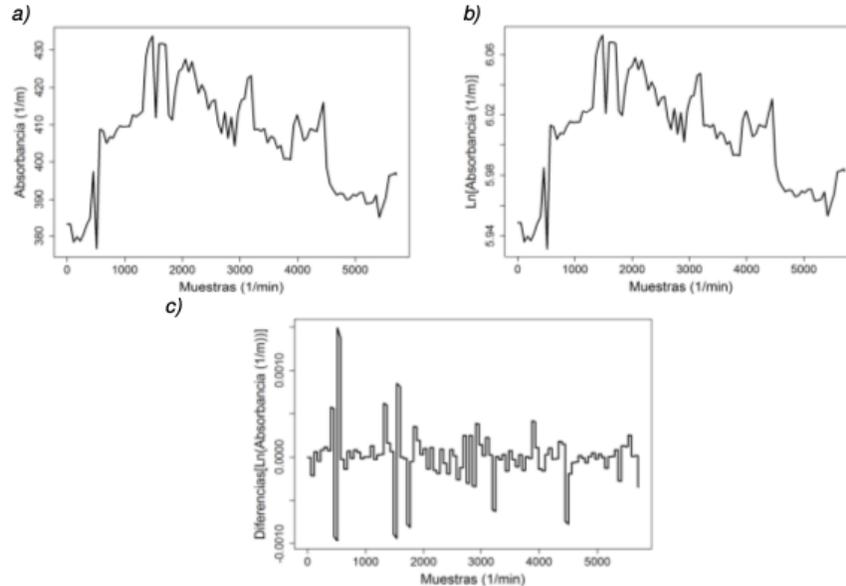


Figura 2. Transformación de la serie de tiempo de absorbancia para la primera longitud de onda (200 nm) para El-Salitre, original (a), logaritmo natural de los valores (b) y diferencias del logaritmo natural (c).

se encuentra oscilando alrededor del valor 0.0 UA. Igual proceso se aplicó a las demás longitudes de onda y a los otros sitios de estudio.

Con la series de tiempo de absorbancia se realiza la transformación lineal por el análisis de componentes principales para reducir la dimensionalidad del problema. La Tabla I muestra el número de componentes principales (PC) utilizados para cada sitio de estudio con el porcentaje de variabilidad que recogen estas PC.

Tabla I. Valor de componentes principales obtenido para cada sitio con la variabilidad retenida

Sitio de estudio	PC	(%) Variabilidad retenida
El-Salitre	6	97,7
EBG	8	98,7
San-Fernando	7	97,7

Con el número de componentes principales establecido, se realiza el proceso del análisis espectral para cada una de estas y para cada sitio de estudio. Se determinan 30 segmentos cada uno con 368 valores y con un traslape de 184 valores. La figura 3 se muestra, como ejemplo, los periodogramas obtenidos para la primera componente principal y para el sitio de estudio El-Salitre.

En la Figura 3 se muestran como ejemplo los tres primeros periodogramas (3a, 3b y 3c) para la primera componente principal y el periodograma promedio para El-Salitre. También se obtienen los periodogramas promedio finales para el resto de las componentes principales para este sitio de estudio y para los otros dos sitios de estudio. Entonces de cada periodograma promedio se toman los veinte armónicos más relevantes en el dominio de la frecuencia y se realiza el proceso inverso utilizando la IFFT retornando al dominio del tiempo como se observa en la Figura 4.

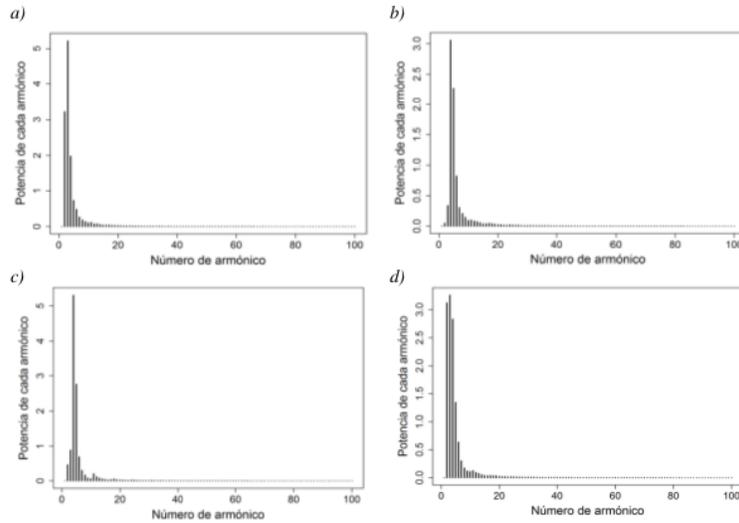


Figura 3. Periodogramas modificados con ventana rectangular con traslape del 50 % para la primera componente principal para El-Salitre, primer peridograma (a), segundo peridograma (b), tercer peridograma (c) y peridograma promedio final (d).

La Figura 4 muestra para la primera componente principal del sitio El-Salitre, el resultado al utilizar veinte armónicos más relevantes del dominio de la frecuencia en el análisis espectral para representar la señal. Finalmente se realiza el proceso de transformación de Box-Cox inverso para obtener los valores de absorbancia resultantes, como se observa en la Figura 5.

La Figura 5 muestra el resultado del proceso de análisis espectral para encontrar el periodograma y los valores de los armónicos que representan las series de tiempo en el dominio de la frecuencia. En este proceso se han utilizado los veinte armónicos más relevantes para cada componente principal que representan la serie de tiempo para cada uno de los sitios de estudio.

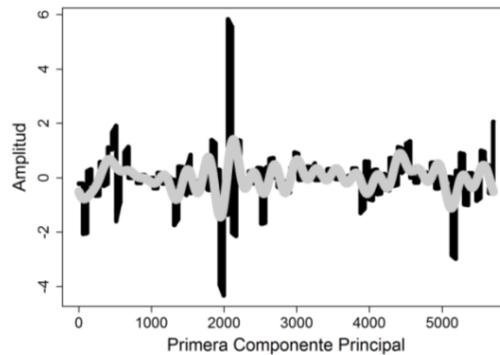


Figura 4. Primer componente principal para El-Salitre, serie original línea negra, representación con 20 armónicos relevantes, línea gris.

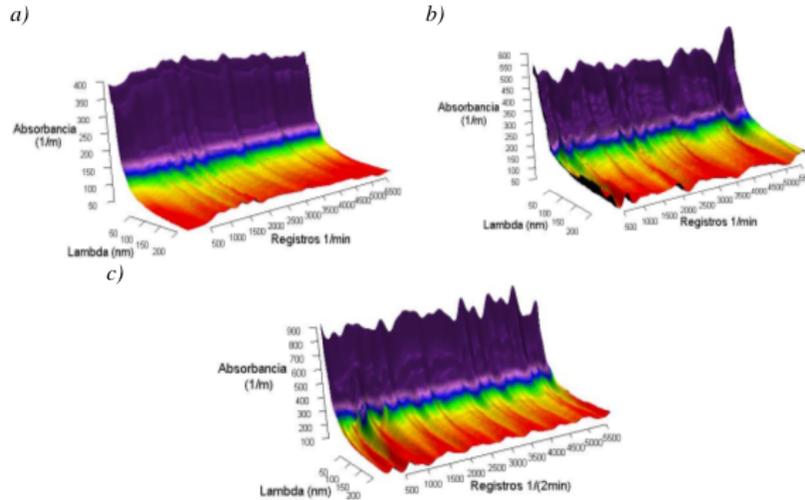


Figura 5. Series temporales obtenidas por el análisis espectral para (a) El-Salitre, (b) EBG y (c) San-Fernando.

En la Figura 5 las series temporales obtenidas son similares a las presentadas en la Figura 1 pero son el resultado del proceso de estimación espectral utilizando el PCA. Lo anterior permite utilizar esta información, reducida en dimensionalidad y cantidad de armónicos, en proceso o metodología para realizar el pronóstico de la calidad del agua.

La Figura 6 muestra la distribución de los valores de los porcentajes absolutos de diferencia obtenidos (diferencia entre los valores de absorbancia originales y los obtenidos al aplicar el proceso de análisis espectral) para el sitio de estudio PTAR Salitre.

La Figura 6 muestra la distribución de los valores de los porcentajes absolutos de diferencia para

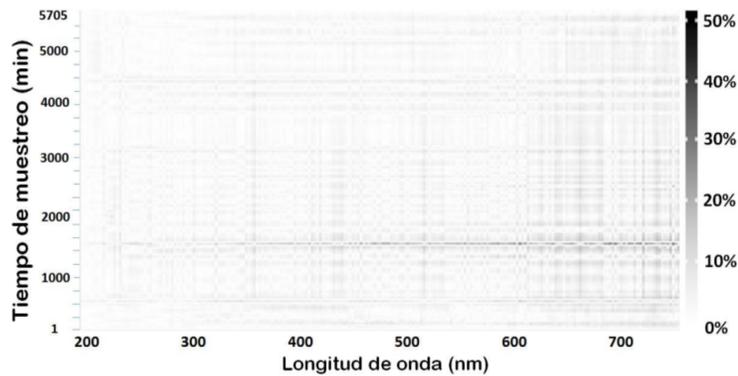
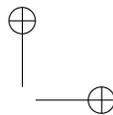


Figura 6. Valores para el porcentaje absoluto de diferencias para El-Salitre. Fuente: propia de los autores.



el sitio estudio El-Salitre. Estos valores están en el rango de 0.0 % hasta el 34.9 %. Se observa que para las longitudes de onda en el rango UV (200.0 nm – 380.0 nm) los porcentajes de error absoluto no superan el 17.4 %. También se observa que para el rango Visible (382.5 nm – 745.0 nm) y para los tiempos de muestreo de 1530 a 1550 min, se encuentran los mayores valores de diferencia (de 2.5 % a 34.9 %). Para el resto de los tiempos de muestreo los errores no superaron el 27 %.

Para la EBG los valores de APD están en el rango de 0.0 % hasta el 60.8 %. Sin embargo para los tiempos de muestreo de 3750 a 3780 los valores de diferencia superaron el 30 %, para el resto de los tiempos de muestreo las diferencias no superaron el 30 %.

Para San-Fernando los valores están en el rango de 0.0 % hasta el 75.5 %. Estos resultados se pueden deber por las características de las series de tiempo de absorbancia, dado que en los tiempos de muestreo 408 a 474 min, los valores de diferencia superaron el 40 %. Para el resto de los tiempos de muestreo las diferencias no superaron el 40 %.

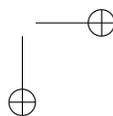
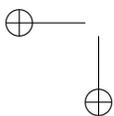
4. Conclusiones

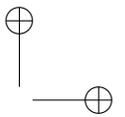
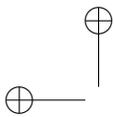
Con la transformación de Box-Cox y el proceso de diferenciación aplicado a las series temporales UV-Vis para los sitios de estudio (El-Salitre, EBG y San-Fernando), se logra reducir la varianza y se elimina la tendencia de las series de tiempo. Esto implica que se obtienen señales estacionarias en el sentido amplio y a estas se les puede aplicar diferentes transformaciones lineales.

Se utiliza el proceso PCA (como transformación de tipo lineal con base en la matriz de covarianza) a las series temporales reduciendo su dimensionalidad para los sitios de estudio, se utilizan seis componentes principales para El-Salitre, ocho componentes principales para EBG y siete componentes principales para San-Fernando. Consecuentemente, las componentes principales explican (capturan) más del 97 % de la variabilidad para todas las series temporales estudiadas. Esto implica que se reduce el análisis y procesamiento de las series temporales UV-Vis en tiempo y se podría utilizar en procesos de tratamiento del agua en tiempo real.

El proceso aplicado es el promedio de periodogramas modificados con ventana rectangular con un traslape del 50 %; se puede estimar el comportamiento periódico que podría estar oculto si no se realiza este procedimiento. Se utilizan los veinte armónicos relevantes en el dominio de la frecuencia para representar el comportamiento de las series temporales UV-Vis para cada sitio de estudio. Esto implica que además de realizar la estimación espectral, el procedimiento se puede utilizar como un filtro para detectar valores atípicos (*outliers*).

Los valores de porcentaje absoluto en los que difieren los valores originales y los obtenidos por el proceso de estimación espectral para los tres sitios de estudio indican que para el espectro UV se obtiene las menores diferencias con valores menores al 30 % y para el rango Visible se obtienen los mayores valores. Esto implica que al obtener los mayores valores de porcentaje absoluto en las diferencias, podría indicar la presencia de un valor o valores atípicos (*outliers*). Se recomienda realizar un pre-procesamiento de series temporales UV-Vis con el fin de detectar y remover los valores atípicos y posteriormente aplicar el proceso propuesto para la estimación espectral.





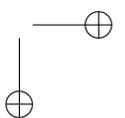
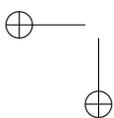
El método de estimación espectral se puede utilizar como primer paso de pre-procesamiento en un sistema de pronóstico de la calidad del agua en tiempo real debido a que su implementación no es compleja ni costosa computacionalmente, lo cual es un aspecto clave si se tiene en cuenta el periodo de muestreo del sensor (una medición por minuto).

5. Agradecimientos

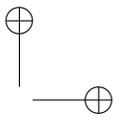
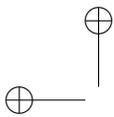
Los autores agradecen a la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá – EAAB (Contrato Administrativo No. 9- 0725100-0763-2010), a Empresas Públicas de Medellín (EPM) por suministrar las series temporales utilizadas en este trabajo. El procesamiento de la información se realizó en la colaboración del Centro de Computación de Alto Desempeño (CECAD) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá D.C., Colombia. (<http://cecad.udistrital.edu.co>).

Referencias

- [1] Poch, M., Cortés, U., Comas, J., Rodríguez-Roda, I. and Sánchez-Marrè, M., “Decisions on urban water systems: some support”. *University of Girona*, First Edition, Servei de Publicacions, Spain 2012. ↑212, 213
- [2] Garcia, X., Barceló, D., Comas, J., Hadjimichael, A., Page, T. and Acuña, V., “Placing ecosystem services at the heart of urban water systems management”. *Science of the Total Environment* 563–564, 2016, pp. 1078–1085. ↑212
- [3] Morales-Torres, A., Escuder-Bueno, I., Andrés-Doménech, I. and Perales-Momparler, S., “Decision Support Tool for energy-efficient, sustainable and integrated urban stormwater management”. *Environmental Modelling & Software* 84, 2016, pp. 518–528. ↑212
- [4] Akan, A. and Houghtalen, R., *Urban Hydrology, Hydraulics, and Stormwater Quality: Engineering applications and computer modelling*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, USA. 2003. ↑212
- [5] Dirckx, G, van Daele, S. and Hellinck, N., “Groundwater Infiltration Potential (GWIP) as an aid to determining the cause of dilution of waste water”. *Journal of Hydrology*, 542, 2016, pp. 474–486. ↑212
- [6] Marsalek, J., Jiménez-Cisneros, B., Malmquist, P.-A., Karamouz, M., Goldenfum, J. and Chocat, B., “Urban water cycle processes and interactions”. *Published by the International Hydrological Programme (IHP) of the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO)*. Paris 2006. ↑213
- [7] Gosset, A., Ferro, Y. and Durrieu, C., “Methods for evaluating the pollution impact of urban wet weather discharges on biocenosis: a review”. *Water Research*, 89, 2016, pp. 330–354 ↑213
- [8] Palla, A. and Gnecco, I., “Hydrologic modelling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale”. *Journal of Hydrology*, 528, 2015, pp. 361–368. ↑213
- [9] Fazi, S., Bandla, A., Pizzetti, I. and Swarup, S., “Microbial biofilms as one of the key elements in modulating ecohydrological processes in both natural and urban water corridors”. *Ecohydrology & Hydrobiology* 16, 2016, pp. 33–38. ↑213
- [10] von Sperling, M. and de Lemos, C., *Wastewater Characteristics, Treatment and Disposal*. First Edition. IWA Publishing. UK 2007. ↑213
- [11] Francois, C., Gondran, N., Nicolas, J.-P. and Parsons, D. “Environmental assessment of urban mobility: Combing life cycle assessment with land-use and transport interaction modelling-Application to Lyon (France)”. *Ecological Indicators*, 72, 2017, pp. 597–604. ↑213
- [12] van den Broeke, J., “On-line and In-situ UV/Vis Spectroscopy: Real time multi parameter measurements with a single instrument”. *AWE International*, 2007, pp. 55–59. ↑213
- [13] Gruber, G., Bertrand-Krajewski, J.-L., De Beneditis, J., Hochedlinger, M., & Lettl, W., “Practical aspects, experiences and strategies by using UVVIS sensors for long-term sewer monitoring”. *Water Practice & Technology*, 2006, pp. 1–8. ↑213



- [14] Rieger, L., Langergraber, G., Thomann, M., Fleischmann, N., and Siegrist, H. "Spectral in-situ analysis of NO₂, NO₃, COD, DOC and TSS in the effluent of a WWTP". *Proceedings of AutMoNet – 2nd IWA Conference on Automation in Water Quality Monitoring*, Vienna, 2004, pp. 29-36. ↑213
- [15] Matsumoto, T. and Sánchez, I. "Desempeño de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de São João de Iracema (Brasil)". *Revista Ingeniería* 21(2), 2016, pp. 176-186. ↑213
- [16] Salgado, R., Pinheiro, H. M., Ferreira, F., Saldanha, J., & Louren, N. "In situ UV-Vis spectroscopy to estimate COD and TSS in wastewater drainage systems". *Urban Water Journal*, 2013, pp. 1-12. ↑213
- [17] Torres, A., Lepot, M., & Bertrand-Krajewski, J.-L. "Local calibration for a UV/Vis spectrometer: PLS vs. SVM. A case study in a WWTP". *Proceedings of 7th International Conference on Sewer Processes & Networks*, 28 - 30 August – 2013, Sheffield, UK. ↑213, 214
- [18] Lepot M., Torres A., Hofer T., Caradot N., Gruber G., Aubin J.-B., Bertrand-Krajewski J.-L. "Calibration of UV/Vis spectrophotometers: A review and comparison of different methods to estimate TSS and total and dissolved COD concentrations in sewers, WWTPs and rivers". *Water Research* 101, 2016, pp. 519–534. ↑213
- [19] Fei, W., & Bai, L. "Auto-Regressive Models of Non-stationary time series with finite length". *Tsinghua Science and Technology* 10(2), 2005, pp. 162-168. ↑213, 215
- [20] Kamarzarrin, M., Hosseini, S., Mehdi, M. and Kamarzarrin, M. "Designing and implementing of improved cryptographic algorithm using modular arithmetic theory". *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 2, 2015, pp. 14–17. ↑213
- [21] Plazas-Nossa, L., Avila, M. and Torres, Andres. "Detection of Outliers and Imputing of Missing Values for Water Quality UV-VIS Absorbance Time Series". *Revista Ingeniería*, 2016, In press. ↑213
- [22] Salcedo, G., Porto, R., and Morettin, P. "Comparing non-stationary and irregularly spaced time series". *Computational Statistics and Data Analysis* 56, 2012, pp. 3921-3934. ↑213, 215
- [23] Huang, J., Kobayashi, M., and McAleer, M. "Testing for the Box–Cox parameter for an integrated process". *Mathematics and Computers in Simulation*, 83, 2012, pp. 1-9. ↑214, 215
- [24] Bicego, M. and Baldo, S. "Properties of the Box–Cox transformation for pattern classification". *Neurocomputing*, 218, 2016, pp. 390-400. ↑214, 215, 218
- [25] Tsiotas, G. "On the use of the Box–Cox transformation on conditional variance models". *Finance Research Letters*, 4, 2007, pp. 28-32. ↑214, 215
- [26] Proietti, T., and Lütkepohl, H. "Does the Box–Cox transformation help in forecasting macroeconomic time series?". *International Journal of Forecasting* 29, 2013, pp. 88-99. ↑214, 218
- [27] Langergraber, G., Fleischmann, N., Hofstaedter, F., & Weingartner, A. "Monitoring of a paper mill wastewater treatment plant using UV/VIS spectroscopy". *IWA Water Science and Technology*, 49(1), 2004, pp. 9-14. ↑214
- [28] s:can. "Manual ana:pro Version 5.3 September 2006 Release". Messtechnik GmbH, Vienna, Austria 2006. ↑214
- [29] Zamora, D., *Métodos Machine Learning aplicados para estimar la concentración de los contaminantes de la DQO y de los SST en hidrosistemas de saneamiento urbano a partir de espectrometría UV-Visible*. Tesis de Maestría, 2013, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá-Colombia. ↑214
- [30] Winkler, S., Saracevic, E., Bertrand-Krajewski, J.-L. and Torres, A., "Benefits, limitations and uncertainty of in situ spectrometry". *Water science and technology* 57(10), 2008, pp. 1651–8. ↑214
- [31] Harjula, I., Hekkala, A., Matinmikko, M., and Mustonen, M., "Performance Evaluation of Spectrum Sensing Using Welch Periodogram for OFDM Signals". *IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2011, pp. 1-5. ↑217, 218
- [32] Zhang, S., "Adaptive spectral estimation for nonstationary multivariate time series". *Computational Statistics and Data Analysis* 103, 2016, pp. 330– 349. ↑
- [33] Chong, T.-L., "Estimating the differencing parameter via the partial autocorrelation function". *Journal of Econometrics*, 97, 2000, pp. 365-381. ↑215
- [34] Hassler, U., "Persistence under temporal aggregation and differencing". *Economics Letters*, 124, 2014, pp. 318-322. ↑215
- [35] Shen, Ch. "A comparison of principal components using TPCA and nonstationary principal component analysis on daily air -pollutant concentration series". *Physica A*, 467, 2017, pp. 453-464. ↑215
- [36] Stavropoulos, C., and Fassois, S., "Non-stationary functional series modeling and analysis of hardware reliability series: a comparative study using rail vehicle interfailure times". *Reliability Engineering and System Safety*, 68, 2000, pp. 169-183. ↑215
- [37] Shlens, J., "A Tutorial on Principal Component Analysis". *La Jolla*, California, USA: Salk Institute for Biological Studies, 2009, pp. 1-13. ↑215



- [38] Barbour, A., and Parker, R., "psd: Adaptive, sine multitaper power spectral density estimation for R". *Computers and Geosciences*, 63, 2014, pp. 1-8. [↑217](#)
- [39] Bogdan, I. and Istrate, C. "The analysis of the principal components of the financial reporting in the case of Romanian listed companies". *Procedia Economics and Finance*, 20, 2015, pp. 553-561. [↑215](#)
- [40] Plazas-Nossa, L., Ávila, M. and Moncada, G. "Estimación del Exponente de Hurst y Dimensión Fractal para el análisis de series de tiempo de Absorbancia UV-VIS". *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 42(2), 2014, pp. 133-143. [↑214](#)
- [41] Lee, D., and Baldick, R., "Future Wind Power Scenario Synthesis Through Power Spectral Density Analysis". *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(1), 2014, pp. 490-500. [↑217](#)
- [42] Bach, F. and Jordan, M., "Learning Graphical Models for Stationary Time Series". *IEEE Transactions on Signal Processing*, 52(8), 2004, pp. 2189-2199. [↑217](#)
- [43] Lv, P., and Yue, L., "Short-Term Wind Speed Forecasting Based on Non-stationary Time Series analysis and ARCH model". *Proceedings of International Conference on Multimedia Technology (ICMT)*, Hangzhou, China, 2011, pp. 2549-2553. [↑217](#)
- [44] Proakis, J., and Manolakis, D. "Digital signal processing principles, algorithms, and applications". Fourth Edition. *Pearson Prentice Hall*, New Jersey, USA 2007. [↑215, 217](#)
- [45] Tuffner, F., Pierre, J., and Kubichek, R. "Computationally Efficient Updating of a Weighted Welch Periodogram for Nonstationary Signals". *51st Midwest Symposium on Circuits and Systems MWSCAS-2008*, pp. 799-802. [↑217](#)
- [46] Diebold, F., "Elements of Forecasting". Second Edition. *Thomson/South Western Publishing an ITP Company. Department of Economics University of Pennsylvania*, 2001. [↑215, 218](#)
- [47] Gujarati, D. and Porter, D., "Basic Econometrics". 5th Edition. *McGraw-Hill Higher Education/Irwin*. New York-USA. 2008. [↑218](#)

Leonardo Plazas-Nossa

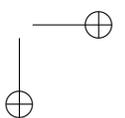
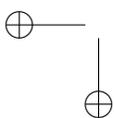
Ingeniero Electrónico, Magister en Teleinformática, Doctorado en Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Carrera 7 No. 40-53, 3239300 Ext. 2405. Bogotá, Colombia.
Contacto: lpla-zasn@udistrital.edu.co.

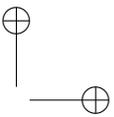
Miguel Antonio Ávila Angulo

Ingeniero Catastral y Geodesta, Magister en Teleinformática, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de Ingeniería, Carrera 7 No. 40-53, 3239300 Ext. 2405. Bogotá, Colombia.
Contacto: maavila@udistrital.edu.co

Andres Torres

Ingeniero Civil, Especialización en Sistemas Gerenciales de Ingeniería, Maestría en Ingeniería Civil, Doctorado en Ingeniería Civil, Grupo de Investigación Ciencia e Ingeniería del Agua y el Ambiente, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Javeriana, Carrera 7 No. 40-62, 3208320 Ext. 5553. Bogotá, Colombia.
Contacto: andres.torres@javeriana.edu.co





Research

Characterization of EEG Signals Using Wavelet Packet and Fuzzy Entropy in Motor Imagination Tasks

Caracterización de Señales EEG Mediante Wavelet Packet y Entropía Difusa para Tareas de Imaginación Motora

Boris Medina Salgado¹ , Ramón Alvarez López¹

¹Universidad de Sucre. Sincelejo - Colombia.

Correspondencia: boris.medina@unisucra.edu.co - ramon.alvarez@unisucra.edu.co

Recibido: 17/11/2016. Modificado: 04/02/2017. Aceptado: 18/02/2017.

Abstract

Context: Clinical rhythm analysis on advanced signal processing methods is very important in medical areas such as brain disorder diagnostic, epilepsy, sleep analysis, anesthesia analysis, and more recently in brain-computer interfaces (BCI).

Method: Wavelet transform package is used on this work to extract brain rhythms of electroencephalographic signals (EEG) related to motor imagination tasks. We used the Competition BCI 2008 database for this characterization. Using statistical functions we obtained features that characterizes brain rhythms, which are discriminated using different classifiers; they were evaluated using a 10-fold cross validation criteria.

Results: The classification accuracy achieved 81.11 % on average, with a degree of agreement of 61 %, indicating a "suitable concordance, as it has been reported in the literature. An analysis of relevance showed the concentration of characteristics provided in the nodes as a result of Wavelet decomposition, as well as the characteristics that more information content contribute to improve the separability decision region for the classification task.

Conclusions: The proposed method can be used as a reference to support future studies focusing on characterizing EEG signals oriented to the imagination of left and right hand movement, considering that our results proved to be compared favourably to those reported in the literature

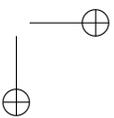
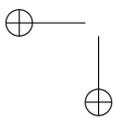
Keywords: BCI, EEG, Wavelet Packet.

Language: Spanish



Citación: B. Medina, R. Alvarez, "Characterization of EEG Signals Using Wavelet Packet and Fuzzy Entropy in Motor Imagination Tasks" INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 226-238, 2017.

©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.revving.2017.2.a04>



Resumen

Contexto: El análisis de ritmos clínicos en los métodos de procesamiento de señales avanzadas es de mucho interés en áreas médicas, tales como el diagnóstico de los trastornos cerebrales, la epilepsia, el análisis del sueño o la anestesia y, más recientemente, en las interfaces cerebro computador (BCI).

Método: En este trabajo se aplica la Transformada Wavelet Packet a fin de extraer los ritmos cerebrales de señales electroencefalográficas (EEG) relacionadas a tareas de imaginación motora, contenidas en la base de datos de la competencia BCI 2008. Usando funciones estadísticas ampliamente aplicadas en la literatura, se obtiene la matriz de datos que caracteriza los ritmos cerebrales, que son discriminadas mediante diferentes clasificadores y evaluados usando criterio de validación cruzada de diez pliegues.

Resultados: La exactitud de clasificación se acerca al 81.11 % en promedio, con un grado de acuerdo de 61 %, lo que indica una concordancia adecuada, como ha sido previamente reportada en la literatura. Un análisis de relevancia mostró la concentración de características aportadas en los nodos producto de la descomposición Wavelet, así como las características que mayor contenido de información contribuyen a mejorar la región de decisión de separabilidad para la tarea de clasificación.

Conclusiones: El método propuesto puede ser utilizado como referencia para apoyar futuros estudios en la tarea de caracterización de señales EEG orientadas a la imaginación de movimiento de la mano derecha e izquierda, teniendo en cuenta que nuestros resultados demostraron ser favorables en comparación con los propuestos en la literatura.

Palabras clave: BCI, EEG, Wavelet Packet.

Idioma: Español

1. Introducción

La imaginación de movimiento de la mano izquierda y derecha puede modificar la actividad cerebral en las principales áreas sensoriomotoras, usando, por ejemplo, un estímulo externo a través de visualización de imágenes en una pantalla, que permitan imaginar una acción voluntaria relacionada, capturadas mediante registros electroencefalográficos (EEG), dando lugar a cambios en los ritmos clínicos μ y β definidos en el rango espectral de este tipo de señales.

Los sistemas basados en interfaz cerebro-computador (BCI) requieren un método eficaz de procesamiento en línea para clasificar las señales de EEG, con el fin de construir un sistema que permita la comunicación con su entorno a los pacientes con discapacidad física [1].

Se han empleado diversas técnicas de extracción de características para tal fin, principalmente, los modelos autorregresivos [2] y [3], patrones espaciales comunes [4], y la Transformada Wavelet [5] y [6]. En este trabajo se presenta un método efectivo para la caracterización de las señales de electroencefalografía en tareas de imaginación motora, usando la Transformada Wavelet Packets, que ha demostrado ser promisorio en el tratamiento de señales EEG [7]. Dicho método se emplea para descomponer la señal EEG en subbandas frecuenciales y de acuerdo a la información espectral de interés con base en los ritmos clínicos detectados en las EEG, se extraen las características que posteriormente serán usadas como patrones en los clasificadores k-vecinos cercanos (KNN), máquinas de vectores de soporte (SVM) y análisis discriminante lineal (LDA). Hemos usado el criterio de la entropía difusa como método para la discriminación de características de interés; con ello se logra reducir el espacio de dimensionalidad del conjunto de datos y extraer las características

de mayor relevancia; una reducción de la dimensionalidad supone un mejoramiento en la precisión y una reducción del costo computacional. La aplicación de este método se utilizó para analizar el conjunto de datos aportados por Competition Graz BCI 2008, dataset 2b [8].

2. Métodos

2.1. Descomposición Wavelet Packets (WP)

La Transformada Wavelet ha mostrado resultados prometedores en el tratamiento de señales EEG, debido a las características no estacionarias de la señal, además de reflejar sus coeficientes en el dominio del tiempo-frecuencia y su capacidad de descomposición multiresolución.

La Transformada Wavelet Packet (WP), introducida por Coifman *et al* [9] es una generalización de la descomposición Wavelet y ofrece una gama más detallada de posibilidades para el análisis de la señal [10] y [11]. WP proporciona una transformación nivel por nivel de la señal desde el dominio del tiempo al dominio de frecuencia. Se calcula utilizando un conjunto de filtros que conducen a la disminución de la resolución de tiempo y aumento de la resolución de frecuencia. Los componentes de frecuencia, a diferencia de la Transformada Wavelet, son de igual tamaño, ya que WP divide no solo la sub-banda de baja frecuencia, sino también la sub-banda de alta frecuencia [12]. En el análisis Wavelet, una señal se divide en coeficientes de aproximación y coeficientes de detalle. Los coeficientes de aproximación se subdividen entonces en un segundo nivel que contiene, a su vez, coeficientes de aproximación y coeficientes de detalle y así sucesivamente.

En el análisis WP, los coeficientes de detalle, así como los de aproximación se pueden dividir. Esto produce más 2^{2^n-1} caminos diferentes para codificar la señal. WP puede iterar no solo la salida del filtro de paso bajo a través de un filtrado adicional, sino también el filtro de paso alto. Esta capacidad de iterar las salidas a través de filtros de paso alto significa que el WP permite más funciones de descomposición (paquetes) a una escala dada. El nivel superior del árbol WP es la representación temporal de la señal. Cada subnivel de descomposición produce un aumento en la compensación en la resolución tiempo frecuencia; así, el nivel inferior en la descomposición WP es la representación en frecuencia de la señal. El análisis WP puede proporcionar una resolución de frecuencia más precisa que el análisis Wavelet. La Figura 1 muestra una descomposición WP en tres niveles de la señal, cada sub-nivel lo conforman nodos que contienen los coeficientes de la descomposición, así, el nodo (3, 0) representa el primer nodo de la descomposición en el tercer subnivel.

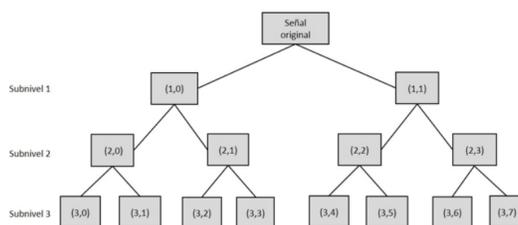
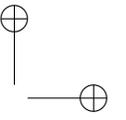
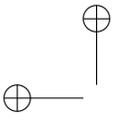


Figura 1. Descomposición WP de tres niveles, representados en nodos.



Una WP es obtenida mediante (1) y (2) dados en [9], donde Ψ es denominada Wavelet madre, i es el parámetro de modulación, j es el parámetro de dilación, k es el parámetro de traslación, y los filtros discretos $h(k)$ y $g(k)$ también llamados filtros ortogonales conjugados, están asociados con la función de escala y Wavelet madre.

$$\Psi^{2i}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} h(k) \Psi^i \left(\frac{t}{2} - k \right) \quad (1)$$

$$\Psi^{2i+1}(t) = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{k=-\infty}^{\infty} g(k) \Psi^i \left(\frac{t}{2} - k \right) \quad (2)$$

Los coeficientes Wavelet correspondiente a la señal $x(t)$ pueden ser obtenido mediante (3) y los componentes WP a un nodo particular puede ser obtenido mediante (4).

$$C_{j,k}^i = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi_{j,k}^i(t) dt \quad (3)$$

$$x_j^i(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} C_{j,k}^i \Psi_{j,k}^i(t) dt \quad (4)$$

Los coeficientes derivados de la descomposición Wavelet son demasiado largos para ser usados como características para su clasificación; en el presente trabajo se emplearon funciones estadísticas para caracterizar los coeficientes Wavelet en cada uno de los subniveles de descomposición de nuestro interés.

2.2. Extracción de características

Un conjunto de funciones estadísticas que se han empleado en la literatura para el análisis de señales EEG en sistemas BCI, han sido seleccionadas para extraer la matriz característica $X[n]$ sobre la cual se entrenará el clasificador. Estas medidas estadísticas se consideran para extraer la matriz de espacio de características $X[n]$ que servirá de entrada a los algoritmos de clasificación SVM, KNN y LDA.

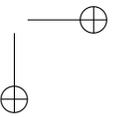
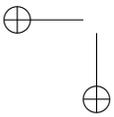
2.2.1. Coeficiente de variación

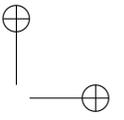
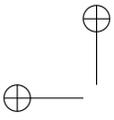
La media (μ), la desviación estándar (σ) y el coeficiente de variación (CV) son frecuentemente usadas como características cuando la amplitud de una señal EEG es empleada en su análisis [13] y [14]. El coeficiente de variación para una señal está definido como en (5):

$$CV = \frac{\sigma^2}{\mu^2} \quad (5)$$

donde,

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |C_{j,k}^i| \quad y \quad \sigma = \sqrt{\left(\left(\frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^n C_{j,k}^i - \mu \right)^2} \quad (6)$$





CV permite comparar el nivel de dispersión de la variación de la amplitud de la señal [13]. En nuestro estudio se calcularán valores de CV de los nodos (5, 2), (5, 3) y (5, 4) al quinto nivel de descomposición Wavelet.

2.2.2. Energía relativa

Con el algoritmo de descomposición WT se obtiene un conjunto de coeficientes para cada nodo, dentro del n -ésimo nivel de descomposición. A partir de estos coeficientes es posible calcular la energía relativa para cada nivel (1, . . . , n). La energía relativa para j -ésimo nivel de descomposición se define como (7), y es utilizado para extraer información útil de la señal sobre el proceso en estudio [15] y [16].

$$ER = \frac{E_j}{E_{total}}, \quad j = 1 \text{ hasta } n \quad (7)$$

E_j está dada como en (8).

$$E_j = \sum_k |C_{j,k}^i|^2 \quad (8)$$

2.2.3. Varianza

La varianza (VAR) de los coeficientes WP es calculada como el promedio del cuadrado de la desviación estándar de la señal y está definida como en (9).

$$VAR = \frac{1}{n-1} \sum (x_i - \mu)^2 \quad (9)$$

2.2.4. Potencia espectral (PSD)

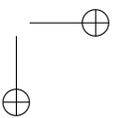
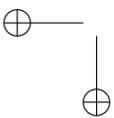
La potencia espectral ha sido ampliamente usada para el análisis de señales EEG, como en [17] y representa la potencia de una señal distribuida en frecuencia, y se obtiene como la Transformada de Fourier de la función de autorrelación de la señal $x(t)$, dada mediante (10), donde f_s es la frecuencia de muestreo de la señal, n el número de muestras y $DFFT$ es la Transformada discreta de Fourier de la señal.

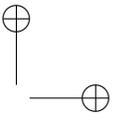
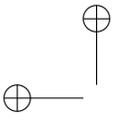
$$PSD = \frac{1}{f_s * n} |DFFT|^2 \quad (10)$$

Una vez calculada la PSD, se determina su varianza y valor máximo espectral que serán tenidos en cuenta en nuestro vector de características.

2.3. Reducción de características mediante entropía difusa

En el enfoque probabilístico, la entropía de Shannon es una medida bien conocida de la incertidumbre y se cubre ampliamente en la literatura [19]. Una extensión de la entropía de Shannon es el concepto de entropía difusa, en la que los conjuntos difusos se utilizan para ayudar a la estimación de la entropía. La entropía difusa se diferencia de la entropía de Shannon clásica en cuanto la





entropía difusa contiene incertidumbres difusas (posibilista), mientras que la entropía de Shannon contiene incertidumbres con aleatoriedad (probabilística).

La entropía difusa, al igual que la entropía de Shannon satisface los cuatro axiomas de De Luca-Termini [18]. La entropía de Shannon se define a partir de una variable aleatoria discreta (x) con función de probabilidad $p(x_i)$, dada por (11).

$$H(X) = - \sum_i p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (11)$$

A partir de la entropía de Shannon, Khushaba, *et al.* [19] define la entropía difusa conjunta de los elementos de la clase i , denotada como $H(f, c_i)$, dada por (12), donde $P(f, c_i)$ puede ser interpretada como el grado en que la muestra predefinida para pertenecer a la clase i , realmente contribuye a esa clase específica.

$$H(f, c_i) = -P(f, c_i) \log P(f, c_i) \quad (12)$$

La entropía difusa completa a lo largo de las c -clases está dada por (13):

$$H(f, C) = \sum_i^c H(f, c_i) \quad (13)$$

El equivalente difuso para la probabilidad conjunta de los patrones de entrenamiento que pertenecen a la clase i , está dado por (14).

$$P(f, c_i) = \frac{\sum_{k \in A_i} \mu_{ik}}{NP} \quad (14)$$

donde A_i es el conjunto de índices de los patrones de entrenamiento que pertenecen a la clase i , NP es el número total de patrones, y μ_{ik} es el k -ésimo valor de membresía difusa perteneciente a la clase i .

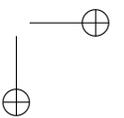
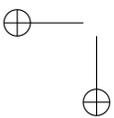
3. Marco experimental

En este trabajo hemos utilizado los datos recogidos durante experimentos de BCI en línea, y se han analizados como se describe en esta sección.

3.1. Base de datos

El conjunto de datos que se utilizó para la caracterización de patrones usando el método propuesto fue *BCI Competition 2008 – Graz dataset 2b*, proporcionado por el Departamento de Informática Médica, Instituto de Ingeniería Biomédica de la Universidad de Tecnología de Graz [8].

Esta base de datos consiste de información EEG de nueve sujetos estudiados en [20]. Los pacientes son diestros, poseen visión normal y se les pagó por participar en el experimento. Todos los voluntarios se sentaron en una silla mirando una pantalla ubicada aproximadamente a un metro de distancia al nivel de los ojos. Se proporcionaron cinco sesiones a cada paciente, las dos primeras



contienen información de entrenamiento sin realimentación y las últimas tres sesiones fueron registradas con retroalimentación.

Se registró la información proveniente de tres canales (C3, Cz, and C4) con una frecuencia de muestreo de 250 Hz. Las grabaciones tuvieron un rango dinámico de $\pm 100 \mu\text{V}$ para la proyección, y $\pm 50 \mu\text{V}$ para la retroalimentación. Los registros fueron transportados por un filtro pasabanda entre 0.5 Hz y 100 Hz, con filtro de corte en 50Hz. La colocación de los electrodos bipolares (distancia larga o corta, mayor o menor posición anterior y posterior) fue ligeramente diferente para cada voluntario.

El experimento, representado mediante la Figura 2 consiste en dos clases denominadas imaginación motora (MI) de la mano izquierda (clase 1) y mano derecha (clase 2). Cada sujeto participó en dos sesiones de grabación sin realimentación registrada en dos días diferentes dentro de dos semanas. Cada sesión consistió en seis ejecuciones con diez ensayos cada uno y dos clases de imágenes. En total se hicieron 20 ensayos por ejecución y 120 ensayos por sesión. Los datos de 120 repeticiones de cada clase MI estaban disponibles para cada persona en total. Antes del entrenamiento de la primera imaginación de movimiento, el sujeto imaginó y ejecutó movimientos para cada parte del cuerpo y seleccionó la que podía imaginar mejor (por ejemplo, apretar una pelota o tirar de un freno).

Cada ensayo se inició con una señal fijada en pantalla en forma de cruz y un tono corto de advertencia acústica (1 kHz, 70 ms). Luego, una señal visual (una flecha que apunta hacia la izquierda o hacia la derecha, según la clase solicitada) se presentó durante 1,25 segundos. Después, a los pacientes les correspondía imaginar el movimiento de la mano correspondiente durante un periodo de cuatro segundos. Cada ensayo fue seguido de un breve descanso de al menos 1,5 segundos. Se añadió un tiempo aleatorio de hasta un segundo para evitar la ruptura de la adaptación.

Para las tres sesiones siguientes con retroalimentación se registraron cuatro ejecuciones, en las que cada serie constaba de veinte ensayos para cada tipo de imaginación de movimiento. Al comienzo de cada prueba (segundo 0) la retroalimentación en pantalla de un “smiley” gris (representación de una cara sonriente) se centró en la pantalla. En el segundo 2, se emitió un pitido corto de

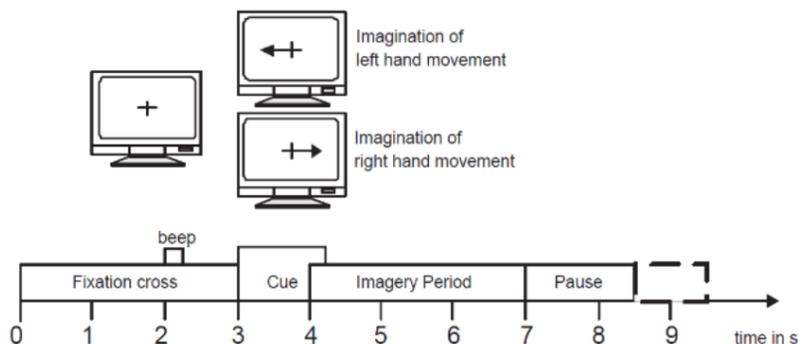
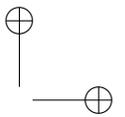
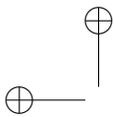


Figura 2. Esquema de tiempo en el experimento proporcionado por [8].



advertencia (1 kHz, 70 ms). La señal se presentó desde el segundo 3 al 7,5. Dependiendo de la señal, los sujetos estaban obligados a mover el “smiley” hacia el lado izquierdo o derecho imaginando movimientos de mano izquierda o derecha, respectivamente. Durante el periodo de retroalimentación el “smiley” cambió a verde cuando se movió en la dirección correcta, de lo contrario se convirtió en rojo.

3.2. Experimentos

Como primera instancia, seleccionamos los registros de las sesiones de entrenamiento aportados en [8]; Seleccionamos los datos registrados durante el periodo de imaginación motora, comprendido entre los tiempos de 4 a 7 segundos. Con base en ellos, aplicamos la Transformada Wavelet Packet (WP) para cada canal (C3, Cz y C4) en cada una de sesiones de ejecución para cada sujeto, usando cinco niveles de descomposición y Daubechies-44 como Wavelet madre, que ha demostrado ser eficaz para muchos métodos de procesamiento de bioseñales basado en su semejanza [21].

Una descomposición WP a cinco niveles permite obtener en ese nivel 32 nodos que corresponden a rangos de frecuencia comprendidos entre [0-7.8125], [7.8125-15.6250], ... , [242.1875-250]. En nuestro estudio, seleccionamos los nodos WP mostradas en la Tabla I, teniendo en cuenta que las tareas de imaginación motora están asociadas con los ritmos de impor-

tancia clínica μ (8- 13 Hz) y β (13-30 Hz) medidos sobre la corteza sensoriomotora [22]–[24].

Tabla I. Rango de frecuencias de los nodos WP seleccionados

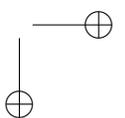
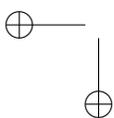
Nodos WP	Rango de Frecuencia (Hz)
[5,2]	7.8125 – 15.6250
[5,3]	15.6250 – 23.4375
[5,4]	23.4375 - 31.2500

A fin de caracterizar los ritmos cerebrales y representar la distribución de la frecuencia y la cantidad de cambios en ella, se calcularon funciones estadísticas ampliamente utilizadas en tareas de imaginación motora, sobre los coeficientes arrojados por la descomposición WP para cada nodo; estas son: Energía Relativa Wavelet (EneR), Varianza (Var), Desviación estándar (Std), Valor medio (Med), Coeficiente de variación (CV), Máximo pico PSD (MaxPSD) y Varianza de PSD (VarPSD).

En total se obtuvo un número de 63 características correspondientes a siete funciones evaluadas en los coeficientes WP asociados a los tres nodos de interés y tres canales C3, Cz y C4; Este conjunto de datos conforma el vector de características extraídas en cada ejecución $X[n]$.

Usando la función *fuzzy c-means* propuesta en [25], construimos los valores de membresía difusos μ_{ik} para cada una de las características obtenidas en el conjunto de datos; cada una de estas refleja el grado de pertenencia de la muestra para cada una de las dos clases.

Combinando los valores de membresía μ_{ik} obtenidos y las ecuaciones (4), (5) y (6), se calculó la entropía difusa sobre el espacio de características específicas. Un valor alto de entropía contribuye poco a la desviación entre las clases y los valores de entropía bajos presentan características más informativas. Así se logrará incrementar el resultado de precisión en la clasificación de los patrones de pensamiento ingeridos en el presente trabajo.



El vector resultante de veintidós características fue entrenado y clasificado usando clasificadores K -NN para cinco vecinos, máquinas de vector de soporte (SVM) con kernel lineal y Análisis discriminante lineal (LDA); asimismo, se evaluó el resultado mediante el criterio validación cruzada de diez pliegues (*10-cross validation*), dividiendo aleatoriamente en diez las muestras, de tal manera que un subconjunto es usado como datos de prueba y los nueve subconjuntos restantes son usados como datos de entrenamiento, proceso que se realiza mediante diez iteraciones; finalmente se calcula el promedio de los resultados en cada iteración. La ejecución de los algoritmos se realizó sobre un PC de 64 bits con procesador Intel i5 de 2.8 GHz y 6 GB de RAM.

3.3. Resultados y discusiones

La Tabla II muestra los resultados de la mejor clasificación obtenida por sujeto, usando clasificadores LDA , $KNN - 5$, y SVM . Estos resultados fueron evaluados sobre todas las 63 características del vector $X[n]$, producto de la descomposición Wavelet Packet (WP), y sobre las veintidós características más relevantes de acuerdo al algoritmo de entropía difusa ejecutado sobre el vector $X[n]$ para reducir la dimensionalidad (WP-FE). Se puede observar que la reducción de la dimensionalidad del vector característico produce un notorio incremento en la precisión de clasificación. El algoritmo de entropía difusa discrimina y selecciona las características con mayor contenido de información, logrando un conjunto de características relevantes que mejora la región de decisión de separabilidad para la tarea de clasificación. Asimismo, se observa que los clasificadores lineales SVM y LDA presentan mejores resultados de precisión respecto a KNN ; se podría pensar que la frontera de decisión óptima es aproximadamente lineal.

Tabla II. Precisión de clasificación, características WP y WP-FE usando clasificadores LDA, K-NN y SVM.

Dataset	LDA		SVM		KNN	
	WP	WP-FE	WP	WP-FE	WP	WP-FE
S1	77.5	81.7	79.2	84.2	70.8	80.8
S2	52.5	63.3	53.3	70.8	49.2	63.3
S3	36.7	68.3	42.5	69.0	48.3	68.3
S4	93.8	95.6	97.5	96.3	94.4	95.0
S5	79.4	80.6	81.3	81.3	75.6	73.1
S6	70.0	72.5	73.3	73.3	73.3	73.3
S7	85.6	87.5	87.5	86.3	82.5	86.3
S8	82.5	85.0	85.8	86.9	81.7	85.6
S9	78.1	77.5	78.8	81.9	72.5	69.4
Promedio	72.90	79.11	75.47	81.11	70.26	77.23

La Figura 3 muestra la precisión de clasificación del algoritmo WP-FE en función del número de características elegidas en cada ejecución. Como se observa, la mejor precisión siempre fue observada en el sujeto 4, y haciendo un análisis cuantitativo de los promedios en cada ejecución, se encontró que el menor número de características que mejor entrega resultados de precisión es 21. Este valor fue el número de características más relevantes en nuestro algoritmo y nos permite reducir a la tercera parte el vector de características inicial, lo que puede traducirse en menor costo computacional durante la clasificación del conjunto de datos, pues al ejecutar los dos algoritmos encontramos que el tiempo de ejecución se reduce en un 14 %.

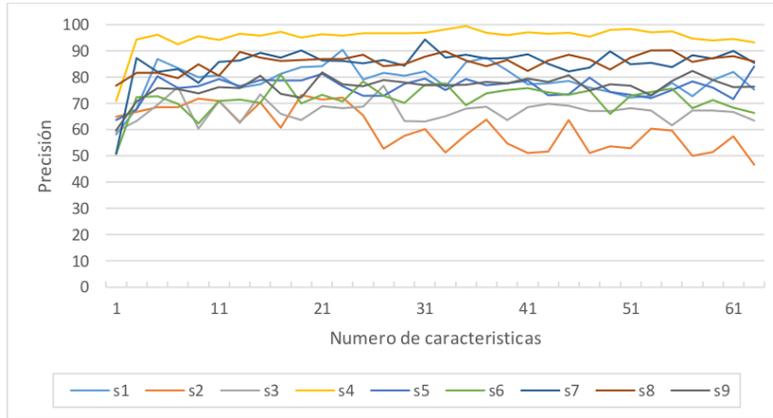


Figura 3. Curva de precisión del método propuesto para una selección de n-características.

Un análisis de las características más relevantes seleccionadas a partir del algoritmo WP-FE, detalla que los coeficientes Wavelet extraídos del nodo [5,3] presentan la mayor concentración de características, asociadas a los ritmos beta (β), como lo muestra la Tabla III. Es de verse también que las funciones aportadas por la potencia espectral y la varianza de los coeficientes entregan el mayor contenido de información en el vector característico final. Puede observarse en la figura 4 que esta discriminación de características proviene principalmente de los canales C3 y C4; el canal Cz aporta un mínimo conteni-

do de información.

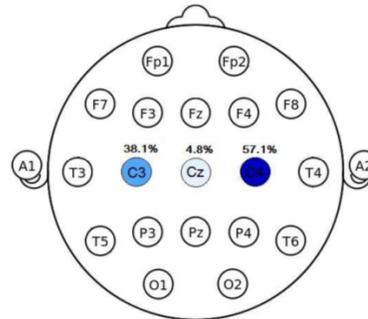


Figura 4. Porcentaje de características resultantes del algoritmo WP-FE asociadas a los canales C3, Cz y C4.

Tabla III. Porcentaje de aporte de las características de interés en los nodos Wavelet

Nodo WP	Numero de características	Grado de aporte	Funciones estadísticas/canal
[5,2]	6	28.6 %	Var_C4, Std_C4, CV_C4, MaxPSD_C4, VarPSD_C4
[5,3]	10	47.6 %	Var_C3, Var_C4, Std_C3, Std_C4, CV_C4, MaxPSD_C3, MaxPSD_C4, VarPSD_C3, VarPSD_Cz, VarPSD_C4
[5,4]	5	23.8 %	EneR_C3, EneR_C4, Var_C3, VarPSD_C3, VarPSD_C4

En este estudio, usamos el criterio kappa como medida para determinar el grado de concordancia de las observaciones y se compararon con resultados obtenidos por otros autores. Dichos resultados son mostrados en la Tabla IV.

Se puede observar que el valor medio del índice obtenido entre los sujetos en nuestro método se encuentra por encima de 0.6, valoración considerada de buena concordancia de acuerdo a [31]

y [32], y aun así, presentan menor dispersión que los resultados obtenidos por los demás autores.

Tabla IV. Cuadro comparativo de los resultados de precisión obtenidos, usando el índice kappa

Sujeto	Delgado [21]	Ang [22]	Bentlemsan [18]	Propuesto
S1	0.60	0.40	0.46	0.68
S2	0.32	0.21	0.33	0.42
S3	0.06	0.22	0.30	0.32
S4	0.97	0.95	0.94	0.92
S5	0.87	0.86	0.76	0.62
S6	0.78	0.61	0.58	0.46
S7	0.63	0.56	0.51	0.72
S8	0.88	0.85	0.81	0.74
S9	0.81	0.74	0.69	0.64
Promedio ± Desviación	0.66 ± 0.30	0.60 ± 0.27	0.59 ± 0.22	0.61 ± 0.18

4. Conclusiones

En este trabajo se propuso un enfoque de caracterización de señales EEG para la imaginación de movimiento de la mano derecha e izquierda, basados en Wavelet Packet y entropía difusa. Esta técnica beneficia la extracción de información alrededor de los ritmos de importancia clínica μ y β debido a su capacidad multiresolución y resolución espectral precisa.

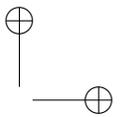
El uso de funciones estadísticas específicas evaluadas en los coeficientes de cada nodo WP seleccionado permitió la extracción de características de interés asociadas a componentes en amplitud y frecuencia de los mismos. El algoritmo de entropía difusa ayudó a seleccionar características de relevancia y reducir el espacio de dimensionalidad, con lo que se pudo incrementar la precisión de clasificación respecto al número inicial de características y lograr una reducción del costo computacional.

Los resultados obtenidos muestran que las características basadas en PSD y varianza pueden proporcionar un valor de relevancia mayor que las otras características analizadas. Además, nuestro enfoque muestra que los canales C3 y C4 producen mayor actividad de imaginación de movimiento de la mano derecha e izquierda que el canal Cz.

Del trabajo realizado podemos inferir que la discriminación mediante clasificador SVM ha tenido estadísticamente resultados sustanciales para tenerlos en cuenta en futuros trabajos de caracterización de señales EEG en imaginación de movimiento de las manos derecha e izquierda, orientados al desarrollo de sistemas automatizados BCI. Como trabajo futuro se pretenden analizar otras metodologías de caracterización de patrones basado en combinaciones Wavelet y descomposición empírica, así como explorar otras funciones estadísticas que se identifiquen con las características no estacionarias de este tipo de señales, buscando mejorar los resultados obtenidos y puedan ser aplicados en sistemas BCI orientados a personas con discapacidad motriz.

Referencias

- [1] T. M. Vaughan, "Guest editorial brain-computer interface technology: a review of the second international meeting". *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, Volumen 11, Número 2, 2003, pp. 94–109. ↑ [227](#)
- [2] J. Wang, G. Xu, L. Wang, and H. Zhang, "Feature extraction of brain-computer interface based on improved multivariate adaptive autoregressive models". *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, 2010, 895–898. ↑ [227](#)
- [3] D. Croz-Baron, J. M. Ramírez, M. Baker, V. Alarcon-Aquino and O. Carrera, "A BCI motor imagery experiment based on parametric feature extraction and Fisher Criterion". *CONIELECOMP 2012, 22nd International Conference on Electrical Communications and Computers*, 2012, 257–261. ↑ [227](#)
- [4] C. Chen, W. Song, J. Zhang, Z. Hu and H. Xu, "An Adaptive Feature Extraction Method for Motor-Imagery BCI Systems". *2010 International Conference on Computational Intelligence and Security*, 2010, 275–279. ↑ [227](#)
- [5] D. Hu, W. Li, and X. Chen, "Feature extraction of motor imagery EEG signals based on Wavelet Packet decomposition". *The 2011 IEEE/ICME International Conference on Complex Medical Engineering*, 2011, 694–697. ↑ [227](#)
- [6] L. Zou, X. Wang, G. Shi, and Z. Ma, "EEG feature extraction and pattern classification based on motor imagery in brain-computer interface". *9th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI0010)*, 2010, 536–541. ↑ [227](#)
- [7] J. Kevric and A. Subasi, "Comparison of signal decomposition methods in classification of EEG signals for motor-imagery BCI system". *Elsevier, Biomedical Signal Processing and Control*, volumen 31, 2017, 398-406. ↑ [227](#)
- [8] Pfurtscheller G. et. al. BCI competition 2008, Graz Data Set 2b. [En línea]. Disponible en: <http://www.bbci.de/competition/iv/> ↑ [228](#), [231](#), [232](#), [233](#)
- [9] S. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation". *IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell.*, vol. 11, pp. 674-693, 1989. ↑ [228](#), [229](#)
- [10] I. Daubechies, "Orthonormal bases of compactly supported wavelets". *Commun. Pure Appl. Math.*, vol. XLI, pp. 909-996, 1988. ↑ [228](#)
- [11] R. R. Coifman, Y. Meyer, S. R. Quake, and M. V. Wickerhauser, "Signal Processing and Compression with Wavelet Packets". *Prog. Wavelet Anal. Appl.*, pp. 77–93, 1993. ↑ [228](#)
- [12] M. Akay, "Wavelet applications in medicine". *IEEE Spectrum*, vol. 34, no. 5, pp. 50–56, May 1997. ↑ [228](#)
- [13] Y.U. Khan, J. Gotman, "Wavelet based automatic seizure detection in intracerebral electroencephalogram, Clin". *Neurophysiol, Volumen 114, número 5*, 2003, 898–908. ↑ [229](#), [230](#)
- [14] D. Deng, "Fatigue Detection of Drivers Based on Electroencephalograph". *International Conference on Industrial Informatics, IEEE*, 2016. ↑ [229](#)
- [15] G. Garg, V. Singh, J. R. P. Gupta, and A. P. Mittal, "Wrapper based wavelet feature optimization for EEG signals". *Biomed. Eng. Lett.*, vol. 2, no. 1, pp. 24–37, 2012. ↑ [230](#)
- [16] L. Shaw and A. Routray, "Statistical features extraction for multivariate pattern analysis in meditation EEG using PCA". *2016 IEEE EMBS International Student Conference (ISC)*, Ottawa, 2016. ↑ [230](#)
- [17] L. Sun and Z. R. Feng, "Classification of imagery motor EEG data with wavelet denoising and features selection". *2016 International Conference on Wavelet Analysis and Pattern Recognition (ICWAPR)*, Jeju, 2016, pp. 184-188. ↑ [230](#)
- [18] A. De Luca and S. Termini, "A definition of a nonprobabilistic entropy in the setting of fuzzy sets theory". *Inf. Control, volumen 20, número 4*, 1972, 301–312. ↑ [231](#), [236](#)
- [19] RN.Khushaba, A. Al-Jumaily, A. Al-Ani. "Novel feature extraction method based on fuzzy entropy and Wavelet Packet transform for myoelectric Control". *2007 Int Symp Commun Inf Technol*, 2007, 352–357. ↑ [230](#), [231](#)
- [20] R. Leeb, F. Lee, C. Keinrath, R. Scherer, H. Bischof, G. Pfurtscheller. "Brain-computer communication: motivation, aim, and impact of exploring a virtual apartment". *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering, volumen 15*, 2007, 473–482. ↑ [231](#)
- [21] J. Rafiee, M.A. Rafiee, N. Prause, M.P. Schoen, "Wavelet basis functions in biomedical signal processing". *Expert Systems with Applications, Volumen 38*, 2011, 6190–6201. ↑ [233](#), [236](#)
- [22] H. Zhang, C. Guan, K.K. Ang, C. Wang, "BCI competition IV-data set I: learning discriminative patterns for self-paced eeg-based motor imagery detection". *Front. Neurosci. Volumen 6*, 2012. ↑ [233](#), [236](#)
- [23] R. Leeb, F. Lee, C. Keinrath, R. Scherer, H. Bischof, G. Pfurtscheller, "Brain-computer communication: motivation, aim, and impact of exploring a virtual apartment". *IEEE Trans. Neural Syst. Rehab. Eng. Volumen 15, número 4*, 2007, 473-482. ↑ [233](#)



- [24] G. Pfurtscheller, C. Brunner, A. Schlogl, F.L. da Silvab, “Mu rhythm (de) synchronization and EEG single-trial classification of different motor imagery tasks”. *Neuroimage, Volumen 31, número 11*, 2006, 153–159. ↑[233](#)
- [25] B. Medina & L. Duque, “Fuzzy entropy relevance analysis in DWT and EMD for BCI motor imagery applications”. *Revista de Ingeniería, Volumen 20, número 15*, 2015, 9-19. ↑[233](#)
- [26] Maouia Bentlemsan, et al., “Random Forest and Filter Bank Common Spatial Patterns for EEG-Based Motor Imagery Classification”. *2014 Fifth International Conference on Intelligent Systems, Modelling and Simulation*. 2014, 235-238. ↑
- [27] Xiaojing Guo, et. al. “Envelope detection based on online ICA algorithm and its application to motor imagery classification”. *6th Annual International IEEE EMBS Conference on Neural Engineering*, 2013, 1058-1061. ↑
- [28] Seung-Hyeon Oh, Yu-Ri Lee, and Hyoung-Nam Kim. “A Novel EEG Feature Extraction Method Using Hjorth Parameter”. *International Journal of Electronics and Electrical Engineering, Volumen 2, número 2*, 2014, 106- 110. ↑
- [29] J. Delgado Saa, M. Çetin. “A latent discriminative model-based approach for classification of imaginary motor tasks from eeg data”, *J. Neural Eng. Volumen 9, Número 2*, 2012. ↑
- [30] K. K. Ang, Z. Y. Chin, Ch. Wang, C. Guan and H. Zhang. “Filter bank common spatial pattern algorithm on BCI competition IV Datasets 2a and 2b”. *Frontiers in Neuroscience, Volumen 6*, 2012. ↑
- [31] JR. Landis and GG. Koch. “The measurement of observer agreement for categorical data”. *Biometrics* 33:159-174, 1977 . ↑[235](#)
- [32] D. Coppiters’t Wallant, V. Muto, G. Gaggioni, M. Jaspar, S.L. Chellappa, C. Meyer & C. Phillips. “Automatic artifacts and arousals detection in whole-night sleep EEG recordings”. *Journal of neuroscience methods*, 258, 124-133, 2016. ↑[236](#)

Boris Medina Salgado

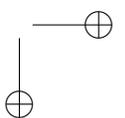
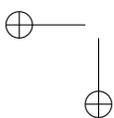
Corozal (Sucre), Colombia; ingeniero Electrónico de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia; magíster en Automatización y Control Industrial en el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín, Colombia; Docente de planta en el área de Ingeniería en la Universidad de Sucre, Colombia; e investigador del grupo GINELECT donde lidera el proyecto “Reconocimiento automático de comandos de pensamiento orientados a la implementación de Interfaces cerebro-computador”.

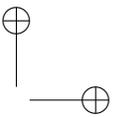
Correo electrónico: boris.medina@unisucra.edu.co

Ramón Álvarez López

Fonseca (La Guajira), Colombia; ingeniero electrónico, Universidad de Pamplona, Colombia; magíster en Controles Industriales en la Universidad de Pamplona, Colombia; PhD en la Universidad Nacional de Colombia; se desempeñó como Docente en el Instituto Tecnológico Metropolitano de Medellín durante dos años; posteriormente, ejerció como docente en la Universidad Nacional de Colombia donde desarrolló sus estudios doctorales; actualmente se desempeña como docente de planta en el área de Ingeniería en la Universidad de Sucre, Colombia, y pertenece como investigador al grupo de Investigación GINELECT.

Correo electrónico: ramon.alvarez@unisucra.edu.co





Workshop on Engineering Applications 2016: A step closer towards international recognition

REVISTA
Ingeniería

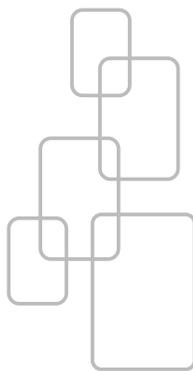
WEA 2017 has had an important boost since its proceedings have been switched to Springer Communications in Computer and Information Sciences (CCIS) which is one of the most recognized publishers in engineering. The quality of the accepted papers has been increased since only 37% of the reviewed papers have been accepted for publication in our proceedings, similar other high quality conference in the world.

This positive change has an important impact in the Colombian conferences standards since WEA 2016 has become the first 100% Colombian academic event that signed to Springer as its proceedings publisher. For future versions, the Program Committee (PC) has the expectation to become a recognized international conference, and they are working hard to achieve this goal.

There are different aspects we need to improve, and we know it's a gradual and progressive process. We are working on strengthening relationships with our friends from the Universidad Nacional de Colombia, Corporación Unificada Nacional (CUN), Universidad Tecnológica de Bolívar, IEEE UD and UN Student Branches, IISE 985 Student Chapter among others in order to form to community dedicated to spread of knowledge.

WEA 2016 has kept the window open to different engineering and science topics including statistics, geosciences, operations research, discrete event simulation, system dynamics, multi-agent modeling, uncertainty analysis, DSP, computational intelligence, IoT, machine learning, soft computing, etc., organized in thirteen sessions, two tutorials, a panel discussion, and six international plenary speakers.

This special section of the Revista Ingeniería of the Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas is the result of a selection performed by our PC members of the best papers, based on their quality, technical contents, and its presentation during the oral sessions. On behalf of WEA 2016 PC members, we thank all authors, volunteers, teachers, reviewers, and the staff of the Engineering Faculties of the Universidad Distrital, Universidad Nacional de Colombia, and Corporación Unificada Nacional (CUN)... Keep an eye upon us, WEA 2017 is coming!

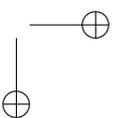
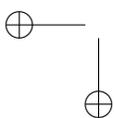


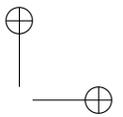
Juan Carlos Figueroa García, PhD.
Eduyn Ramiro López Santana PhD. (c)
Roberto Ferro Escobar PhD.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Open access



Citation: J.C. Figueroa, E. R. López, R. Ferro, "Workshop on Engineering Applications 2016: A step closer towards International Recognition" *INGENIERÍA*, vol. 22, no. 2, pp. 239, 2017.
©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reving.2017.2.ne02>





Research

Assessment of Effects of a Delay Block and a Nonlinear Block in Systems with Chaotic Behavior Using Lyapunov Exponents

Evaluación del Efecto de un Retardo y una No Linealidad en Sistemas con Comportamiento Caótico Utilizando Exponentes de Lyapunov

Pablo Rodríguez-Gómez^{*1}, Maikoll Rodríguez-Nieto¹, Jairo Soriano-Mendez¹

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá - Colombia

*Correspondence email: pcorrodriguez@correo.udistrital.edu.co

Received: 20/12/2016. Modified: 10/03/2017. Accepted: 31/03/2017

Abstract

Context: Because feedback systems are very common and widely used, studies of the structural characteristics under which chaotic behavior is generated have been developed. These can be separated into a nonlinear system and a linear system at least of the third order. Methods such as the descriptive function have been used for analysis.

Method: A feedback system is proposed comprising a linear system, a nonlinear system and a delay block, in order to assess his behavior using Lyapunov exponents. It is evaluated with three different linear systems, different delay values and different values for parameters of nonlinear characteristic, aiming to reach chaotic behavior.

Results: One hundred experiments were carried out for each of the three linear systems, by changing the value of some parameters, assessing their influence on the dynamics of the system. Contour plots that relate these parameters to the Largest Lyapunov exponent were obtained and analyzed.

Conclusions: In spite non-linearity is a condition for the existence of chaos, this does not imply that any nonlinear characteristic generates a chaotic system, it is reflected by the contour plots showing the transitions between chaotic and no chaotic behavior of the feedback system.

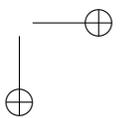
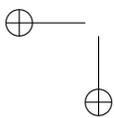
Keywords: Chaos, Dynamical Systems, Lyapunov Exponents, Nonlinear Characteristic.

Language: English.

Open access



Citation: P. Rodríguez, M. Rodríguez, J. Soriano, "Assessment of Effects of a Delay Block and a Nonlinear Block in Systems with Chaotic Behavior Using Lyapunov Exponents" INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 240-253, 2017.
©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.2.a05>



Resumen

Contexto: Al ser los sistemas realimentados muy comunes y ampliamente usados, se han desarrollado estudios de las características estructurales bajo las cuales se genera comportamiento caótico. Estos pueden ser separados en un sistema no lineal y un sistema lineal por lo menos de tercer orden. Se han usado métodos como la función descriptiva para su análisis.

Método: Se propone un sistema realimentado a partir de un sistema lineal, un sistema no lineal y un retardo, con el fin de evaluar su comportamiento utilizando los exponentes de Lyapunov. Se evalúa con tres diferentes sistemas lineales, diferentes valores del retardo y diferentes valores para los parámetros de una característica no lineal, buscando alcanzar un comportamiento caótico.

Resultados: Se realizaron cien experimentos para cada uno de los tres sistemas cambiando el valor de algunos parámetros evaluando la influencia de los mismos en la dinámica del sistema. Se realizan y analizan gráficas de contorno que relacionan estos parámetros con el máximo exponente de Lyapunov.

Conclusiones: A pesar que la no linealidad es una condición para que exista caos, esto no implica que cualquier característica no lineal genera un sistema caótico, esto se evidencia en las gráficas de contorno mostrando las transiciones entre comportamiento caótico y no caótico del sistema realimentado.

Palabras clave: Caos, Característica No lineal, Exponentes Lyapunov, Sistemas Dinámicos.

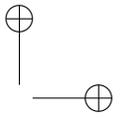
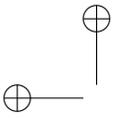
Idioma: Inglés

1. Introduction

The chaos has been object of study since past century and it has generated more interest in the researchers since was discovered that in nature exist systems with this type of behavior [1]. The chaotic systems also have been object of study in the control area due to they can be analyzed with mathematical tools of dynamical systems [2]. In practice is common to see systems which exhibit pure delays, either by their nature or by the controller used, anyway the system behavior is affected. One particular case are the systems with negative feedback which exhibit chaotic behavior under specific structural conditions. In [3], [4] feedback systems are shown which exhibit this behavior, also a structure is shown which divides the systems into a linear block and a nonlinear block in order to facilitate the analysis. It enlarges the study scope to search structural conditions and pure delay effects which generate chaotic behavior, which can be evaluated via different methods. For example, in [4]–[6] an evaluation is made by the descriptive function method. In [7], dynamical systems with time-delayed feedback are studied using Lyapunov exponents to identify strong or weak chaos. In [8], a numerical analysis of chaotic behavior of fractional-order Chen system is performed, using Lyapunov exponents and bifurcations diagrams.

In this work the chaotic behavior of a feedback system proposed is evaluated using Lyapunov exponents and phase plane. This system is composed of a linear block, a nonlinear block and a delay. Three linear systems are proposed, a pure delay which is implemented in simulation using the *Transport Delay* Simulink block and the non-linearity is built. In contrast to works [7], [8], the initial point is not a known chaotic system. In this case, the chaotic system is designed, built and assessed in order to identify which values of parameters are most influential to chaotic behavior.

This paper is organized as follows: In sections 2, 3 and 4 is described the conceptual framework for develop the study, in section 5 the proposed feedback system and its elements are described



in greater detail, in section 6 is showed how the simulation was implemented and the outcomes obtained for each evaluated case, and in section 7 the conclusions obtained are described.

2. Delay Systems

A continuous system is the one in which the continuous input signals are transformed into continuous output signals. A system can present an inherent delay that causes a time-shift in the input signal but does not affect his characteristics, this kind of delay is called pure delay. In practice is possible to find pure delays in some kind of systems, especially those with hydraulic, pneumatic or mechanical transmissions. The computer control systems also have delays as they require some time to perform numerical operations [9].

2.1. Padé Approximation

The pure delay transfer function is $e^{-L \cdot S}$, which Padé approximation is a rational function (1), where $P_m(s)$ is a polynomial defined by (2) and $Q_n(s)$ is a polynomial defined by (3) where n and m represent the degree of each polynomial [10]. The roots of polynomial $P_m(s)$ are called zeros and the roots of polynomial $Q_n(s)$ are called poles [9].

$$e^{-L \cdot S} = \frac{P_m(S)}{Q_n(S)} \quad (1)$$

$$P_m(S) = \sum_{k=0}^m \frac{(m+n-k)!m!}{(m+n)!k!(m-n)!} (-S)^k \quad (2)$$

$$Q_n(S) = \sum_{k=0}^n \frac{(m+n-k)!n!}{(m+n)!k!(n-k)!} (-S)^k \quad (3)$$

Is possible to choose $n = m$ to add the same number of poles and zeros. This approximation is used to know what order generates a similar behavior to feedback system with delay.

3. Simple Function

A simple function is a function that satisfies $\varphi : A \subseteq \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ which is given by:

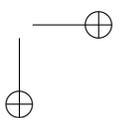
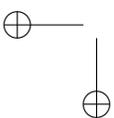
$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n g(x)\chi_{A_i}(x) \quad (4)$$

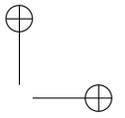
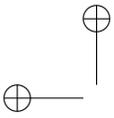
where $\chi_{A_i}(x)$ is the i -th indicator function [11].

if $g(x) = c \forall x \in A$, φ is called zero-order.

if $g(x) = c_0 + c_1x \forall x \in A$, φ is called first-order.

where $c, c_0, c_1 \in \mathbb{R}$ and are constants.





Below the simple function of first-order is used. This function is given by (5), which is used because of the ease to change the simulation parameters.

$$\varphi(x) = \sum_{i=1}^n (c_0 + c_1 x) \chi_{A_i}(x) \quad (5)$$

4. An Approach to Chaos in Dynamical Systems

A universally accepted definition for chaos does not exist yet, but almost every authors agree in three main features [12]:

1. *Aperiodic long-term behavior*: There are trajectories which do not settle down to fixed points, periodic orbits, or quasiperiodic orbits in the course of time.
2. *Deterministic*: The irregular behavior arises from the non-linearity of the system, rather than from noisy driving forces.
3. *Sensitive dependence on initial conditions*: Two different initial conditions but nearby each other, generate different trajectories.

Chaos can appear in feedback systems and a way to assess his behavior is through of Lyapunov exponents.

4.1. Feedback Systems

Due to the frequent use of feedback systems and all tools that exist for its analysis, it has been studied under which structural conditions a chaotic behavior is presented.

In [4] is suggested that a feedback system presents a chaotic behavior when a predicted limit cycle (PLC) and an equilibrium point (EP) of certain characteristics interact between themselves.

For chaos to be presented must exist a non-linearity in the system, therefore the feedback system can be represented as a linear subsystem and a nonlinear subsystem, also the lineal subsystem must be at least third order (Figure 1).

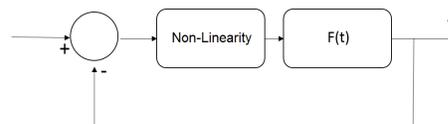
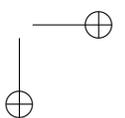
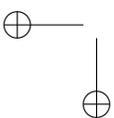


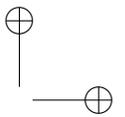
Figure 1. Structure feedback system (Source: [4])

4.2. Lyapunov Exponents

Two trajectories are considered which are separated by an initial distance d_0 at time t_0 that present a growth of distance (d_t) between them, which is calculated by (6) over a time period Δt [13], as illustrated in Figure 2.

$$d_t = d_0 e^{\lambda \Delta t} \quad (6)$$





$$\lambda = \frac{1}{\Delta t} \ln\left(\frac{d_t}{d_0}\right) \quad (7)$$

The number λ is called Lyapunov exponent, is defined by (7) and is used to quantify the chaotic behavior in dynamical systems. The authors in [14], [15], use Lyapunov exponents to study the behavior of a prototype electrochemical oscillator and the magnetic anisotropy effects in a magnetic particle respectively.

Depending on the value of the Lyapunov exponent there are three options:

- $\lambda < 0$, implies contraction, it means that the system converges to a fixed point.
- $\lambda = 0$, the system tends to a limit cycle.
- $\lambda > 0$, implies distance growth between the trajectories, the system presents chaotic behavior.

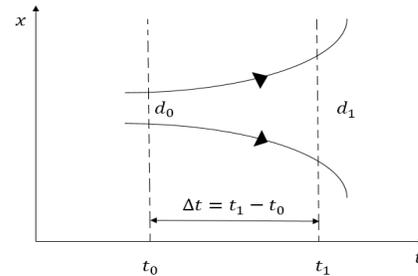


Figure 2. Two nearby divergent trajectories (Source: [13])

There are different methods to calculate the Lyapunov exponents as shown in [16], [17]. In the realized tests of this work the Gram-Schmidt method is used with a time span of 100 units time and 0.01 units time of transient time to three second order systems with delay. This method uses orthonormal initial conditions, e.g. $u_1 = [1, 0, 0, \dots]$, $u_2 = [0, 1, 0, \dots]$, Variables w_1 , v_1 y w_2 are calculated; Then, using w_2 value and equation 8 the Largest Lyapunov exponent is obtained, where K is the number of samples and T is the sample period.

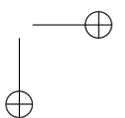
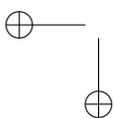
$$\begin{aligned} w_1 &= u_1, & v_1 &= w_1 / \|w_1\| \\ w_2 &= u_2 - \langle u_2, v_1 \rangle v_1, & v_2 &= w_2 / \|w_2\| \end{aligned}$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{KT} \sum_{i=1}^K \ln \|w_2^i\| \quad (8)$$

5. System Description

In practice, pure delays are presented in several kinds of systems [9], for this reason, a study is performed to observe whether chaotic behavior is generated from a linear system with delay and a non-linearity. One feedback system was built with these elements, as can see in Figure (3).

To perform the study, a linear system and a non-linearity were proposed following the structure suggested in [4] (Figure 1), the difference is in linear system by second order with delay and the non-linearity is built. Below explain with detail each part of the proposal.



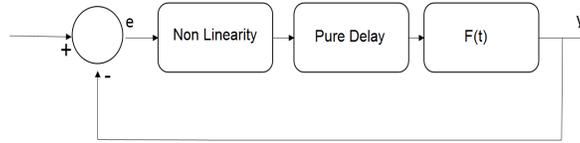


Figure 3. Feedback system structure proposed (Source: Authors)

5.1. Linear System

As is proposed in [4], a dynamical system is chaotic if his linear part is a oscillatory system and exist some feedback control features which make that system to present at least a predictable limit cycle. According to the above, three linear systems are proposed to analyze several cases or scenarios.

First System: It has a couple of complex conjugated poles with negative real part and two complex conjugate zeros with positive real part, which are symmetrical respect to imaginary axis. In Figure 4 is shown the root locus with the characteristics described.

The system transfer function is

$$G(S) = \frac{s^2 - 2s + 1}{s^2 + 2s + 1} \quad (9)$$

The state variables representation is

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -2x_1 - 2x_2 + u \\ y &= 2x_1 - 2x_2 + \dot{x}_2 \end{aligned} \quad (10)$$

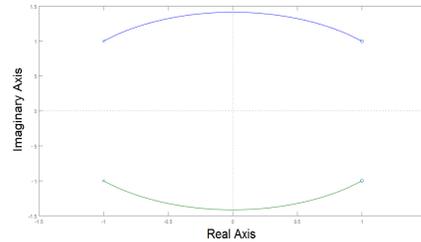


Figure 4. Root locus of the first linear system (Source: Authors)

Second System: It has a couple of complex conjugated zeros with positive real part and two real negative repeated poles. In Figure 5 is shown the root locus with the characteristics described.

The system transfer function is

$$G(S) = \frac{s^2 - 2s + 2}{s^2 + 2,828s + 2} \quad (11)$$

The state variables representation is

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -2x_1 - 2,828x_2 + u \\ y &= -4,828x_2 + u \end{aligned} \quad (12)$$

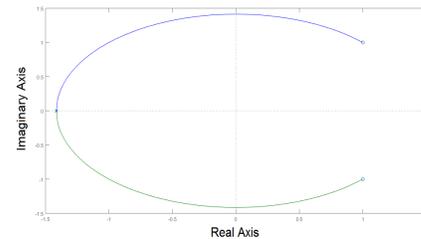
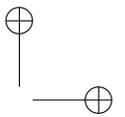
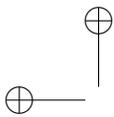


Figure 5. Root locus of the second linear system (Source: Authors)

Third System: It has a couple of complex conjugated zeros with positive real part and two real negative different poles. In Figure 6 is shown the root locus with the characteristics described.



The system transfer function is

$$G(S) = \frac{s^2 - 2s + 2}{s^2 + 2,828s + 1,75} \quad (13)$$

The state variables representation is

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -1,75x_1 - 2,828x_2 + u \\ y &= 0,25x_1 - 4,828x_2 + u \end{aligned} \quad (14)$$

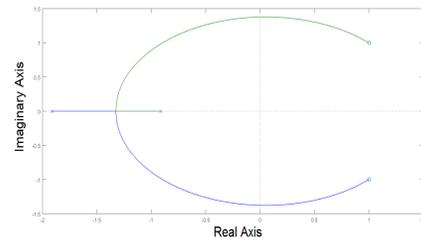


Figure 6. Root locus of the third linear system (Source: Authors)

5.2. Nonlinear Block

For this particular case, the nonlinear characteristic is not inherent to the system, so it is proposed a nonlinear block built from linear functions piecewise, and is implemented using the first order simple function defined by (5).

The nonlinear characteristic built is defined by (15) and is shown in Figure 7. The variable e is the input and represents the system error, defined by $e = -y$ being "y" the feedback system output; the variable u is the output of the nonlinear characteristic and represents the input to the linear system with delay.

$$u(e) = \begin{cases} m_1 e - b & ,if \quad e < -h \\ m_2 e & ,if \quad -h < e < h \\ m_1 e + b & ,if \quad e > h \end{cases} \quad (15)$$

In Figure 7 the parameters that constitute the nonlinear characteristic are indicated. These Parameters are:

- m_1 : Slope of linear equations of the ends
- m_2 : Slope of internal linear equation
- b : Vertical axis intercept of the linear equations with slope m_1
- h : It represents the transition between a linear equation and other.

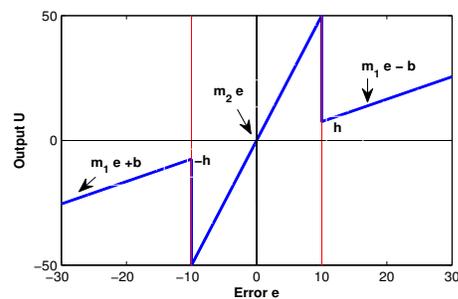
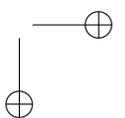
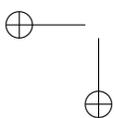
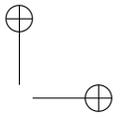
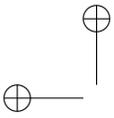


Figure 7. Proposed nonlinear characteristic (Source: Authors)

Some considerations taken in order to select each parameter are the following. First of all, based on root locus of each linear system, the gain value where the systems are marginally stable was found and is called k_m , for each system the value was $k_m = 1$. Based on this gain, the parameters





m_1 y m_2 were selected.

The gain value m_2 must be greater than k_m to move the poles to the unstable region and the gain value m_1 must be less than k_m to bring back the poles toward the stable region. When the error is into the m_2 zone, the system becomes unstable and the error value increases until it reaches the m_1 zone where the system becomes stable. These gain changes make the system have a erratic behavior and therefore, uncertainty of new values that can take the error is generated and it opens the possibility of a chaotic behavior in the system. Values of m_1 and m_2 that generate stronger changes of the poles position may exist. By last, the parameters h and b are selected arbitrarily. In the results section a tuning of all parameters described previously is made for a particular system, in order to identify what combinations generate chaotic behavior.

5.3. Delay

When a delay is analyzed with the Padé approximant described in section 2.1, the delay adds infinite poles and zeros to the linear system and it is converted in a superior order system. With this, the condition proposed in [4] is achieved, where is suggested that the linear system should be third order or greater. Different delay values were tried (since 0.5 until 7 time units) for a particular linear system in order to analyze effects in the feedback system.

6. Results

This section shows the implementation of the feedback system simulation which was proposed and described in preceding section. The parameters m_1 and b are fixed and the parameters m_2 , h and the delay time (t_d) are modified in order to evaluate their effects in the behavior of three feedback systems.

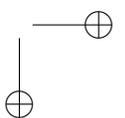
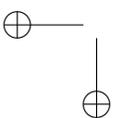
6.1. Simulation

The state equations of the three linear systems are implemented (10, 12, 14). The *Transport Delay* Simulink block is used for set the delay, and finally for the nonlinear characteristic three indicator functions are created, one for each piece of the equation (15) and using the first order simple function defined by (5) the straight equations are implemented, this implementation is shown in Figure (8).

To assess the chaotic behavior of the feedback system, a copy is created with initial conditions different but very close to the original conditions and orthonormal between them ($u_1 = \{x_1 = 1, x_2 = 0\}$, $u_2 = \{x_1 = 0, x_2 = 1\}$). The data of each state variable for a time span of 100 time units are collected and exported, and the Largest Lyapunov exponents are calculated using (8) with $K = 10000$ and a sample period $T = 0.01$ time units.

6.2. Tests with Different Linear Systems

Following the considerations described in section 5, a previous study of all parameters (m_1 , m_2 , h , b y t_d) was made, obtaining that the parameters m_2 , h y t_d are the most influential in



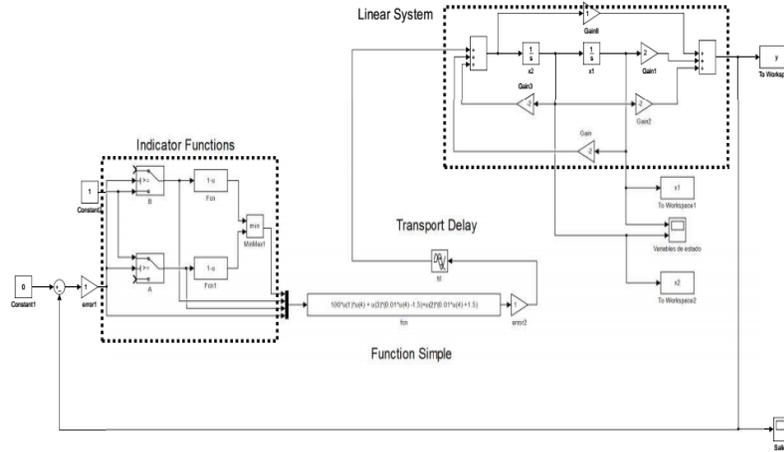


Figure 8. Simulation of the second order system with delay and nonlinear characteristic in negative feedback.

the feedback system behavior. In the feedback system, the linear system is changed by the three systems proposed and 100 tests are made to each one, changing the parameters values in this way: m_2 between 1.1 – 101.1, h between 1 – 4 and t_d between 0.5 – 7. For each parameter combination, the Largest Lyapunov exponent is computed with the equation 8 and the contour plots that show how changes this exponent in function of the three parameters are showed in figures 9, 11 and 13. When the Largest Lyapunov exponent is least or equal to zero it is codified in black color and it means that there is not chaotic behavior. Also, in those figures the transitions between chaotic and no chaotic behavior are shown.

First System:

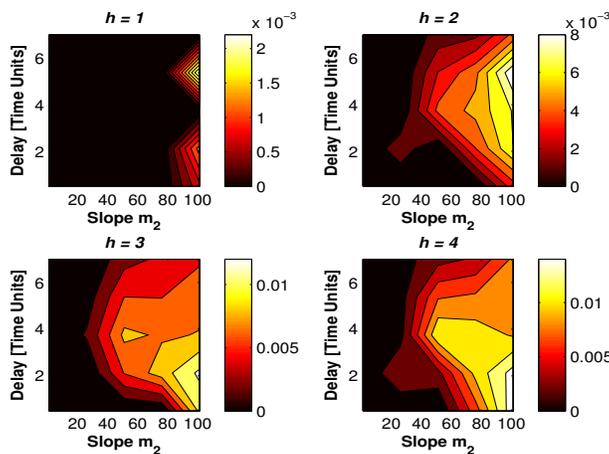


Figure 9. Contour plots of the Largest Lyapunov exponent color-coded as a function of m_2 , t_d and h to the first linear system. The fixed parameters are $m_1 = 0.01$ and $b = 1.5$. The resolutions are: $\Delta m_2 = 25$, $\Delta t_d = 1.625$ and $\Delta h = 1$.

As shown in figure 9, as h value increases, the zone where the Largest Lyapunov exponent is positive concentrates in the lower right corner, it means t_d values between 0.5 and 2.125, and $m_2 = 101.1$. The equation 8 is used to calculate the Largest Lyapunov Exponent of the 100 tests with the first linear system, and the highest was 0.01553 with $h = 4$, $m_2 = 101.1$ and $t_d = 0.5$. The phase plane obtained with this values is shown in figure 10.

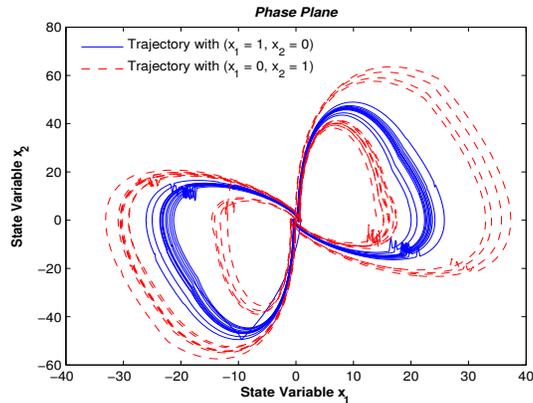


Figure 10. Phase Plane with first linear system, initial conditions $u_1 = \{x_1 = 1, x_2 = 0\}$, $u_2 = \{x_1 = 0, x_2 = 1\}$.

Second System:

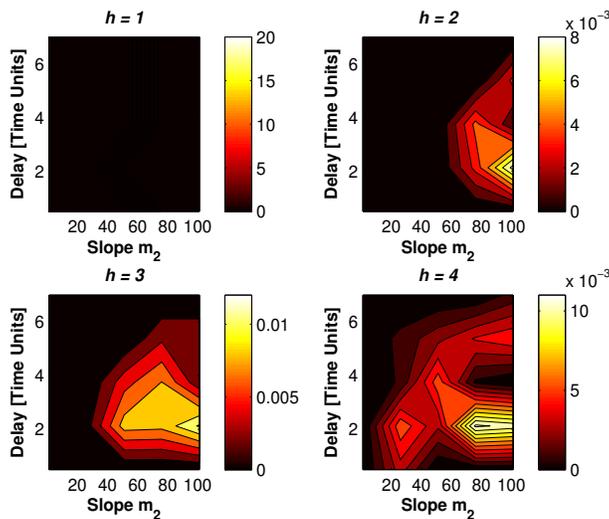


Figure 11. Contour plots of the Largest Lyapunov exponent color-coded as a function of m_2 , t_d and h to the second linear system. The fixed parameters are $m_1 = 0.01$ and $b = 1.5$. The resolutions are : $\Delta m_2 = 25$, $\Delta t_d = 1.625$ and $\Delta h = 1$.

For the second linear system is highlighted that with $h = 1$, the system behavior is not chaotic to any combination of m_2 and t_d , as shown in figure 11. The positive Largest Lyapunov exponent concentrates in the zone nearby to t_d values between 2.125 and 3.75, and m_2 between 51.1 and 101.1. The equation 8 is used to calculate the Largest Lyapunov Exponent of the 100 tests with the second linear system, and the highest was 0.01124 which was obtained with $h = 4$, $m_2 = 76.1$ and $t_d = 2.125$. The phase plane obtained with this values is shown in figure 12.

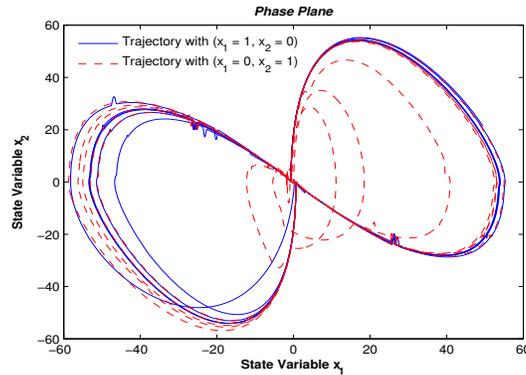


Figure 12. Phase Plane with second linear system, initial conditions $u_1 = \{x_1 = 1, x_2 = 0\}$, $u_2 = \{x_1 = 0, x_2 = 1\}$.

Third System:

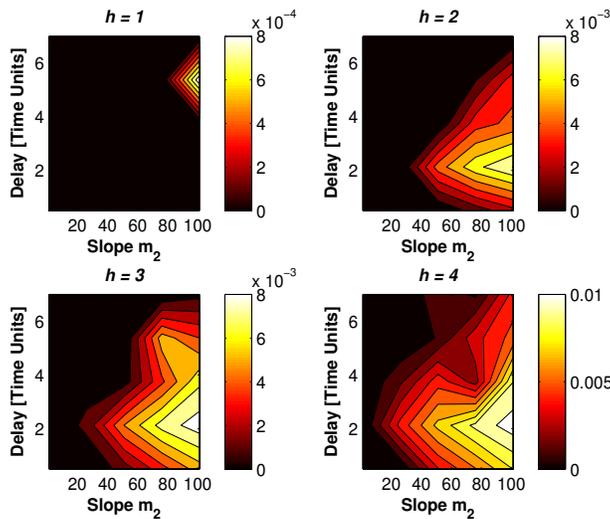


Figure 13. Contour plots of the Largest Lyapunov exponent color-coded as a function of m_2 , t_d and h to the third linear system. The fixed parameters are $m_1 = 0.01$ and $b = 1.5$. The resolutions are : $\Delta m_2 = 25$, $\Delta t_d = 1.625$ and $\Delta h = 1$.

As shown in figure 13, with $h = 1$ the Largest Lyapunov exponent concentrates in the zone nearby to $m_2 = 101.1$ and $t_d = 5.375$. As value of h increases, the positive Largest Lyapunov exponent concentrates in the zone of $m_2 = 101.1$ and t_d values between 2.125 and 3.75. The equation 8 is used to calculate the Largest Lyapunov Exponent of the 100 tests with the third linear system, and the highest was 0.01056 which was obtained with $h = 4$, $m_2 = 101.1$ and $t_d = 2.125$. The phase plane obtained with this values is shown in figure 14.

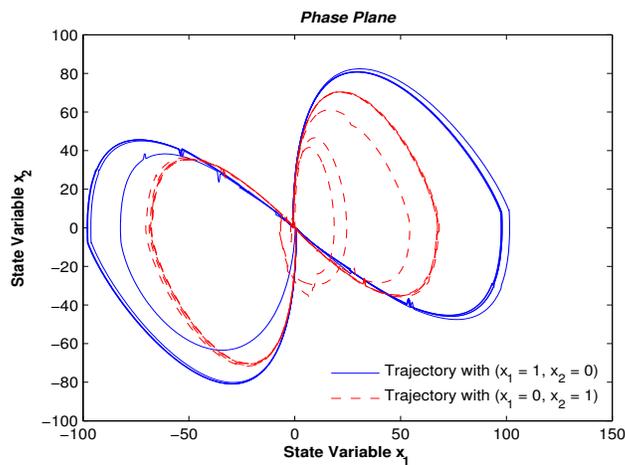


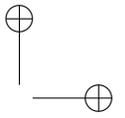
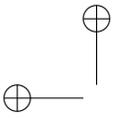
Figure 14. Phase Plane with third linear system, initial conditions $u_1 = \{x_1 = 1, x_2 = 0\}$, $u_2 = \{x_1 = 0, x_2 = 1\}$.

In general, changing the parameters values h , t_d and m_2 is possible to identify the transition zones between chaotic and no chaotic behavior. As h increases, the transition point between stable and unstable regions moves away from origin (Figure 7), allowing erratic behavior be more influential in the dynamical feedback system. It is manifested numerically in the increment of Largest Lyapunov exponent. For specific h and t_d values, the increment of m_2 manifests an increment of Largest Lyapunov exponent which represents the chaotic behavior in the system. The influence of delay value t_d on the Largest Lyapunov exponent in each system was particular; for the first system, the parameters t_d and h were the more influential while that in second and third system the more influential parameters were h and m_2 .

7. Conclusions

Under the considerations and the systems proposed in this paper there are certain observations.

The proposed second order systems, are more likely to have disturbances in their natural behavior due to external factors. This study allowed an assessment of the impact of a pure delay and a nonlinear block for a particular linear system, and how a built feedback system using this elements presents chaotic behavior. The tool that allowed this study was Lyapunov exponents due to they are interpretable and easy to implement when is identifying chaotic behavior in the systems.

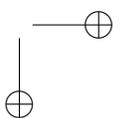
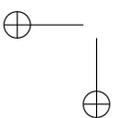


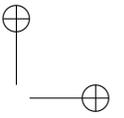
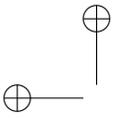
In spite non-linearity is a condition for the existence of chaos, this does not imply that any nonlinear characteristic generates a chaotic system. Separately, delay and nonlinear characteristic make to feedback system modify its dynamic and a limit cycle is created. Together, they can generate chaotic behavior under the right conditions, such as those achieved when the parameters values were changed, watching the transitions of system dynamics between chaotic and no chaotic behavior.

This work gives rise to try out other systems with different structures, other types of non-linearity, other methods to build the non-linearity and an exploration into delay approximation with a greater order, being mindful that the chaotic behavior in the systems is being evaluated.

References

- [1] Kathleen T Alligood, Tim Sauer, and James A Yorke. *Chaos: an introduction to dynamical systems*. New York;[London]: Springer, 2011. 241
- [2] John Guckenheimer and Philip J Holmes. *Nonlinear oscillations, dynamical systems, and bifurcations of vector fields*, volume 42. Springer Science & Business Media, 2002. 241
- [3] RW Brockett. "On conditions leading to chaos in feedback systems". In *Decision and Control, 1982 21st IEEE Conference on*, pages 932–936. IEEE, 1982. 241
- [4] R Genesio and A Tesi. "Chaos prediction in nonlinear feedback systems". In *IEE Proceedings D-Control Theory and Applications*, volume 138, pages 313–320. IET, 1991. 241, 243, 244, 245, 247
- [5] Arturo Buscarino, Luigi Fortuna, Mattia Frasca, G Sciuto, and MG Xibilia. "Harmonic balance method for time–delay chaotic systems design". In *IFAC Proceedings Volumes*, volume 44, pages 5112–5117. Elsevier, 2011. 241
- [6] AC Barragán and JJ Soriano. "Describing function based analysis of the characteristics of chaotic behavior in the jerk dynamic system". *Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV), 2014 IEEE*, pages 1–6, 2014. 241
- [7] Thomas Jüngling and Wolfgang Kinzel. "Scaling of Lyapunov exponents in chaotic delay systems". *arXiv preprint arXiv:1210.3528*, 2012. 241
- [8] Hongyan Jia, Qinghe Wang, Qian Tao, and Wei Xue. "Analysis and Circuit Implementation for the Fractional-order Chen System". In *8th CHAOS Conference proceedings*, 2016. 241
- [9] Benjamin C Kuo. *Sistemas de control automático*. Pearson Educación, 1996. 242, 244
- [10] M Vajta. "Some remarks on Padé-approximations". In *Proceedings of the 3rd TEMPUS-INTCOM Symposium*, 2000. 242
- [11] Halsey Lawrence Royden and Patrick Fitzpatrick. *Real analysis*, volume 198. Macmillan New York, 1988. 242
- [12] Steven H Strogatz. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*. Westview press, 2014. 243
- [13] Witold Kinsner. "Characterizing chaos through Lyapunov metrics". *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, 36(2):141–151, 2006. 243, 244
- [14] Melke A Nascimento, Jason AC Gallas, and Hamilton Varela. "Self-organized distribution of periodicity and chaos in an electrochemical oscillator". *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(2):441–446, 2011. 244
- [15] Laura M Perez, Jean Bragard, Hector Mancini, Jason AC Gallas, Ana M Cabanas, Omar J Suarez, and David Laroze. "Effect of anisotropies on the magnetization dynamics". *Networks and Heterogeneous Media*, 10(1):209–221, 2015. 244
- [16] Marco Sandri. "Numerical calculation of Lyapunov exponents". *Mathematica Journal*, 6(3):78–84, 1996. 244
- [17] K Ramasubramanian and MS Sriram. "A comparative study of computation of Lyapunov spectra with different algorithms". *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 139(1):72–86, 2000. 244





Pablo Rodríguez Gómez

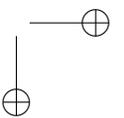
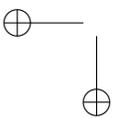
Electronics Engineering Student, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. His research interests include fuzzy systems, control theory and power systems.
e-mail: pcardríguezg@correo.udistrital.edu.co

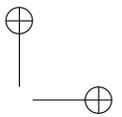
Maikoll Rodríguez Nieto

Electronics Engineering Student, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. His research interests include fuzzy systems, control theory and instrumentation theory.
e-mail: marodríguezn@correo.udistrital.edu.co

Jairo Soriano Mendez

Electronics Engineer, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, and Master of science in Industrial Engineering of the Universidad Distrital. At present, he works with the Laboratory for Automation and Computational Intelligence LAMIC in the development of fuzzy models applied to automatic control, and titular professor in the engineering department of the Universidad Distrital. His interests are fuzzy systems, automatic control and mathematics.
e-mail: jairosoriano@udistrital.edu.co





Research

Operation of a Photovoltaic Microinverter as Active Power Filter using the single phase P-Q Theory and Sliding Mode Control

Operación de un Microinversor Fotovoltaico como Filtro Activo de Potencia Usando la Teoría P-Q Monofásica y Control en Modo Deslizante

Oswaldo Lopez-Santos¹, Sebastián Tilaguy-Lezama¹, Sandra P. Rico-Ramírez¹, Luis Cortes-Torres¹

¹Universidad de Ibagué, Tolima - Colombia
Correspondence: oswaldo.lopez@unibague.edu.co.

Received: 22/12/2016. Modified: 15/02/2017. Accepted: 28/03/2017.

Abstract

Context: Microinverters are widely used in modular photovoltaic installations but its operation with reduced power is limited to inject real power into the grid. One way to optimize the use of microinverters consist of providing them the Active Power Filtering (APF) capability, which allows its use as both distributed generation and compensation unit even under unfavorable conditions of insolation. With this approach, the output stage of the microinverter can provide reactive and distortive components of power in order to compensate power quality defects of a localized load.

Method: This paper proposes a non-linear control strategy to integrate the APF function in a single-phase two-stage photovoltaic microinverter. The proposal involves the use of the single-phase P-Q theory to generate the current reference, sliding mode control to achieve a robust tracking of that reference and linear robust control to maintain the power balance regulating the DC-link voltage of the microinverter. The proposed control does not require the use of low-pass filters and in turn uses a recursive average computation improving the general performance of the system.

Results: The theoretical approach is validated by means of simulation results in which appropriate levels of harmonic distortion are obtained in the grid-side current for different load types and power levels. The robustness of the control system is tested by applying disturbances in the harmonic content of the load current and its power level obtaining an appropriate dynamic performance adapted to the demands of the application.

Conclusions: The main advantage of this proposal is the possibility to add the active filter function to conventional microinverters extending its capability to power conditioning only integrating some algorithms. A simple design method to ensure reliability, robustness and high power quality is detailed.

Keywords: Microinverter, Active power filter, Single-phase PQ theory, Sliding-mode control, Non-Linear control

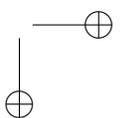
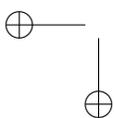
Language: English

Acknowledgements: This research is being developed with the partial support of the *Gobernación del Tolima - Convenio de cooperación 1026- 2013 - Research Culture and the Universidad de Ibagué* under project 16-406-SEM with the assistance of students from the Research Hotbed on Control and Power Electronics (SICEP), Research Group D+TEC.



Citation: O. Lopez, S. Tilaguy, S. P. Rico, L. Cortes, "Operation of a Photovoltaic Microinverter as Active Power Filter using the single phase P-Q Theory and Sliding Mode Control" INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 254-268, 2017.

©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.2.a06>



Resumen

Contexto: Los microinversores son ampliamente utilizados en instalaciones fotovoltaicas modulares pero su operación con potencia reducida es limitada a inyectar potencia real en la red. Una forma de optimizar el uso de los microinversores consiste en proveerles la capacidad para realizar Filtrado Activo de Potencia (FAP), lo que permite su uso como una unidad tanto de generación como de compensación distribuida, incluso en condiciones desfavorables de irradiación solar. Con esta propuesta, la etapa de salida del microinversor puede suministrar componentes de potencia reactiva y de distorsión para compensar defectos en la calidad de energía de una carga localizada.

Método: Se propone una estrategia de control no lineal para integrar la función FAP en un microinversor fotovoltaico monofásico de dos etapas. La propuesta involucra el uso de la teoría P-Q monofásica para generar la referencia de corriente, control en modo deslizante para conseguir un seguimiento robusto de dicha referencia y control lineal robusto para mantener el balance de potencia regulando el voltaje del bus DC intermedio del microinversor. El control propuesto no requiere del uso de filtros pasa-bajos y en cambio usa un cómputo recursivo de valor promedio, mejorando el desempeño general del sistema.

Resultados: La propuesta teórica es validada usando resultados de simulación en los que se evidencian niveles apropiados de distorsión armónica en la corriente de la red, los cuales se obtienen para diferentes tipos de carga y niveles de potencia. La robustez del sistema de control es puesta a prueba aplicando perturbaciones en el contenido armónico de la corriente de la carga y su nivel de potencia obteniendo un desempeño dinámico adecuado para las exigencias de la aplicación.

Conclusiones: La principal ventaja obtenida con el sistema de control propuesto es la posibilidad de adicionar la función de filtrado activo a los microinversores convencionales para extender su contribución hacia el acondicionamiento eléctrico con la integración de algunos algoritmos. Se detalla un diseño simple para asegurar confiabilidad, robustez y altos niveles de calidad de potencia.

Palabras clave: Microinversor, Filtro activo de potencia, Teoría P-Q monofásica, Control en modo deslizante, Control no lineal.

Idioma: Inglés

Agradecimientos: Esta investigación ha sido financiada parcialmente por la *Gobernación del Tolima según el Convenio de cooperación 1026- 2013 – Cultura científica y la Universidad de Ibagué* a través del proyecto 16-406-SEM con la asistencia de estudiantes del Semillero de Investigación en Control y Electrónica de Potencia (SICEP) del Grupo de investigación D+TEC.

1. Introduction

The photovoltaic microinverter technology is a recent development in the field of power electronics which has allowed the modularization of the photovoltaic installations and in consequence has disseminated the proliferation of the distributed generation around the world [1]–[3]. This technology allows overlooking, at least to a large extent, the problems related with the use of photovoltaic arrays such as mismatching and partial shading [4]. Nevertheless, the functionality of the microinverters remains limited to inject into the grid the real power obtained from solar modules what is insufficient when there are no other representative power sources supporting the further power components. This aspect motivates the research dedicated to expand the capabilities of the microinverters including the generation of reactive and harmonic power with the aim to cover the requirements of reactive and nonlinear loads [5], [6].

The current motivation is to achieve that the microinverter technology play a new role in AC distribution systems complementing their main objective of real power injection with capabilities of power conditioning [7]–[9]. This new approach introduces the distributed generation- conditioning concept, taking full advantage of the converters on the microinverter devices [10]. Thus, microinverters will be capable to generate a programmed amount of reactive power, a programmed harmonic content, or as it is presented in this paper, they can compensate the reactive and distortive power of localized loads. As a drawback, it is worth mentioning that the measurement of an additional current increases the cost of the system.

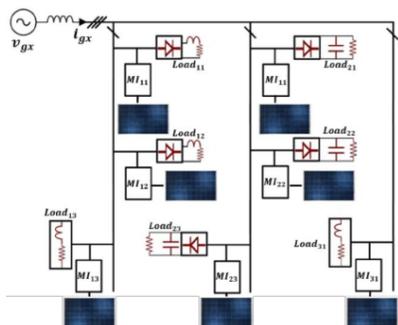


Figure 1. Distributed generation-conditioning architecture based on microinverters.

As depicted in figure 1, each load-microinverter set can be regarded by the grid as a resistive element if the microinverter permanently acts as Active Power Filter (APF) [11]–

[13], which simultaneously injects the generated power into the grid reducing the amount of power delivered by it to feed the load. In other words, if the power produced by the solar panel is enough to cover the consumption of the load, the grid does not provide power, and, on the contrary, if the power produced by the solar panel is not sufficient, the grid will assume the contribution of the missing power. The worst case consists on the grid supplying the power demanded by the load and the power losses associated to the operation of the microinverter as an active power filter. The power requirements of the proposed device are covered with the same architecture of a two-stage microinverter which normally is composed by a DC-DC converter and a DC-AC converter in cascade connection interacting through a common DC-link [14].

The single-phase P-Q theory is used in order to calculate the current waveform required to compensate the power quality of the localized load. The tracking of that current reference is accomplished by means of a simple controller enforcing a first order sliding surface on the output current of the microinverter. The average voltage of the DC-link is regulated by means of a Proportional-Integral (PI) controller affecting the fundamental component of the injected current. Then, this controller establishes the energy balance within the microinverter. The changes between operational modes take place without exhibiting commutation between modes.

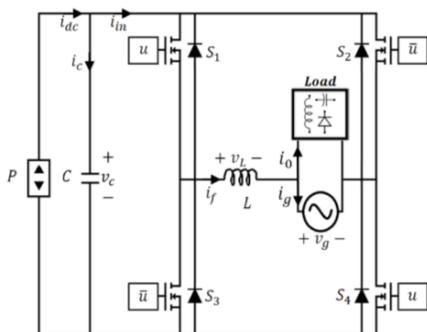


Figure 2. General representation of the proposed device.

Because of the number and complexity of mathematical operations required to implement the control, this paper assume that the proposed strategy can be implemented in both completely digital and hybrid analogue-digital form. In both cases, the proposal takes advantage of a novel and simple synchronization technique which fixes the number of samples per grid period regar-

dless the current value of the grid frequency [15]. Advantages and particularities of the proposed implementation are detailed and validated later.

The rest of the paper is organized as follows. Section 2 gives a general description of the system and its main characteristics whereas section 3 details the components of the proposed control. After that, several simulation results validating theoretical analysis are presented in section 4. Finally, conclusions are presented in section 5.

2. General Description

The output stage of a two-stage microinverter is a conventional full-bridge grid-connected DC-AC converter. To separate the analysis of both stages of the microinverter, the set consisting of the solar panel and the DC-DC stage can be considered as a power source as was introduced in [16], [17]. The circuit configuration takes the form represented in figure 2. The power source P represents the power available at the DC-link which is sourced by the solar panel through the DC-DC converter. The capacitor C serves as coupling element between DC-DC and DC-AC converters while the inductor L serves as coupling element between the DC-AC converter and the grid. The voltage v_g is the grid voltage which is the same output voltage of the microinverter and input voltage of the compensated load. The output current of the microinverter, the current of the load and the resulting current of the grid were named as i_f , i_o and i_g respectively. The bridge is controlled by means of the signal u applied directly to the interrupters S_1 and S_4 , and the complementary signal $\bar{u} = 1 - u$ applied to the interrupters S_2 and S_3 , this control inducing bipolar commutation. The current i_{dc} represents the current given by the power source P while the current i_{in} represents the input current of the full bridge.

Taking as starting point strategy proposed in [18] to control the output stage of a solar microinverter, the functions related with the active power filter capability were integrated, obtaining the block diagram depicted in figure 3. The blocks of single-phase P-Q theory, synchronization and sine-wave reference generation, ripple estimation, amplitude estimation and DC-link control are explained in detail in the following section.

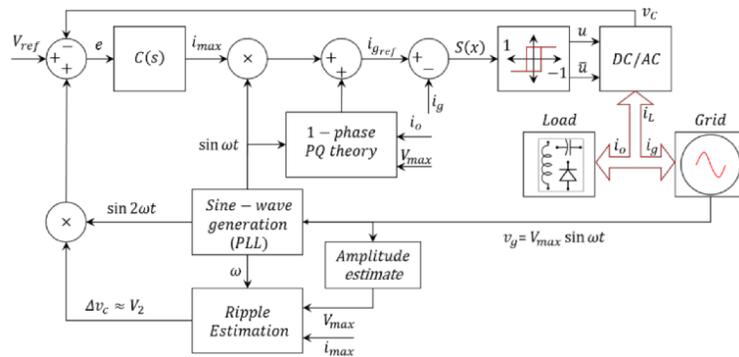


Figure 3. Block diagram representing the control requirements of the proposed power converter application.

3. Calculations, modeling and control

3.1. Modified single phase PQ theory

The P-Q theory originally developed for three phase systems uses the Clarke transform in order to obtain the representation of the current and voltage components in the complex plane. As it is introduced in [19]–[21], to obtain the same representation for single-phase systems, the fictitious vectors $v'_g(t)$ and $i'_o(t)$ are created by applying a phase shift of $\pi/2$ to the original signals as it is represented in the complex plane of figure 4. Thus, the real components of current and voltage are the instantaneous values of each $v_g(t)$ and $i_o(t)$ whereas the imaginary components are instantaneous values of its orthogonal versions $v'_g(t)$ and $i'_o(t)$.

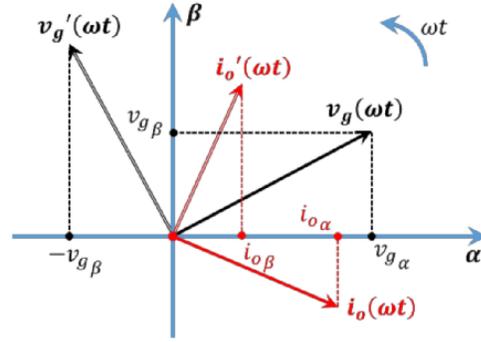


Figure 4. Representation of the current and voltage instantaneous space vectors on the imaginary plane.

With base on the above definition, it is possible to derivate the matrix expression obtaining the components of the instantaneous complex power:

$$\begin{bmatrix} p(\omega t) \\ q(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{g\alpha}(\omega t) & v_{g\beta}(\omega t) \\ -v_{g\beta}(\omega t) & v_{g\alpha}(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{o\alpha}(\omega t) \\ i_{o\beta}(\omega t) \end{bmatrix} \quad (1)$$

where $v_{g\beta}(\omega t) = -v'_{g\alpha}(\omega t)$, $i_{o\beta} = -i'_{o\alpha}(\omega t)$.

The active power $p(\omega t)$ can be also expressed as $p(\omega t) = P_g + \tilde{p}(\omega t)$, where P represents the per-period average of the power $p(\omega t)$ and $\tilde{p}(\omega t)$ the alternating component of $p(\omega t)$. As a consequence, the compensating current reference is:

$$i_{Lref}(\omega t) = \frac{v_g(\omega t) \cdot \tilde{p}(\omega t) - v'_g(\omega t) \cdot q(\omega t)}{v_g(\omega t)^2 + v'_g(\omega t)^2} \quad (2)$$

On the other hand, the current related with the real power delivered by the grid can be deduced using the expression (3).

$$i_{gref1}(\omega t) = \frac{v_g(\omega t) \cdot P_g}{v_g(\omega t)^2 + v'_g(\omega t)^2} \quad (3)$$

The use of (2) or (3) to control an active power filter are differentiated by using the terms direct current or indirect current control respectively. In our work, we are interested in implementations, its advantages and drawbacks; however, this paper focuses on the indirect technique considering the fact that the performance is higher than in the case of the direct technique because the feedback signal is the same variable in which the desired behavior is really induced.

The fundamental difference between the original P-Q theory and the modified P-Q theory is the use of a phase locked loop (PLL) to obtain the measured voltage $v_{g1}(\omega t)$ which allows overcome the negative effects of distortions in the estimation of the compensation current [22]. As it is detailed below, the use of a specific kind of PLL brings some relevant advantages to the system. The block diagram representing the applied P-Q theory is shown in figure 5. It is worth to highlight that the term $v_{g1}(\omega t)^2 + v'_{g1}(\omega t)^2$ becomes V_{gmax}^2 because both $v_{g1}(\omega t)$ and $v'_{g1}(\omega t)$ are pure sine waveforms generated by the PLL.

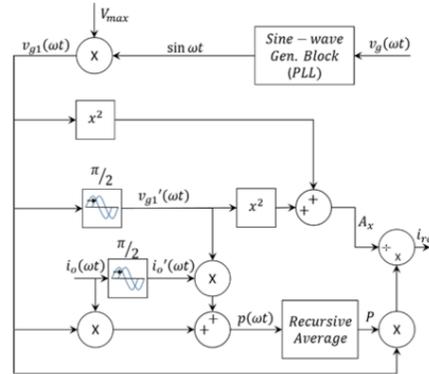


Figure 5. Block diagram of the single-phase P-Q theory implementation.

3.2. Synchronization and sine-wave generation

The P-Q theory was implemented with base on the grid synchronization system proposed in [15]. In this system, it is generated a sine waveform synchronized in frequency and phase with the grid using $N = 1024$ samples per period and consequently a high frequency N times higher than the grid frequency. That frequency is used to synchronize the execution of the control algorithms into the digital device with the following advantages:

- The commonly used low-pass filter required extracting the average power component and its delay effect are replaced by a recursive moving average filter (RMAF) improving noise and harmonic rejection, and reducing computational cost [23], [24]. The number of samples in the average is equal to N (1024) which is the same number of samples for a grid period; therefore, it is ensuring a high accuracy of the average computation and in consequence a high quality in the reference generation.
- The phase displacements required to generate the fictitious vector of the P-Q theory are highly accurate and no dependent of the grid frequency. A phase shift of 90° simply corresponds to a delay of 256 samples in the waveforms.
- Computations based on integrals averaged for a period of the grid frequency (average, RMS or FFT calculations) has a lower computational cost facilitating the optimization of execution time of per sample algorithm.

The same synchronization system provides the fundamental component required to inject the generated real power into the grid or in other case to extract the power to cover the power losses of the inverter. Complementarily, the PLL generates a double frequency component in order to estimate and cancel the effect of the voltage ripple of the DC-link in the control loops [25]. It is worth to mention that, the loop controller of the PLL also uses the RMAF instead of conventional low-pass filters.

3.3. Tracking of the current reference

The model of the grid-connected power converter can be expressed with the bilinear equation system:

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= -v_g + v_c u \\ C \frac{dv_c}{dt} &= \frac{P}{v_c} - i_L u \\ i_g &= i_L - i_o \end{aligned} \quad (4)$$

The tracking of the current reference is accomplished by means of a sliding-mode controller. This kind of control has been used with the same purpose by other authors [26]–[28] and it is selected considering its advantages such as rapid response, robustness against external disturbances and parameter uncertainty, despite of the well know disadvantage of variable frequency commutation when it is implemented using a hysteresis comparator with constant band.

The following first order sliding surface is defined:

$$S(x) = i_{gref} - i_g = I_{gmax} \sin \omega t - i_g \quad (5)$$

where i_{gref} is the reference current given by the P-Q theory computation. Analyzing the stability of sliding mode control the design requires fulfilling the transversality and reachability conditions. The transversality condition guarantees that the control variable u is present in the switching function derivate, or in other words to satisfy that $\frac{d\dot{S}(x)}{du} \neq 0$. To analyze this condition, time derivative of the sliding surface is obtained from (7) and (4) and after that the derivative of this result with respect to the control signal is obtained as follows:

$$\frac{d}{du}(\dot{S}(x)) = -\frac{v_C}{L} \quad (6)$$

Then, it was established that the transversality condition is fulfilled while the voltage of the DC link is different to zero which is true for every operational condition. In the worst case, the absence of control signals enforces the converter to operate as a diode bridge rectifier with an output capacitance ensuring a minimum voltage near to the peak value of v_g . The sign of transversality is negative and then, the sliding motion around the current reference is obtained by applying the following control law:

$$u = \begin{cases} -1 & \text{when } S(x) > 0 \\ 1 & \text{when } S(x) < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Because of the limitations of the electronic power devices to obtain infinite frequency commutation as suggest the application of sliding mode control, the control law (7) cannot be implemented directly and the switching frequency must be limited below admissible values. Then, the controller is implemented using a hysteresis comparator with a band of $\pm\Delta$ as it is depicted in figure 6.

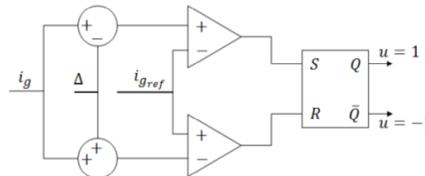
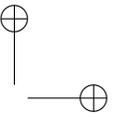
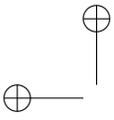


Figure 6. Circuit implementation of the sliding mode based current controller.



The reachability condition is used to determinate the capacity of system to reach the sliding surface from whatever arbitrary point. The reachability depends of the sign of transversality [30], and therefore its definition is:

$$\lim_{S(x) \rightarrow 0^-} \dot{S}(x)|_{u=-1} > 0 \quad (8)$$

$$\lim_{S(x) \rightarrow 0^+} \dot{S}(x)|_{u=1} < 0 \quad (9)$$

By applying the above definition in the system equations, the following condition is obtained:

$$\left| \omega L I_{gmax} \cos \omega t + L \frac{di_o}{dt} + V_{max} \sin \omega t \right| < V_c \quad (10)$$

In general terms, expression (10) shows that the value of V_{ref} must be selected is such a way that a considerable difference exist between the minimum value of v_c including its ripple component and the maximum value of v_g . Beyond to satisfy (10), the possible deviation of v_c during transitory disturbance events must be even considered.

Finally, applying the invariance conditions defined as $S(X) = 0$ and $\dot{S}(x) = 0|_{u=u_{eq}}$ and the equivalent control method [29], the resulting dynamics is:

$$i_g = i_{gref} \cong I_{gmax} \sin \omega t \quad (11)$$

$$C V_C \frac{dV_c}{dt} = P - i_L \left[L \left(\frac{di_{gref}}{dt} + \frac{di_o}{dt} \right) + V_g \right] \quad (12)$$

By averaging expressions for a half grid period, linearizing and applying the Laplace transform, it is obtained that:

$$V_c(s) = \frac{2L I_o s - V_{max}}{2V_{ref} C_s} I_{gmax}(s) + \frac{1}{C V_{ref} s} P(s) + \frac{L I_o}{C V_{ref}} I_o(s) \quad (13)$$

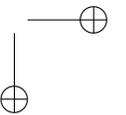
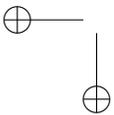
From (13), the transfer function of the DC link voltage to the output current amplitude can be used to synthesize a voltage regulator considering both the load current and the input power as disturbances.

3.4. DC-link voltage regulation

As it is explained in [31], a PI controller with a low-pass filter term can be applied in order to obtain zero error regulation of the DC-link voltage. This simple linear controller can reduce the effect of the double grid frequency component in the measurement of the DC link voltage and reject the possible power disturbances of power and load current. The controller has the form:

$$C(s) = \frac{K_p s + K_i}{s(T_f s + 1)} \quad (14)$$

The value of T_f is selected in order to considerable decrease the ripple component of 120 Hz in the DC link voltage. The K_p and K_i parameters are selected in order to ensure robustness against



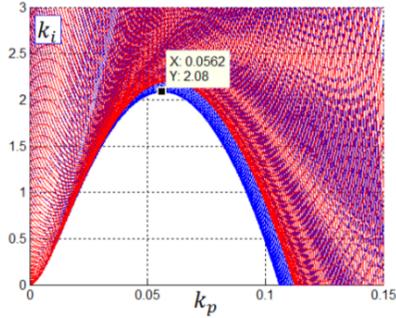


Figure 7. Robust loop shaping optimization in the K_p - K_i plane.

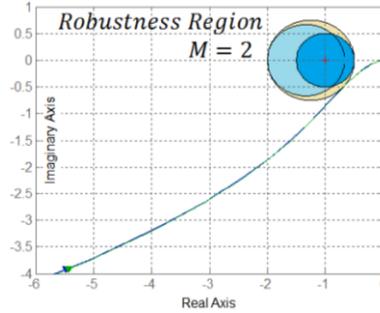


Figure 8. Nyquist curves and robustness region.

disturbances and parameter uncertainties. This objective can be accomplished by using the loop shaping method introduced in [32]. A value of 2 is selected for the combined sensitivity M following criteria presented in [33].

Figure 7 shows the two envelopes resulting after generate the whole space of solutions in the $K_p - K_i$ plane ensuring robustness for input power values of 10 W (red color) and 100 W (blue color). The best solution is that which maximizes K_i outside of the shaded areas which results in $K_p = 0,0562$ and $K_i = 2,08$ for the set of converter parameters in table I. With these parameters, the Nyquist curves of the loop transfer function $L(s) = I_{gmax}(s)^{-1}V_c(s)C(s)$ for the two limit values of power are depicted in figure 8. As it can be noted the robustness constrain was fulfilled with the selected controller parameters.

4. Simulation results

In order to validate the entire proposal and the applied concepts, several simulations have been implemented. Two type of load with two different power levels for each one have been used, an inductive-resistive load and a nonlinear load composed by a diode bridge rectifier with an inductive-resistive load at the DC side. The parameters used are listed in table I.

Table I. Converter and control parameters.

Parameter	Symbol	Value	Units	Parameter	Symbol	Value	Units
Converter parameters				Control parameters			
Nominal grid voltage	V_g	120	V	Proportional gain	K_p	0.18	Ω^{-1}
Nominal grid frequency	f_g	60	Hz	Integral gain	K_i	0.1	Ω^{-1}
DC-link capacitor	C	100	μF	Filtering time constant	T_f	0.005	Ω^{-1}/s
Coupling Inductor	L	10	mH	Hysteresis band	$\pm\Delta$	± 0.07	A
DC-link voltage	V_{ref}	240	V				

4.1. Steady-state performance (PF and THD)

Figure 9 shows simulated results evaluating the steady-state performance of the control system for two of the selected loads defined in Table II (Load 1 and Load 3) when the microinverter operates

as an active filter because of the absence of input power. The THD of the waveforms is given in order to show the effect of the compensation algorithm. In the first case, the RL load is demanding reactive power which is entirely delivered by the microinverter obtaining unitary DPF and PF.

Table II. Load Parameters

Parameter	Symbol	Value	Units	Parameter	Symbol	Value	Units
Load 1 parameters (RL)				Load 2 parameters (RL)			
Aparent power (60 Hz)	S_o	370	VA	Aparent power (120 V/60 Hz)	S_o	46	VA
Power factor	PF	0.26	-	Power factor	PF	0.26	-
Resistance	R_o	10	Ω	Resistance	R_o	80	Ω
Inductance	L_o	0.1	H	Inductance	L_o	0.8	H
Load 3 parameters (DRL)				Load 4 parameters (DRL)			
Aparent power (120 V/60 Hz)	S_o	162	VA	Aparent power (120 V/60 Hz)	S_o	16	VA
Power factor	PF	0.9	-	Power factor	PF	0.9	-
Total Harmonic Distortion	THD	47	%	Total Harmonic Distortion	THD	47	%
Resistance	R_o	80	Ω	Resistance	R_o	800	Ω
Inductance	L_o	0.8	H	Inductance	L_o	8	H

The figure 9a show the way in that the grid delivers a sinusoidal current without any phase shift respect to the voltage. The THD only increases a 0.30 % because of the high frequency component introduced by the microinverter. In the second case which is shown in figure 9b, the nonlinear load has not phase displacement but has a high harmonic content (47.3 %). The microinverter compensates the load allowing to obtain unitary PF. The THD of the grid current is reduced below 4 %. In both cases the THD of the current is below of 5 % which corresponds to a permissive value according to the actual normativity [34], [35]. Also in both cases, the power factor is compensated.

Figure 10 shows a complete analysis of the THD and PF obtained with the active filtering function of the microinverter for the overall operational range of load power and AC input voltage. Information was organized in 3D surfaces showing the simultaneous relation of each power quality indicator as function of both selected parameters. The first case corresponds to a RL load and the second case corresponds to a nonlinear load obtained with a diode bridge feeding a RL load. Points in surfaces were obtained using input voltage values between 110 and 130 V with steps of 5 V, and

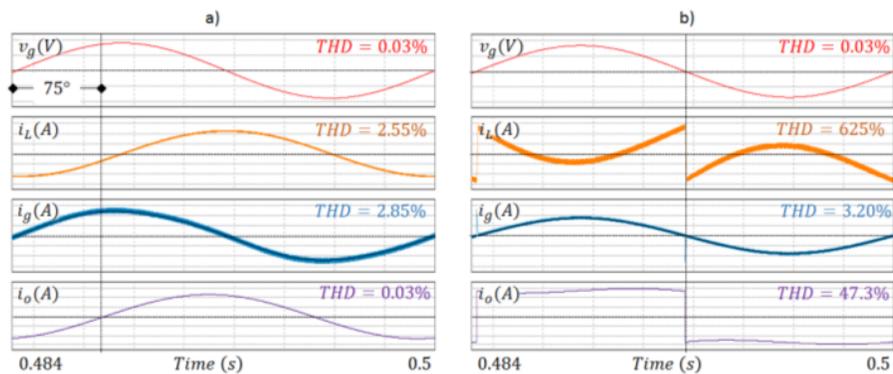


Figure 9. Simulated steady-state voltage and current waveforms for Load 1 and Load 3: a) Load 1 [100V/div, 2A/div, 0.5A/div, 2A/div]; b) Load 3 [100V/div, 0.5A/div, 1A/div, 0.5A/div].

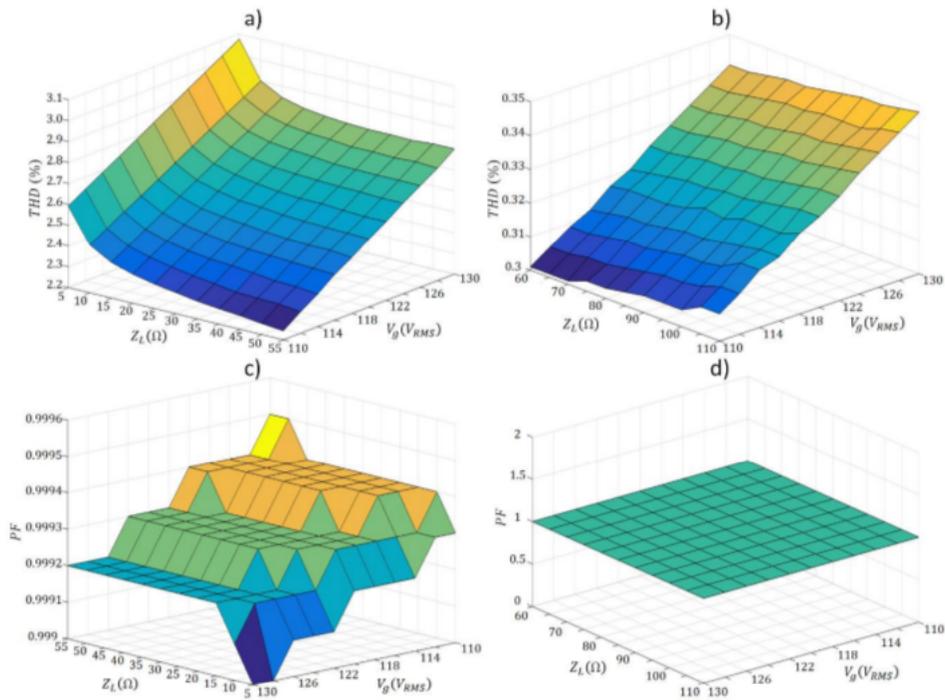


Figure 10. Total Harmonic Distortion (THD) vs. input voltage and load impedance: a) RL load, b) Nonlinear load. Power Factor (PF) vs. input voltage and load impedance: c) RL load; d) Nonlinear load.

load impedances between 5 and 55 Ω for the first case and between 60 and 110 Ω for the second case, considering steps of 5 Ω in both cases.

4.2. Transient response to input power and load disturbances

Figure 11 shows simulated results evaluating the transient response of the system when input power disturbances are applied. In subfigures 10a and 10b an input power change is applied at 0.4 s changing its value from 20 to 100 W. After that at 0.6 s, input power suddenly reduces to zero. The voltage of the DC-link absorbs the power disturbance returning to the desired value in less than 75 ms in both cases with voltage deviations lower than 10 %. This results show the robust response of the system rejecting power disturbances.

Figure 12 shows simulated results evaluating the transient response of the system when load changes are applied. The system operates with the load 1 0.4 s when the load 3 is added. After that, at 0.8 s, the load 1 is disconnected and the load 3 keeps connected. As it is can be noted, the system has the ability to cope with load changes without problem.

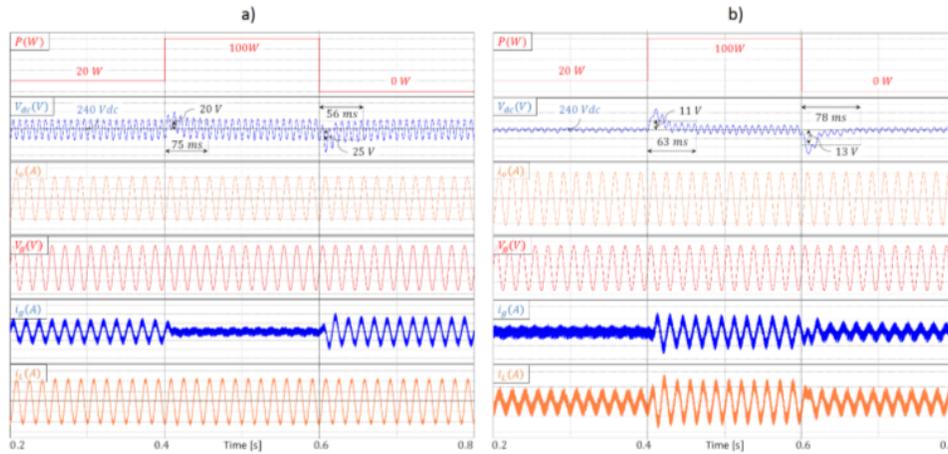


Figure 11. Transient response of the system coping with input power disturbances. a) Load 1 is connected. Scales: [20W/div, 20V/div, 2A/div, 100V/div, 0.5A/div, 2A/div]; b) Load 2 is connected. Scales: [20W/div, 10V/div, 0.5A/div, 100V/div, 0.5A/div, 1A/div].

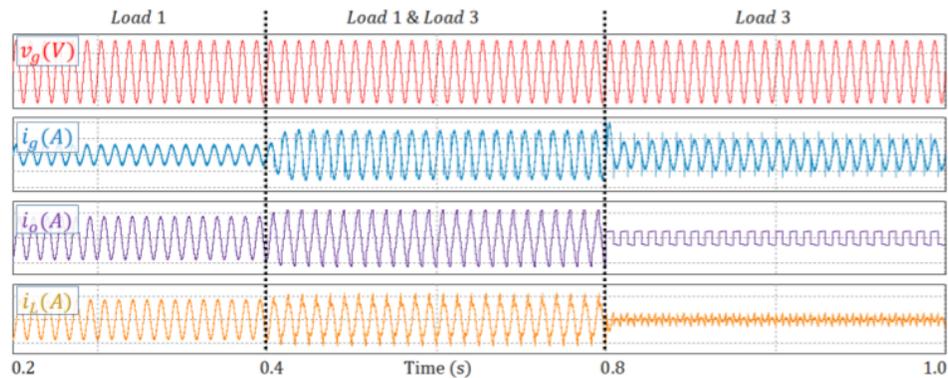
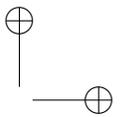


Figure 12. Simulated waveforms of transient responses of the system coping with load disturbances: e) system feeding load 1, load 2 or both [100V/div, 2A/div, 5A/div, 5A/div].

5. Conclusions

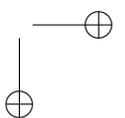
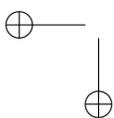
A new distributed power generation-compensation architecture based on single-phase microinverters has been presented. The main idea is to integrate the active power factor correction function in these devices taking advantage of the output-stage even if there is no production of photovoltaic solar energy. The proposal was validated by means of several simulation results evaluating the steady-state and dynamic performance of the converter working with different types of electrical loads and two different power levels for each of them. In the steady state, the obtained power factor is unitary and the THD in the grid current is reduced always below 5% what is in good agreement with the established standards. The performance of the microinverter coping with transient events was evaluated by applying disturbances in both input power and power load. The design of the



DC link voltage regulator using the robust loop shaping technique allowed to reduce the impact of disturbances obtaining voltage deviations below 10 % and reduced settling times below 75 ms. Compatibility of the P-Q theory in the reference generation, sliding mode control in the current controller and robust PI compensation in the DC link voltage control was facilitated by the use of a recursive moving average filter in which the number of samples is constant in a grid period despite of changes in the grid frequency. The current and future efforts are concentrated obtaining an experimental validation of the overall approach in which all control function are embedded in a digital signal processing device looking for a really optimized utilization of the computation and memory resources.

References

- [1] H. A. Sher, and K.E. Addoweesh, "Micro-inverters - Promising Solutions in Solar Photovoltaics," *Energy for Sustainable Development*, vol. 16, pp. 389-400, Dec. 2012. [↑255](#)
- [2] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S.B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1184-1194, Sep. 2004. [↑255](#)
- [3] Y. Xue, L. Chang; S.B. Kjaer, J. Bordonau, and T. Shimizu, "Topologies of single-phase inverters for small distributed power generators: an overview," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1305-1314, Sep. 2004. [↑255](#)
- [4] J.D. Bastidas, C.A. Ramos-Paja, and E. Franco, "Modeling and parameter calculation of photovoltaic fields in irregular weather conditions," *Revista INGENIERÍA*, vol. 17, no. 1, pp. 37-48, Jun. 2012. [↑255](#)
- [5] M. Molinas and J. Kondoh, "Power electronic loads as providers of reactive power ancillary service to the grid: Analytical and experimental study," in *Proc. 13th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Barcelona, 2009, pp. 1-10. [↑255](#)
- [6] W. Abbas and M. A. Saqib, "Effect of Nonlinear Load Distributions on Total Harmonic Distortion in a Power System," in *Proc. International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Lahore, 2007, pp. 1-6. [↑255](#)
- [7] C. H. Chang, Y. H. Lin, Y. M. Chen and Y. R. Chang, "Simplified Reactive Power Control for Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 5, pp. 2286-2296, May 2014. [↑256](#)
- [8] M. Islam, N. Afrin and S. Mekhilef, "Efficient Single Phase Transformerless Inverter for Grid-Tied PVG System With Reactive Power Control," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 7, no. 3, pp. 1205-1215, July 2016. [↑256](#)
- [9] I. Bouloumpasis, P. Vovos, K. Georgakas, and N.A. Vovos, "Current harmonics compensation in microgrids exploiting the power electronics interfaces of renewable energy sources," *Energies*, vol. 8, no. 4, pp. 2295-2311, Aug. 2015. [↑256](#)
- [10] F.P. de Souza and I. Barbi, "Single-phase active power filters for distributed power factor correction," in *Proc. IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, Galway, 2000, pp. 500-505. [↑256](#)
- [11] O. Lopez-Santos, "Filtro activo paralelo para compensación de factor de potencia y distorsión armónica en aplicaciones industriales," Master thesis, Universidad Nacional de Colombia, 2010. [↑256](#)
- [12] F.R. Jimenez, J.M. Salamanca, & P.F. Cardenas, "Modeling and circuital analysis of a Single Phase Shunt Active Power Filter," In 2014 *IEEE 5th Colombian Workshop on Circuits and Systems (CWCAS)*, Barranquilla, 2014. [↑256](#)
- [13] Hua, C-C. Li, C-H. Lee, C-S. "Control Analysis of an active power filter using Lyapunov candidate," *IET Power Electron.*, vol. 2. no. 4, April 2009. [↑256](#)
- [14] O. Lopez-Santos, L. Martinez-Salamero, G. Garcia, & H. Valderrama-Blavi, "Sliding-mode control of a transformerless dual-stage grid-connected photovoltaic micro-inverter," In *Proc. 10th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp. 1-6, 2013. [↑256](#)
- [15] O. Lopez-Santos, G. Garcia, J.C. Avila-Martinez, D.F. Gonzalez-Morales, & C. Toro-Zuluaga. "A simple digital sinusoidal reference generator for grid-synchronized power electronics applications," In *Proc. IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, pp. 1-6, 2015. [↑257](#), [259](#)
- [16] O. Lopez-Santos, "Contribution to the DC-AC conversion in photovoltaic systems: Module oriented converters," Doctoral dissertation, INSA de Toulouse, pp. 1-248, 2015. [↑257](#)

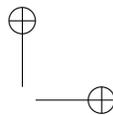


- [17] A. Cid-Pastor, L. Martinez-Salamero, A. El Aroudi, R. Giral, J. Calvente, R. Leyva, "Synthesis of loss-free-resistors based on sliding-mode control and its applications in power processing," *Control Engineering Practice*, vol. 21 no. 5 pp. 689-699. May. 2013. ↑[257](#)
- [18] O. Lopez-Santos, G. Garcia and L. Martinez-Salamero, "Derivation of a global model of a two-stage photovoltaic microinverter using sliding-mode control," in *Proc. IEEE 13th Brazilian Power Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC)*, Fortaleza, 2015, pp. 1-6. ↑[257](#)
- [19] M.T. Haque, "Single-phase PQ theory," in *Proc. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC)*, Cairns, 2002, pp. 1815-1820. ↑[258](#)
- [20] M.T. Haque and T. Ise, "Implementation of single-phase pq theory," in *Proc. of the Power Conversion Conference (PCC)*, Osaka, 2002, pp. 761-765. ↑[258](#)
- [21] M.T. Haque, "Single-phase pq theory for active filters," in *Proc. IEEE Region 10 Conference on Computers, Communications, Control and Power Engineering (TENCON)*, 2002, pp. 1941-1944. ↑[258](#)
- [22] V. Khadkikar, A. Chandra and B. N. Singh, "Generalised single-phase p-q theory for active power filtering: simulation and DSP-based experimental investigation". *IET Power Electron.*, vol. 2, no. 1, pp. 67-78, January 2009. ↑[259](#)
- [23] S. Golestan, M. Ramezani, J. M. Guerrero, F. D. Freijedo and M. Monfared, "Moving Average Filter Based Phase-Locked Loops: Performance Analysis and Design Guidelines," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 6, pp. 2750-2763, June 2014. ↑[259](#)
- [24] S.W: Smith, *The scientist and engineer's guide to digital signal processing*. 2d. Edition. San Diego: California Technical Publishing. 1999. ↑[259](#)
- [25] O. Lopez-Santos, G. Garcia, L. Martinez-Salamero, & L. Cortes-Torres, "Suppressing the effect of the DC-link voltage ripple on the current control of a sliding-mode controlled microinverter," in *Proc. Chilean Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)*, pp. 447-452, 2015. ↑[259](#)
- [26] H. Jiabing, Z.Q. Zhu, H. Nian, L. Shang, Y. He, "Sliding mode current control of grid-connected voltage source converter," in *Proc. of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp. 912-919, Sep. 2010. ↑[260](#)
- [27] I.-S. Kim, "Sliding mode controller for the single-phase grid-connected photovoltaic system," *Applied Energy*, vol. 83, Oct. 2006, pp. 1101-1115 ↑[260](#)
- [28] J. Matas, L. García, J. Miret, J. Guerrero, and M. Castilla, "Feedback Linearization of a Single-Phase Active Power Filter via Sliding Mode Control," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.23, no.1. Jan. 2008. ↑[260](#)
- [29] V. Utkin, J. Guldner and J. Shi, *Sliding mode control in electromechanical systems*, CRC Press, 2th. Edition, Taylor and Francis Group, 2009. ↑[261](#)
- [30] D. G. Montoya, C. A. Ramos-Paja and R. Giral, "Improved Design of Sliding-Mode Controllers Based on the Requirements of MPPT Techniques," in *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 31, no. 1, pp. 235-247, Jan. 2016. ↑[261](#)
- [31] O. Lopez-Santos, G. Garcia, L. Martinez-Salamero, J.C. Avila-Martinez, & L. Seguier, "Non-linear control of the output stage of a solar microinverter," *International Journal of Control*, pp. 1-20, 2015. ↑[261](#)
- [32] H. Panagopoulos, K.J. Astrom and T. Haggglund, "Design of PID controllers based on constrained optimization," *IEE Proc. on Control Theory Appl.*, vol. 149, no. 1, pp. 32-40, 2002. ↑[262](#)
- [33] O. Lopez-Santos, L. Martinez-Salamero, G. Garcia, H. Valderrama-Blavi and T. Sierra-Polanco, "Robust Sliding-Mode Control Design for a Voltage Regulated Quadratic Boost Converter," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 2313-2327, Apr. 2015. ↑[262](#)
- [34] IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std 519-2014, 2014. ↑[263](#)
- [35] IEEE Recommended Practice for Utility Interface of Photovoltaic (PV) Systems, IEEE Std 929-2000, 2000. ↑[263](#)

Oswaldo López Santos

Ingeniero Electrónico, Magister en Automatización Industrial, Doctor en automática. Docente de planta, Universidad de Ibagué.

e-mail: oswaldo.lopez@unibague.edu.co.



Operation of a Photovoltaic Microinverter as Active Power Filter using the single phase P-Q Theory and Sliding Mode C.

Sebastián Tilaguy Lezama

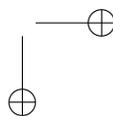
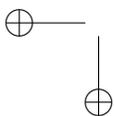
Ingeniero Electrónico, Asistente de investigación Grupo de Investigación Desarrollo Tecnológico D+TEC, Universidad de Ibagué.
e-mail: 2420111017@estudiantesunibague.edu.co

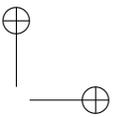
Sandra Patricia Rico Ramírez

Ingeniera Electrónica, Asistente de investigación Grupo de Investigación Desarrollo Tecnológico D+TEC. Ingeniera Comercial de Love Tech.
e-mail: 2420071007@estudiantesunibague.edu.co

Luis Darío Cortes Torres

Ingeniero Electrónico, Asistente de investigación Grupo de Investigación Desarrollo Tecnológico D+TEC, Universidad de Ibagué.
e-mail: 2420111040@estudiantesunibague.edu.co





Assessment of the Input Substrate Characteristics Included in the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)

Evaluación de las Características del Sustrato de Entrada Incluidas en el Modelo De Digestión Anaerobia No. 1 (ADM1)

Laura Andrea Morales¹, Ángel David Rodríguez¹, Herbert Enrique Rojas¹

¹Electromagnetic Compatibility and Interference Research Group (GCEM-UD).
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá DC, Colombia
Correspondence: laamoralesg@correo.udistrital.edu.co, androdriguezv@correo.udistrital.edu.co, herojasc@udistrital.edu.co

Recibido: 27/12/2016. Modificado: 08/03/2017. Aceptado: 05/04/2017.

Abstract

Context: Anaerobic Digestion (AD) is a well-established process and widely used for wastewater treatment and power generation worldwide. In engineering, the Anaerobic Digestion Model number 1 (ADM1) is the preferred tool for predicting the behavior of AD. However, this model requires a detailed characterization of the input substrate, which is often a difficult and expensive process. This paper presents an analysis of the input waste variables in the ADM1 and its effects on the biogas production, in order to identify on which variables the characterization should be centered.

Method: A sensitivity analysis was performed using a simple methodology that consisted of establishing a reference case and change the value of each input concentrations one at a time leaving the other parameters equal. For this a specific range of variation was defined using the values of parameter extracted from several references. Simulations were done in MATLAB/Simulink® using a routine developed by the authors based on the ADM1 implementation proposed in the Lund University, Sweden.

Results: The analysis reveals that most critical variables involved in the methane production are temperature, volumetric flow rate of substrates and the concentrations of proteins, lipids and carbohydrates. For the case analyzed, variations in concentrations of lipids and carbohydrates increase the production of methane by more than 500 %.

Conclusions: In the concentrations of proteins, lipids and carbohydrates should focus the characterization of waste input when the ADM1 is implemented. Also, simulations shows that the input concentrations should be carefully estimated because oversizing of these can cause erroneous results.

Keywords: ADM1; anaerobic digestion; biogas production; sensitivity analysis.

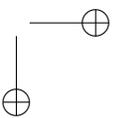
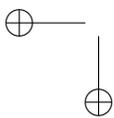
Acknowledgements: The authors express their gratitude to Dr. Ulf Jeppsson and Dr. Christian Rosen from the Lund University, Sweden, for their advice during the MATLAB® implementation of the ADM1 model. In addition, Prof. H.E. Rojas thanks to the Universidad Distrital for its support through the doctoral commission with contract code N° 000002-2016.

Language: English



Citation: L.A. Morales, A. D. Rodríguez, H. E. Rojas, "Assessment of the Input Substrate Characteristics Included in the Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)" INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 269-282, 2017.

©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.2.a07>



Resumen

Contexto: La digestión anaeróbica (DA) es un proceso bien establecido y ampliamente utilizado para el tratamiento de aguas residuales y generación de energía en todo el mundo. En ingeniería, el modelo de digestión anaeróbica número 1 (ADM1) es la herramienta preferida para predecir el comportamiento de la DA. Sin embargo, este modelo requiere una caracterización detallada del sustrato de entrada, que a menudo es un proceso difícil y costoso. En este trabajo se presenta un análisis de las variables que caracterizan el residuo de entrada en el ADM1 y sus efectos en la producción de biogás, con el fin de identificar cuáles son las variables en las que la caracterización debería centrarse.

Método: Se realizó un análisis de sensibilidad utilizando una metodología simple que consistió en establecer un caso de referencia y cambiar el valor de cada una de las concentraciones de entrada una a la vez dejando los otros parámetros iguales. Para ello se definió un rango específico de variación utilizando los valores de parámetros extraídos de varias referencias. Las simulaciones se realizaron en MATLAB / Simulink® mediante una rutina desarrollada por los autores y basada en la implementación de ADM1 propuesta en la Universidad de Lund, Suecia.

Resultados: El análisis revela que la mayoría de las variables críticas implicadas en la producción de metano son la temperatura, el caudal volumétrico del sustrato y las concentraciones de proteínas, lípidos y carbohidratos. Para el caso analizado, las variaciones en las concentraciones de lípidos y carbohidratos pueden llegar a aumentar la producción de metano en más de un 500 %.

Conclusiones: En las concentraciones de proteínas, lípidos y carbohidratos debe centrarse la caracterización de los residuos de entrada a un sistema de DA cuando se implementa el ADM1. Además, las simulaciones muestran que las concentraciones del sustrato deben ser cuidadosamente estimadas, ya que el sobredimensionamiento de estas puede causar resultados erróneos.

Palabras clave: ADM1; análisis de sensibilidad; digestión anaeróbica; producción de biogás.

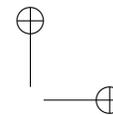
Agradecimientos: Los autores expresan su gratitud al Dr. Ulf Jeppsson y al Dr. Christian Rosen de la Universidad de Lund, Suecia, por su asesoría durante la implementación del modelo ADM1 en MATLAB®. Adicionalmente, el Prof. H.E. Rojas agradece a la Universidad Distrital por su apoyo a través de la comisión de estudios doctorales con código de contrato N° 000002-2016.

Idioma: Inglés

1. Introduction

Anaerobic digestion (AD) is a complex biological process that comprises a network of sequential and parallel reactions of biochemical and physicochemical nature. These reactions are made by several microbial groups in an anaerobic environment [1], [2]. The process begins with a decomposition of organic matter in the absence of oxygen producing biofertilizer and biogas. The first resultant product is a substrate rich in nitrogen, phosphorus, potassium, and calcium; while the second product is a biofuel composed mainly of methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂), able to override fossil fuels [3].

Other benefits offered by AD include a reduction in the chemical oxygen demand (COD), the control of pathogens and the odor reduction in wastewater [4]. However, microorganisms that develop the AD process are highly sensitive so any variation in the reactor conditions or changes in the residue that feed them could inhibit or damage the biological process [2], [5]. For these reasons, it is necessary to have a reliable characterization of each waste that enters to the reactor and control many of the variables involved in the process, such as: temperature, pH, carbon/nitrogen ratio (C/N), organic loading rate and hydraulic and solid retention times [5], [6].



Several control methods have been developed to optimize the behavior of the AD process increasing the biogas production. These improvements have turned the biofuel into a more competitive source of renewable energy [7], [8]. Nevertheless, in order to develop adequate control strategies it is necessary to use mathematical models to predict the behavior of the AD process in a reliable way [5]. In the last four decades, several models of the AD process have been proposed. Some of them have a limited number of equations including kinetic rates and work for specific applications [9], [10]. Currently, complex models include more species of microorganisms and present the characterization of different substrates [11]–[13].

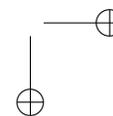
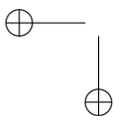
One of these complex models is the Anaerobic Digestion Model Number 1 (ADM1), which is the most studied in the literature [14], [15]. The ADM1 is a robust model that provides good results when the characterization of the waste input is correctly realized. However, the model has many input variables and the available information is scarce. For this reason, in several cases the application of the ADM1 is reduced to use the input variables and the parameters presented in the model report [3]. This condition makes difficult the diffusion of the model in research areas different to biochemistry or microbiology among others.

Some methodologies to facilitate the application of the ADM1 and to reduce its inputs number have been developed [15]–[17]. These papers focus on facilitating the characterization of the input residue, however, do not evaluate how a variation in these input variables affects methane production. For this reason, this paper presents a sensitivity analysis of the ADM1 in order to identify the variables that most affect the AD process and the most important variables involved in the input waste characterization. In addition, a brief description of the model structure, its advantages and its applications are presented. For the sensitivity analysis, 911 simulations were made using a Matlab/Simulink® routine and a user interface developed by authors. The implementation of the ADM1 is based on the work of Rosen & Jeppsson with wastewater treatment plants, where computational and methodological considerations for proper implementation of the ADM1 are presented [18].

The rest of the paper continues as follows: the ADM1 model structure and some aspects to take into account during its implementation are described in section 2. In section 3, the methodology used for the sensitivity analysis and the results provided for the sensitivity analysis of the ADM1 model are presented. A discussion about the critical variables involved in the input waste characterization for AD process is shown in Section 4. Finally, some conclusions are presented in section 5.

2. Anaerobic Digestion Model N° 1 (ADM1)

The ADM1 was developed by a group of experts in the AD process, sponsored by the International Water Association (IWA) [5]. The ADM1 is divided into a liquid phase and a gas phase. The first stage gathers the input residue concentrations and the substrate concentrations inside the reactor, also called digester. The second phase gathers the gases produced by the AD of biomass. In these phases occur several conversion processes, called biochemical and physicochemical reactions. These biochemical reactions and its conversion processes (listed 1 to 7) are showed in Figure 1 [3].



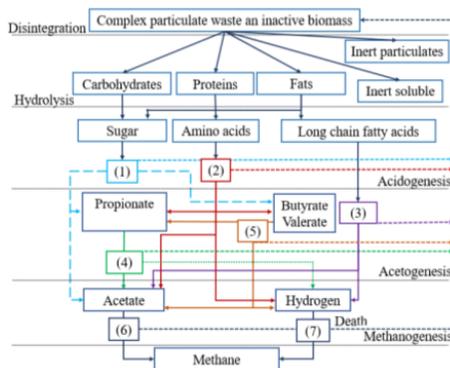


Figure 1. Biochemical reactions in the ADM1: (1) acidogenesis from sugars, (2) acidogenesis from amino acids, (3) acidogenesis from LCFA, (4) acetogenesis from propionate, (5) acetogenesis from butyrate and valerate, (6) aceticlastic methanogenesis, and (7) hydrogenotrophic methanogenesis. (Source: [1]–[10])

In the biochemical reaction, there are three biological steps: acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis. As well as an extracellular disintegration and one-step of extracellular hydrolysis. On the other hand, the physicochemical reactions are divided into liquid–liquid reactions (association and dissociation of ions) and gas–liquid exchanges. These reactions are used to describe the acid–base equilibria and the biological inhibition factors due to variations of the pH and the concentration of dissolved gases [1], [18].

Using the ADM1 it is possible to describe, in general terms, the AD process and provides a common basis for validating and comparing results obtained experimentally. In addition, the model allows developing control strategies and optimize the AD process. The model has 29 state variables with a dynamic behavior. These variables are divided into 26 for the liquid phase and three (3) for the gas phase which are the concentrations of CH_4 , CO_2 and hydrogen (H_2) [18]. Table I shows the input substrate characteristics which are divided in its soluble concentrations (S), particulate concentrations (X) and the operational parameters (volumetric flow and the operation temperature) that constitute the input vector of ADM1. These variables are grouped in a Peterson matrix, where they interact with 19 biochemical processes by means of kinetic rates, stoichiometric and physical parameters that are included in the complete model [1].

Inside the model, each state variable has a mass balance represented by the differential equation shown in (1), where m_x is the specific mass of the chemical or biological species (x), the input and output rates of the mass flow are defined by $\dot{m}_{x,in}$ and $\dot{m}_{x,out}$, respectively, and \dot{r} is the net mass generation rate for each specie [19]. When the reactor volume ($V_{reactor}$) do not change over time, and there is a homogeneous mixture of the substrate (within the digester), it can be assumed that the effluent concentration is equal to the substrate concentration inside the system S_x , so the mass balance can be described by (2).

$$\frac{dm_x}{dt} = \dot{m}_{x,in} - \dot{m}_{x,out} + \dot{r} \quad (1)$$

$$\frac{dS_x}{dt} = \frac{q_{in}S_{x,in}}{V_{reactor}} - \frac{q_{out}S_x}{V_{reactor}} + \dot{\rho}_x \quad (2)$$

Tabla I. Substrate characteristics - Input vector of the ADM1

i	Variable	Description	Value base case	Range of variation	No of variation
1	S_{su}	Sugars	0,01	0,001-10	28
2	S_{aa}	Amino acids	0,001	0,001-10	28
3	S_{fa}	Long chain fatty acids (LCFA)	0,001	0,001-10	28
4	S_{va}	Valerate total	0,001	0,001-10	28
5	S_{bu}	Butyrate total	0,001	0,001-10	28
6	S_{pro}	Propionate total	0,001	0,001-10	28
7	S_{ac}	Acetate total	0,001	0,001-10	28
8	S_{h2}	Dissolved Hydrogen gas	$1e^{-8}$	$1e^{-8}$ -0,01	7
9	S_{ch4}	Dissolved Methane gas	$1e^{-5}$	$1e^{-8}$ -0,01	7
10	S_{IC}	Carbon inorganic	0,04	0,001-0,3	22
11	S_{IN}	Nitrogen Inorganic	0,01	0,001-0,3	32
12	S_I	Soluble inerts	0,02	0,001-10	46
13	X_{xc}	Complex Composites	2	0,01-70	23
14	X_{ch}	Carbohydrates	5	0,1-200	32
15	X_{pr}	Proteins	20	0,1-200	38
16	X_{li}	Lipids	5	0,1-200	36
17	X_{su}	Sugar degraders	0	0,1-1	15
18	X_{aa}	Amino acids degraders	0,01	0,1-1	15
19	X_{fa}	LCFA Degraders	0,01	0,1-1	15
20	X_{ca}	Valerate and Butyrate Degraders	0,01	0,1-1	15
21	X_{pro}	Propionate degraders	0,01	0,1-1	15
22	X_{ac}	Acetate degraders	0,01	0,1-1	15
23	X_{h2}	Hydrogen degraders	0,01	0,1-1	15
24	X_I	Particulate Iner	25	0,01-250	35
25	S_{cat}	Cations (strong bases)	0,04	0-0,16	23
26	S_{an}	Anions (strong acids)	0,02	0-0,16	20
27	Q_{in}	Volumetric flow rate	170	0-1000	229*
28	T_{op}	Operating Temperature	35	10-80	42

Note: *It corresponds to the total variation of Q_{in} in six different magnitudes of reactor liquid volume. Also, the units for flow are in m^3/day and the temperature in $^{\circ}C$ and the concentrations are expressed in $Kg\ COD/m^3$, except S_{IC} , S_{IN} , S_{cat} and S_{an} that are expressed in $Kmole/m^3$.

In this mathematical expression, $S_{x,i}$ is the affluent concentration, $\dot{\rho}_x$ is volumetric mass generation rate and q_{in} and q_{out} are the input and output flows, respectively. Additionally, the expression presented in (2) can become in an algebraic equation under the steady-state condition described in (3). This is possible because the derivative of the concentration (dS_x/dt) becomes to zero. However, if the reactor is closed (batch upload) and the initial concentration inside de has reached steady-state, the mass balance can be described by (4) [19].

$$0 = \frac{q_{in}S_{x,in}}{V_{reactor}} - \frac{q_{out}S_x}{V_{reactor}} + \dot{\rho}_x \quad (3)$$

$$\frac{dS_x}{dt} = \dot{\rho}_x \quad (4)$$

On the other hand, organic matter usually have different degradation rates, so the ADM1 uses the chemical oxygen demand (COD) as a common basis to characterize different biomass concen-

trations. In this context, COD can be divided to represent different rates of biodegradation as it is shown in Figure 2. In addition, COD relates the organic substrate, the active biomass and oxygen used, keeping the mass balances [5], [20]. It is important to note that during the implementation of the model developed by Rosen & Jeppsson in [18], inputs are divided into three groups: the characteristics of the waste input, substrate concentrations at steady-state within the digester and a set of biochemical, physicochemical, stoichiometric and physical parameters of the system.

3. Sensitivity analysis

Sensitivity analysis is a systematic study of how variations of the incoming data affect the outputs of a model. In dynamic and complex models, such as the ADM1, this type of analysis are important because allows checking the internal logic of the model and understand its operation. It also identify values for which the model has discontinuities or limits and define the relevance of each parameter in order to determine the attention to be given during their measurement and control.

3.1. Methodology

Due to the complexity of the ADM1 and the number of input variables, the sensitivity analysis was performed modifying the value of each input concentrations shown in Table I one at a time leaving the other parameters equal. For this paper, the work presented in [18] was defined as a base case where a continuous stirred tank reactor (CSTR) in steady state was simulated for a wastewater treatment plant. The changes of the input concentrations depending on the residue used (i.e., agrowastes, wastewater). For this reason, a specific range of variation was defined using the values of parameter extracted from several references [6], [17], [18], [21]–[25]. Although this review allowed identifying the maximum and minimum possible values for many of the variables, some input concentrations like S_{ch4} and S_{h2} were not documented, so it was decided to vary them in a wide range for academic purposes.

The analysis was focused on the methane production (in mass units) because it is one of the most common indexes used for estimating the efficiency of the AD process. The methane production can be calculated using the following expression [21]:

$$CH_4 \left[\frac{KgCH_4}{day} \right] = \frac{1_{molCH_4}}{0,064_{kgCOD}} * \frac{0,016kg}{1_{molCH_4}} * \left[q_{gas,t} * \frac{P_{atm}}{P_{gas,t}} \right] * S_{gas,CH_4} \quad (5)$$

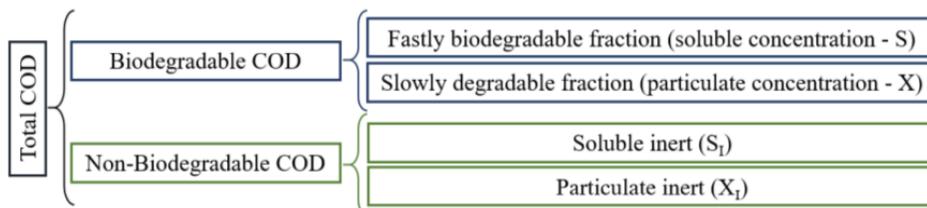


Figure 2. Division of the chemical oxygen demand (COD) (Source: adapted from [17]).

Where, $q_{gas,t}$ is the amount of total gas expressed in $[Nm^3/day]$, S_{CH_4} is the concentration of methane in $[kgCOD/m^3]$, P_{atm} is the atmospheric pressure in [bars] and $P_{gas,t}$ is the sum of the partial pressures (in bars) of the gases included in the biogas model (outputs variables of the ADM1). It is important to note that the factor $P_{atm}/P_{total,gast}$ is used in (5) to remove the normalized value of $q_{gas,t}$. Finally, in order to obtain an idea about the energetic potential of the biogas it was established that 1 $[kgCH_4]$ equals to 50 [MJ] [21].

3.2. Results

In this section, the results obtained from the sensitivity analysis of the variables listed in Table I are presented. It is important to note that some parameters were changed between extreme values in order to find critical conditions in the model. This process provides a better understanding about the impact that each variable has on the AD process and determine the ranges in which the ADM1 could provide unreliable results. In addition, for a better comparison of results the concentrations (parameters) that have the same scale and possess the same units were grouped in the same plot.

Figure 3 illustrates the methane production with respect to the variation of the following soluble concentrations: sugars (S_{su}), amino acids (S_{aa}), long chain fatty acids (S_{fa}), valerate total (S_{va}), butyrate total (S_{bu}), propionate total (S_{pro}) and acetate total (S_{ac}). These variables were changed from 0,001 to 10 $[Kg COD/m^3]$. Results presented in Figure 3 show a linear growth in all concentrations except for amino acids. With respect to soluble concentration, the variable that produces the greatest variation on the methane production is the acetic acid (S_{ac}), which causes an increase up to 35%. This increase is not very significant considering that the input concentration was changed about

10000 times with respect to the value of the base case.

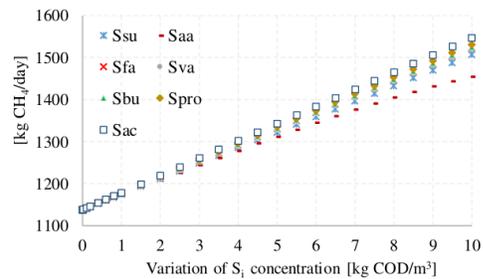


Figure 3. Methane production with respect to soluble concentrations.

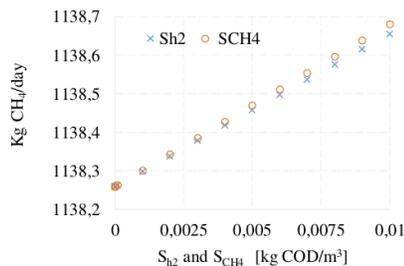


Figure 4. Methane production with respect to S_{ch4} and S_{h2} concentrations.

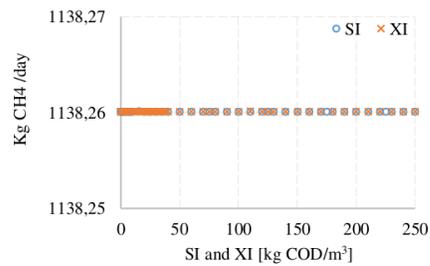


Figure 5. Methane production with respect to S_i and X_i concentrations.

On the other hand, from the sensitivity analysis it is observed that some variables produce small changes ($<0,1\%$) on the CH_4 production. This is the case of dissolved methane concentration

(S_{ch4}) and hydrogen concentration (S_{h2}), whose behavior is shown in Figure 4. These concentrations do not affect the decomposition of organic matter inside the reactor because before the AD process starts they are very small (ideally zero). In the base case, these variables are fixed with a value close to zero to avoid numerical problems [18]. Figure 5 shows the variation of inert soluble compounds (S_I) and inert particles (X_I). In this case, negligible variations (<0,001 %) on CH_4 production are observed when inert concentrations are changed. These minimum variations confirm that inputs S_{ch4} , S_{h2} , S_I and X_I do not involved in the process of CH_4 production.

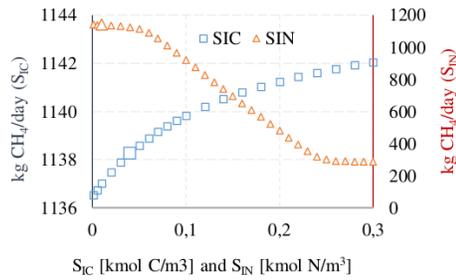


Figure 6. Methane production with respect to S_{IC} (left axis) and S_{IN} (right axis).

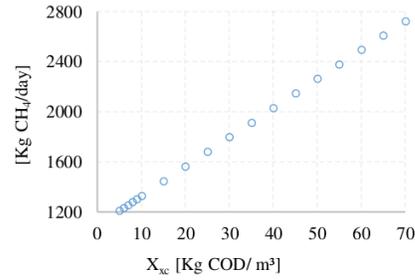


Figure 7. Methane production with respect to X_{XC} .

Figure 6 shows that inorganic carbon concentration (S_{IC}) and inorganic nitrogen concentration (S_{IN}) have an inverse behavior. In the first case, S_{IC} presents a slight increase in the CH_4 production of about 0,48 %, while the second concentration (S_{IN}) presents a reduction of 25 %, stabilizing when $S_{IN} = 0,22$ with a CH_4 production of 283 [kg CH_4 /day]. The concentration of complex compounds (X_{xc}) was plotted in Figure 7. Due to the range variation of X_{xc} is different from other input concentrations, this Figure 7 shows a linear behavior with a growth rate of 23,4 (obtained from a linear regression). The variation on the CH_4 production presents an increase of 140 % compared to the value of the base case.

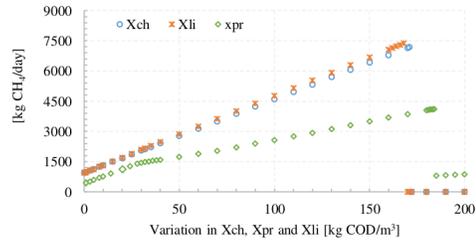


Figure 8. Methane production with respect to X_{ch} , X_{pr} and X_{li} .

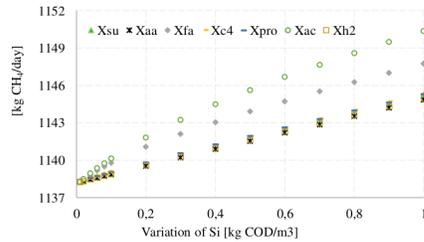


Figure 9. Methane production with respect to X_{su} , X_{aa} , X_{fa} , X_{c4} , X_{pro} , X_{ac} , X_{h2} .

Figure 8 presents the methane production due to changes in the concentration of three macromolecules: carbohydrates (X_{ch}), proteins (X_{pr}) and lipids (X_{li}). For all macromolecules, the methane production presents a pronounced linear growth, especially when carbohydrates and proteins increase. Later, CH_4 production is inhibited when proteins and carbohydrates reach a concentration of about 160 [kg COD/m^3] and lipids grow above 180 [kg COD/m^3]. In the case of carbohydrates, CH_4 production reaches a maximum value of 7190 [kg CH_4 /day] which equivalent to an increase

of 532 % with respect to the base value. For lipids, CH_4 reaches a maximum value of 7383 [kg CH_4 /day]. Meanwhile, proteins reach a maximum value of 4122 [kg CH_4 /day] (increase of 262 %) before the ADM1 present unreliable results.

Particulate concentrations associated with the consumption of sugars (X_{su}), amino acids (X_{aa}), fatty acids (X_{fa}) and acetic acid (X_{ac}) among others are presented in Figure 9. In this figure, X_{ac} is the most representative concentration since the maximum value achieved was 1150 [kg CH_4 /day] which is equivalent to a slight increase of 1 % in the methane production.

Methane production and pH value with respect to variations of cations and anions are shown in Figure 10 and Figure 11, respectively. These parameters are important in the ADM1 because they are used to obtain the load balance and the concentration of hydronium ion (H^+) used in the computation of the pH value. From simulations, the recommended range for the pH in the AD process is 6.5 to 7.5 (without being inhibited) [19]. In addition, it can be noted that the variation of S_{cat} reduces the methane production from 1141 to 990 [kg CH_4 /day] due to an increase in the pH value (outside of the recommended range). In the case of S_{an} , the methane production remains in an average value of 1140 [kg CH_4 /day] until the S_{an} reaches a value of 0,149 [Kmole/ m^3], in which the process is completely inhibited because the pH value starts to decrease.

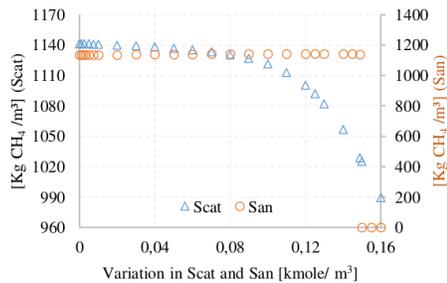


Figure 10. Methane production with respect to Scat and San.

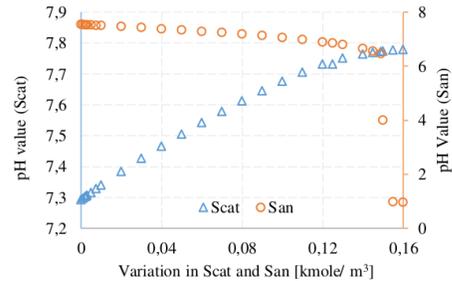


Figure 11. pH value with respect to Scat and San.

In general terms, when the AD process exceeds this threshold (pH value), it is so late to take a corrective action. However, if the pH variation is detected early the process can be controlled with the addition of chemicals such as: sodium carbonate, sodium bicarbonate, gaseous ammonia, ammonium hydroxide and sodium hydroxide [26]. In the case of the variation of the volumetric flow rate of substrates (Q_{in}), it should be noted that in biogas plants this is a parameter easily adjustable because it has direct control over the amount of substrate input. However, the variation of Q_{in} should be done considering the dilution rate (D), which is presented in (6). This parameter relates Q_{in} with the liquid volume of the reactor (V_{liq}).

$$D = \frac{Q_{in}}{V_{liq}} [\text{day}^{-1}] \quad (6)$$

As an operating condition, D must be less than the growth rate of the species that grows slower. This is necessary to guarantee that microbial population has enough time to multiply inside the

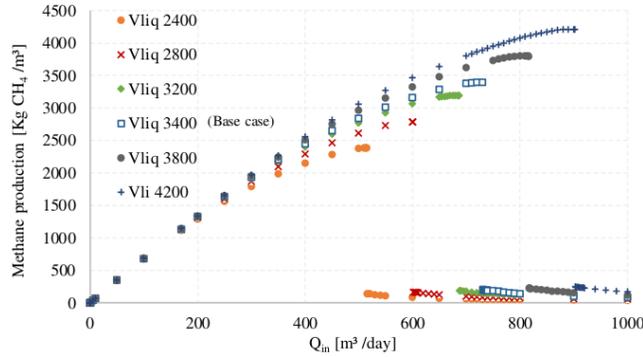


Figure 12. Methane production with respect to Q_{in} and V_{liq} .

reactor (digester). If this condition is not accomplished, the AD process will be inhibited by lack of microorganisms [7]. The variation of Q_{in} for different volumes of the reactor is shown in Figure 12, where the composition of the input residue and the other parameters of the base case were kept constant. From these results, it is possible to determine the maximum dilution rate that can be allowed before the system is inhibited. Using the Matlab® routine developed by authors, the maximum calculated dilution rate was $D=0,21$ [day^{-1}] and the maximum Q_{in} reaches 730 [m^3/day], generating a maximum output of 3394 [$\text{kg CH}_4/\text{day}$].

It is important to note that the temperature affects directly the speed of the biochemical reactions and the growth rate of the microorganisms [19]. Therefore, for a correct implementation of the ADM1 is necessary to adjust the input parameters according to the operating temperature. However, there are few data in the literature that allow to relate the kinetic rates of biochemical processes with changes in temperature. For this reason, in this work it was decided not to vary these parameters, leaving them equal to the base case in all simulations.

On the other hand, Figure 13 presents the complete gas production (CH_4 , CO_2 and H_2), including

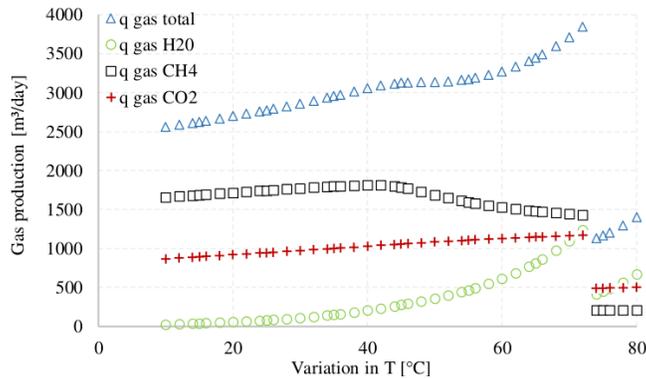


Figure 13. Methane production with respect to temperature.

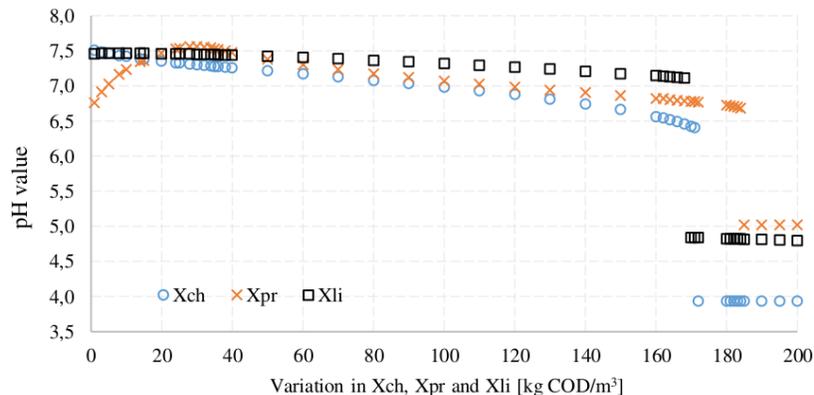


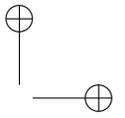
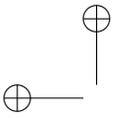
Figure 14. pH value with respect to X_{ch} , X_{pr} and X_{li} .

water vapor (H_2O), obtained when temperature changes from 10 °C to 80 °C. In this case, to estimate how the ADM1 behaves at different temperatures, the input variables remain fixed using the base case values [18]. Figure 13 shows that the highest methane production in volumetric units [m^3 /day] is produced when the temperature is 40 °C. In addition, the total production of biogas (q_{gas_total}) increases as the temperature increases. However, the quality of the biogas, in terms of methane content, decreases while the water vapor and the amount of carbon dioxide and dihydrogen increase [27]. When the temperature reaches 72 °C the conditions within reactor become very aggressive for microbial populations and gas production drops abruptly.

4. Discussion

From the sensitivity analysis, the variables that proved to have a greater impact on methane production are the concentrations of proteins (X_{pr}), lipids (X_{li}) and carbohydrates (X_{ch}) which depend partially from the input waste characteristics. However, simulations of the ADM1 show that care must be taken with the entry of the input variables due to very high values can overload the reactor. In addition, as is shown in the Figure 14 it is necessary to maintain the accumulation of acids under control because these concentrations may decrease the pH (under 6,5) and inhibit the AD process due to the interruption of the methanogens [19], [26]. For this reason, the pH must be continually monitored because it has a remarkable impact on the stability of the AD process by regulating the coexistence of microbial populations. It is important to note, that when the concentration of proteins and amino acids is very high, a toxic compound as ammonium may appear [5].

Another variable that demonstrated a representative impact on methane production was the temperature, which is considered by many authors as the most important variable to control the AD process. The temperature must be maintained at a constant value (fluctuations below 2 °C/day) to avoid the death of microorganisms [27]. On the other hand, although the increase of the temperature reduces the retention time and provides better degradative behavior [28], this implies a more robust control, an increase in the energy consumption, an increase in the concentrations of orga-



nic acids (which decrease the pH) and makes the process more vulnerable to inhibitors such as ammonia [27]. These factors collectively may decrease the efficiency of the AD process.

5. Conclusions

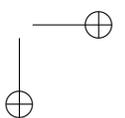
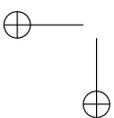
In this paper a sensitivity analysis of the anaerobic digestion model ADM1 including its 26 variables of the liquid phase and three variables of the gas phase (CH_4 , CO_2 and H_2) was presented. Input waste variables were varied individually using a Matlab® Simulink routine implemented by authors. Simulations show that most critical variables involved in the methane production are temperature (T), volumetric flow rate of substrates (Q_{in}) and the concentrations of proteins (X_{pr}), lipids (X_{li}) and carbohydrates (X_{ch}). For the analyzed cases, X_{li} and X_{ch} increase the production of methane by more than 500 %, so in these variables should focus the characterization of waste input when the ADM1 is implemented.

The ADM1 facilitates the design of new biogas plants and allows validating hypothesis and optimizing designs. An example of the model versatility was showed in the Figure 12, where the maximum Q_{in} to obtain the greatest amount of methane for the base case was calculated. Finally, inhibition due to reduction of pH and high ammonia concentration present as variables in the ADM1 establish operating limits for the process. These parameters are used to develop control strategies that maximize the biogas production. Furthermore, simulations show that the input concentrations should be carefully estimated because oversizing of these can cause erroneous results.

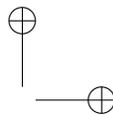
Finally, it is important to mention that some limitations during the development of this work were the lack of real data and the use of a steady state system for all simulations. In addition, to present the sensitivity analysis of ADM1 it was decided change the value of the input concentrations one at a time maintaining the other parameters equal to the base case. However, in the case of modifying several parameters at a time, the results are unknown. Future studies will be focused in analyze this topic.

References

- [1] D. Batstone, J. Keller, I. Angelidaki, S. Kalyuzhnyi, S. Pavlostathis, A. Rozzi, W. Sanders, H. Siegrist, and V. Vavilin, "The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1).," *Water Sci. Technol.*, vol. 45, no. 10, pp. 65-73, Jan. 2002. ↑[270](#), [272](#)
- [2] I. Ramírez, "Computation and implementation issues for biodiversity simulations with extended anaerobic digestion model no 1 (ADM1_N) in Matlab / Simulink," *Rev. Invest. Univ. Quindío.*, vol. 24, no. 2, pp. 269-279, 2013. ↑[270](#), [272](#)
- [3] IWA Task Group for Mathematical Modelling of Anaerobic Digestion Processes, Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) *Scientific and technical report*, Ilustrada. IWA Publishing, 2002. ↑[270](#), [271](#), [272](#)
- [4] T. Matsumoto and I. Sánchez Ortiz, "Desempeño de la planta de tratamiento de aguas residuales de Sao Joao de Iracema (Brasil)," no. 176, pp. 176-186, 2016. ↑[270](#), [272](#)
- [5] U. Zaher, *Modelling And Monitoring The Anaerobic Digestion Process In View Of Optimisation And Smooth Operation Of WWTP's*. 2005. ↑[270](#), [271](#), [272](#), [274](#), [279](#)
- [6] D. I. Page, K. L. Hickey, R. Narula, A. L. Main, and S. J. Grimberg, "Modeling anaerobic digestion of dairy manure using the IWA Anaerobic Digestion Model no. 1 (ADM1)," *Water Sci. Technol.*, vol. 58, no. 3, pp. 689-695, 2008. ↑[270](#), [272](#), [274](#)



- [7] D. Gaida, "Dynamic real-time substrate feed optimization of anaerobic co-digestion plants," Leiden University, 2014. ↑ [271](#), [272](#), [278](#)
- [8] L. Xue, D. Li, and Y. Xi, "Nonlinear Model Predictive Control of anaerobic digestion process based on reduced ADM1," in *Control Conference (ASCC), 2015 10th Asian*, 2015, pp. 1-6 ↑ [271](#), [272](#)
- [9] E. Cendales and S. Jiménez, "Modelamiento computacional de la producción de energía renovable a partir del biogás mediante la codigestión anaeróbica de la mezcla de residuos cítricos y estiércol bovino," *Rev. EAN*, no. 77, pp. 42-63, 2014. ↑ [271](#), [272](#)
- [10] G. Lyberatos and I. V Skiadas, "Modelling of anaerobic digestion - a review," *Glob. NEST J.*, vol. 1, no. 2, pp. 63-76, 1999. ↑ [271](#), [272](#)
- [11] L. Yu, P. C. Wensel, J. Ma, and S. Chen, "Mathematical Modeling in Anaerobic Digestion (AD)," *J. Bioremediation Biodegrad.*, vol. s4, no. 3, p. 12, 2013. ↑ [271](#)
- [12] A. Donoso-Bravo, J. Mailier, C. Martin, J. Rodríguez, C. Aceves-Lara, and A. Vande Wouwer, "Model selection, identification and validation in anaerobic digestion: a review," *Water Res.*, vol. 45, no. 17, pp. 5347-64, Nov. 2011. ↑ [271](#)
- [13] E. Ficara, S. Hassam, A. Allegrini, A. Leva, F. Malpei, and G. Ferretti, "Anaerobic Digestion Models : a Comparative Study," *Math. Model.*, vol. 7, no. 1, pp. 1052-1057, 2012. ↑ [271](#)
- [14] F. Blumensaat and J. Keller, "Modelling of two-stage anaerobic digestion using the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1)," *Water Res.*, vol. 39, no. 1, pp. 171-183, 2005. ↑ [271](#)
- [15] C. García-Diéguez, O. Bernard, and E. Roca, "Reducing the Anaerobic Digestion Model No. 1 for its application to an industrial wastewater treatment plant treating winery effluent wastewater," *Bioresour. Technol.*, vol. 132, no. 1, pp. 244-53, Mar. 2013. ↑ [271](#)
- [16] U. Zaher and S. Chen, "Interfacing the IWA Anaerobic Digestion Model No. 1 (ADM1) With Manure and Solid Waste Characteristics," in *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 3162-3175 ↑ [271](#)
- [17] R. Girault, G. Bridoux, F. Nauleau, C. Poullain, J. Buffet, J. P. Steyer, a. G. Sadowski, and F. Béline, "A waste characterisation procedure for ADM1 implementation based on degradation kinetics," *Water Res.*, vol. 46, no. 13, pp. 4099-4110, 2012. ↑ [271](#), [274](#)
- [18] C. Rosen and U. Jeppsson, "Aspects on ADM1 Implementation within the BSM2 Framework," *Tech. Rep.*, pp. 1-37, 2008. ↑ [271](#), [272](#), [274](#), [276](#), [279](#)
- [19] S. K. Khanal, *Anaerobic Biotechnology for Bioenergy Production: Principles and Applications*, 1st ed. Iowa, Estados Unidos: Wiley-Blackwell, 2009. ↑ [272](#), [273](#), [277](#), [278](#), [279](#)
- [20] C. Díaz Delgado, "Modelación matemática de plantas de tratamiento de lodos activados," in *Agua potable para comunidades rurales, reuso y tratamientos avanzados de aguas residuales domésticas.*, 1st ed., RIPDA-CYTED, Ed. 2003, pp. 240-255. ↑ [274](#)
- [21] U. Jeppsson, "Investigation of Anaerobic Digestion Alternatives for Henriksdal's WWTP," Lund, Sweden, 2007. ↑ [274](#), [275](#)
- [22] B. C. Lyseng, W. Bergland, F. Haugen, and R. Bakke, "Biogas reactor modelling with ADM1," Porsgrunn, Norway, 11/2012, 2012. ↑ [274](#)
- [23] A. Normak, J. Suurpere, K. Orupõld, E. Jõgi, and E. Kokin, "Simulation of anaerobic digestion of cattle manure," *Agron. Res.*, vol. 10, no. SPEC. ISS. 1, pp. 167-174, 2012. ↑ [274](#)
- [24] A. Mottet, I. Ramirez, H. Carrère, S. Déléris, F. Vedrenne, J. Jimenez, and J. Steyer, "New fractionation for a better bioaccessibility description of particulate organic matter in a modified ADM1 model," *Chem. Eng. J.*, vol. 228, pp. 871-881, Jul. 2013. ↑ [274](#)
- [25] U. Zaher, R. Li, U. Jeppsson, J.-P. Steyer, and S. Chen, "GISCOD: general integrated solid waste co-digestion model," *Water Res.*, vol. 43, no. 10, pp. 2717-27, Jun. 2009. ↑ [274](#)
- [26] B. Deepanraj, V. Sivasubramanian, and S. Jayaraj, "Biogas Generation through Anaerobic Digestion Process- An Overview," vol. 18, no. 5, pp. 80-93, 2014. ↑ [277](#), [279](#)
- [27] D. Batstone and P. Jensen, "Anaerobic processes," in *Treatise on Water Science*, P. Wilderer, Ed. Brisbane, Australia: Elsevier B.V., 2011, pp. 615-637. ↑ [279](#), [280](#)
- [28] T. Al Seadi, D. Rutz, H. Prassl, M. Kottner, T. Finsterwalder, S. Volk, and R. Janssen, *Biogas handbook*, Teodorita. Esbjerg, Denmark: by University of Southern Denmark Esbjerg, Niels Bohrs Vej 9-10, 2008. ↑ [279](#)



Laura Andrea Morales García

Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniera Eléctrica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Actualmente, participa como investigadora del Grupo de Investigación en Compatibilidad e Interferencia Electromagnética (GCEM-UD) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas donde realiza estudios sobre energías renovables y biomasa.

e-mail: laamoralesg@correo.udistrital.edu.co

Ángel David Rodríguez Vargas

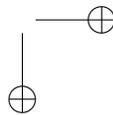
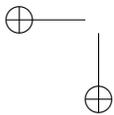
Nació en Bogotá, Colombia. Es Ingeniero Eléctrico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Actualmente, participa como investigador del Grupo de compatibilidad e interferencia electromagnética (GCEM-UD) de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas donde realiza estudios sobre energías renovables y biomasa.

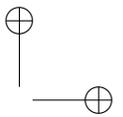
e-mail: androdriguezv@correo.udistrital.edu.co

Herbert Enrique Rojas Cubides

Nació en Bogotá DC, Colombia. Es Ingeniero Electricista de la Universidad Nacional de Colombia, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Eléctrica y actualmente es Candidato a Doctor en Ingeniería – Área de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia, de Bogotá, Colombia. Actualmente, es Profesor Asociado de Tiempo Completo en el Proyecto Curricular de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C., Colombia y pertenece como investigador al Grupo de Investigación en Compatibilidad e Interferencia Electromagnética (GCEM-UD) donde realiza estudios en Procesamiento de Señales, Descargas Eléctricas Atmosféricas, Alta Tensión, Aislamiento Eléctrico, Compatibilidad Electromagnética, Energías Renovables y Calidad de Potencia.

e-mail: herojasc@udistrital.edu.co





Case study

Orientation Assistance for Visually Impaired Passengers within a Bus Rapid Transit System (Transmilenio), Using Satellite Geolocation

Orientación de pasajeros con discapacidad visual dentro del sistema de transporte masivo Transmilenio, mediante geolocalización satelital

Julián Camargo¹, Luis González², Diego Segura³, Fabián Garay⁴, Nubia Rincón⁵

¹⁻⁵Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá – Colombia.

²Businessmind Colombia – BMIND.

³Universidad de los Andes. Bogotá – Colombia

⁴Escuela Militar de Suboficiales Sargento Inocencio Chincá. Nilo – Colombia.

Correspondence: jrcamargol@udistrital.edu.co¹, luagonzalec², dasegurag³, fsgarayr⁴@correo.udistrital.edu.co, nubibiabioing@yahoo.es⁵

Recibido: 18/01/2017. Modificado 15/03/2017. Aceptado: 10/04/2017.

Abstract

Context: Although the mass-transport system Transmilenio provides audio information for travelers' guidance, this is not helpful enough to blind users who are not able to transit easily within the system. For these reason, portable guidance devices are needed to improve the level of autonomy of the visually impaired people while using the transport system.

Method: A review of aid devices to improve the level of autonomy of people with visual impairment was conducted so as to define the most practical technology for building an affordable device usable in the city of Bogotá. Subsequently, the functional modules of the device were defined, including file storage, sound reproduction, user interface and satellite geolocalization and location. Once built, the operation of the device was tested with 10 volunteers in condition of visual impairment who were oriented with the device between two main stations of one Transmilenio line; a final statistical study was conducted on the operation and usability perception of the device by the users.

Results: 100 % of the users were able to reach their destination successfully in the pilot test. In regards to the usability perception, users highlighted features such as sound indications for setting the device and orientation guidance throughout the journey. On the other hand, one of the main difficulties found was to correctly identify the bus approaching the stop and similarly locating the corresponding boarding door, as multiple bus routes may alight in the same door.

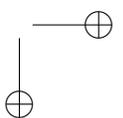
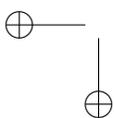
Conclusions: The device was built incorporating low-cost technologies intended to make it affordable in an eventual mass—scale production. Likewise, a discreet design was chosen so as to lessen the risk of robbery, which unfortunately is a frequent issue in the Transmilenio system due to overcrowding of buses and stations. Additionally, we remark that the prototype can be made smaller by using special—purpose circuit boards. Policy-makers may take into account these considerations for an eventual wide implementation as part of governments' plans for mobility inclusion in mass-transport systems for disabled people, in comparison with other alternatives such as smart cell phones.

Keywords: Mobility for blind, mass transport, portable Geolocation.

Language: Spanish



Citación: J. Camargo, L. González, D. Segura, F. Garay, N. Rincón, "Orientation Assistance for Visually Impaired Passengers within a Bus Rapid Transit System (Transmilenio), Using Satellite Geolocation" INGENIERÍA, vol. 22, no. 2, pp. 283-297, 2017. ©Los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas. En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2017.2.a08>



Resumen

Contexto: Aunque el sistema de transporte masivo Transmilenio posee medios de audio informativo, estos son insuficientes para permitir que pasajeros en condición de discapacidad visual puedan desplazarse con mayor facilidad, ubicar puertas de acceso y rutas de desplazamiento. En este artículo se propone la utilización de un dispositivo portátil de bajo costo acondicionado con geolocalización satelital, buscando mejorar la autonomía de desplazamiento de ese segmento de población dentro del sistema Transmilenio.

Método: Se realizó la revisión de los desarrollos que hasta ahora se han hecho para mejorar el nivel de autonomía de las personas en condición de discapacidad visual, un análisis necesario a la hora de definir la tecnología más práctica para el desarrollo de un dispositivo aplicable en la ciudad de Bogotá D.C.; posteriormente, se establecieron los módulos funcionales del dispositivo incluyendo el sistema de almacenamiento de archivos, el de reproducción de sonido, la interfaz de usuario y el de geolocalización y ubicación dentro de Transmilenio. Se realizaron pruebas con diez voluntarios en condición de discapacidad visual, quienes se orientaron con el dispositivo en el trayecto entre las estaciones de Transmilenio de Banderas y Ricaurte por la troncal de las Américas; finalmente, se elaboró un estudio estadístico sobre la percepción del funcionamiento del dispositivo por parte de los usuarios.

Resultados: El 100 % de los usuarios se trasladaron con éxito en las pruebas piloto. En la percepción de funcionamiento los usuarios destacaron que el dispositivo proporciona opciones útiles con indicadores auditivos para la administración del dispositivo y el traslado dentro del sistema; igualmente, se identificó la dificultad del usuario al momento de reconocer el bus correcto que llega a la parada, ya que en una misma puerta de llegada pueden converger varias rutas y el dispositivo no fue equipado con ningún mecanismo para diferenciar los buses.

Conclusiones: Este tipo de dispositivo representa un bajo costo para quien lo adquiera debido a los componentes electrónicos utilizados en su implementación; representa una ventaja en relación a la seguridad para su portador gracias al diseño discreto que posee, esto lo hace menos vulnerable a robos en comparación al de un dispositivo celular inteligente al que se le instale una aplicación móvil. De esta manera, el dispositivo puede ser incorporado como una herramienta dentro de la política de inclusión de la población en condición de discapacidad visual; sin embargo, se debe contemplar implementar la tecnología GSM-GPRS para el envío de mensajes de texto de alerta y el uso de placas con montajes de circuitos superficiales para disminución del tamaño del dispositivo.

Palabras clave: Movilidad para invidentes, transporte masivo, Geolocalización portátil.

Language: Español

1. Introducción

En la ciudad de Bogotá D.C., según datos del Observatorio de Movilidad de la Cámara de Comercio, el sistema de transporte masivo (Transmilenio) movilizó en 2014 a 2,3 millones de pasajeros diarios [1]; debido a esto, el sistema ha hecho esfuerzos para ofrecer mayores condiciones de inclusión para la población con discapacidades frente al transporte convencional de autobuses. Sin embargo, el acceso y uso de este sistema por la población bogotana en condición de discapacidad visual aún comprende dificultades en cuanto al acceso, compra de tiquetes, ingreso a los buses y, sobre todo, en la adquisición de información para estimar la ruta necesaria hacia su lugar de destino.

En Bogotá D.C., el Instituto Nacional para Ciegos (INCI) estimó que en el 2013 la ciudad contaba con 79 880 personas en condición de discapacidad visual; teniendo en cuenta esto, la administración de Transmilenio S.A. ha comenzado a generar alternativas para mejorar el acceso de estas

poblaciones al sistema, tal es el caso del proyecto de ayuda a las personas en condición de discapacidad por medio de un módulo de información braille de rutas SITP, realizado en colaboración con el INCI [2], y de la implementación de sistemas de audio en algunos buses que comunican a los pasajeros hacia qué estación se dirigen y qué paradas realiza dicha ruta. Sin embargo, estas iniciativas se quedan cortas al momento de generar autonomía en un usuario con discapacidad visual, pues no se les suministran las herramientas adecuadas para fijar previamente una ruta y así tomar decisiones de qué servicio o bus es el más adecuado para dirigirse a su destino.

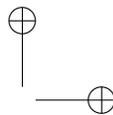
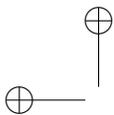
Ante este escenario, se propone la utilización de un dispositivo portátil de bajo costo acondicionado con geolocalización satelital (GPS; Sistema de posicionamiento global), en busca de mejorar la autonomía de desplazamiento de ese segmento de población dentro del sistema Transmilenio. En este artículo se encontrará un análisis de algunas de las herramientas tecnológicas desarrolladas e implementadas para mejorar el acceso al transporte público de personas en condición de discapacidad visual; posteriormente, se describirán las fases del desarrollo del prototipo de dispositivo portable con asistencia GPS, el cual permite la obtención de los datos necesarios para facilitar al usuario invidente un mejor acceso y uso del sistema de transporte y, de igual manera, contribuir en la mejora de seguridad e independencia dentro del sistema. En la parte final, se describe un caso de estudio con el que se evaluó el desempeño del proyecto, se realizó en la ruta comprendida entre las estaciones de Transmilenio de Banderas hasta la estación de Ricaurte pertenecientes a la troncal de la avenida las Américas.

2. Dispositivos desarrollados para el mejoramiento en el acceso al transporte público a personas en condición de discapacidad

En esta sección se describen algunos de los desarrollos tecnológicos que se han implementado para mejorar la movilidad de la población invidente, los cuales han sido aplicados teniendo en cuenta las características específicas de los lugares de aplicación y de las condiciones de los usuarios. Estas aplicaciones representan ayudas potenciales para personas en condición de discapacidad y son el resultado del esfuerzo del desarrollo tecnológico para mejorar la calidad de vida de esta población [3]; igualmente, se exponen las diferencias de dichos desarrollos previos respecto al dispositivo propuesto en este documento.

2.1. Sistema de alerta de autobuses para pasajeros que permite la navegación de personas ciegas

Este sistema implementado en el 2015 en la ciudad de Pune, Maharashtra, por el Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de India, aplica redes de sensores inalámbricos (WSN) para guiar a los usuarios invidentes por el transporte público. El sistema consiste en posicionar una unidad RF en el bus, que es reconocida por otra unidad que posee la estación donde se encuentra el usuario en condición de discapacidad, estos son alertados mediante un zumbador que se enciende tan pronto como el autobús entra en la parada [4]. Este sistema es bastante útil como dispositivo de alerta, pues evita que el usuario tome rutas equivocadas en caso de que converjan muchas rutas en



una misma estación; sin embargo, aún no contempla la necesidad de autonomía que tiene el usuario dado que no permite la planificación de sus recorridos.

2.2. Sistema de información de transporte público para personas con impedimentos visuales y ciegos

La tecnología involucrada en este desarrollo utiliza los teléfonos móviles como medio para el sistema de información de pasajeros, el GPS (Sistema de posicionamiento global), GSM (Sistema global para comunicaciones móviles) y tecnologías Bluetooth para la localización y la comunicación. En el sistema propuesto, se dan mensajes de sonido a las personas ciegas a través de teléfonos móviles que tienen un software instalado [5]. Esta aplicación está dirigida a teléfonos inteligentes que, en muchas ocasiones, las personas discapacitadas no tienen la capacidad económica de obtener, además de la dependencia a una conexión a internet que los haría incurrir en gastos de planes celulares. Este sistema fue implementado en los sistemas de transporte de Warsaw y Nowy Sacz, Polonia.

2.3. Sistema portátil de localización de alcance medio que utiliza ledes infrarrojos para personas con discapacidad visual

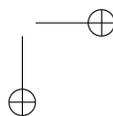
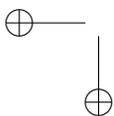
Construido y pensado por miembros del Instituto de Ciencias de la Computación de la Universidad Jagiellonian en Polonia, este sistema hace uso de una baliza activa fija y un receptor cuyo método aplica el tiempo de vuelo por ultrasonido y un método de intensidad infrarroja diferencial; el método de intensidad infrarroja genera un campo de señal uniforme que alcanzó distancias aproximadas a los 30 m. Como trabajo futuro se propone el uso de un receptor de bolsillo que se adapte a un teléfono inteligente que lo haría portátil [6]. A pesar de ser un método de localización eficiente, no contempla una integración a los medios de transporte público como herramienta de apoyo a la realización de viajes por parte de la población invidente.

2.4. Navegación autónoma por la ciudad para ciegos

Este sistema aplica un software integrado a un GPS que se basa en audio para facilitar la navegación a través de espacios abiertos y estimular las habilidades de orientación y movilidad en personas ciegas. Desarrollado por investigadores de la Universidad de Santiago de Chile, este sistema le permite a los usuarios ciegos llegar a varios destinos en contextos desconocidos que habitualmente solo navegarían en compañía de otras personas [7]. Este desarrollo contribuye al desplazamiento de las personas en condición de discapacidad que quieran una alternativa para llegar a destinos de difícil acceso para el transporte público, por lo tanto no requiere de una integración con los medios masivos de transporte.

2.5. Sistema de reconocimiento de obstáculos para personas ciegas usando RFID (Identificación por radiofrecuencia)

La Escuela de Ciencias e Ingeniería de la Universidad Al Akhawayn en Marruecos, desarrolló sistema de reconocimiento de obstáculos para personas ciegas, utiliza la identificación por radiofre-



cuencia (RFID). Está encaminado a la detección de cualquier obstáculo dentro del entorno recorrido por un usuario invidente a través de bastones RFID [8]. Esta aplicación se enfoca en el mejoramiento del desplazamiento de las personas en condición de discapacidad cuando se disponen a realizar caminatas, por lo que no contempla su aplicación dentro de medios de transporte motorizados.

2.6. Sistema inalámbrico de seguimiento de puertas para estaciones en el sistema Transmilenio

Este sistema realizado por investigadores de la Universidad Católica de Colombia realiza el seguimiento de puertas de forma inalámbrica, monitoreando el estado (abierto o cerrado) de las puertas de las estaciones de Transmilenio, como mecanismo de prevención contra accidentes relacionados a la seguridad de la población invidente expuesta a caídas en el sistema de transporte. Se desarrolló por medio de la tecnología inalámbrica Bluetooth y una interfaz elaborada en Raspberry PI [9]. Esta es una de las aplicaciones dirigidas concretamente al sistema masivo de transporte de Bogotá (Transmilenio), pero no corresponde a una herramienta que mejore la navegabilidad dentro de las estaciones o la planeación de rutas de viaje para usuarios en condición de discapacidad.

Como se puede deducir de lo anterior, los dispositivos estudiados presentan desventajas para permitir una mayor autonomía para la población en condición de discapacidad visual, dado que su desarrollo no se ha pensado para garantizar su navegación dentro de los sistemas masivos de las grandes ciudades. Teniendo esto en cuenta se propone desarrollar una aplicación tecnológica que centre sus esfuerzos en mejorar la capacidad autónoma del usuario entro del sistema de trasporte, por lo que en el siguiente sección se abordara la metodología para el diseño del mismo.

3. Metodología: diseño del dispositivo

El diseño y desarrollo del dispositivo se llevó a cabo por módulos, lo que permitió hacer una división estratégica del proyecto, basados en el concepto de sinergia: se desarrollaron por separado y posteriormente se unieron generando la solución final (Figura 1). Se propuso como módulo principal el de procesamiento, en el cual se encuentra el microcontrolador PIC18F46K22 donde se centraliza el tratamiento de la información mediante algoritmos implementados en lenguaje C; es así como se da inicio al desarrollo del dispositivo, para proseguir con el modulo GPS.

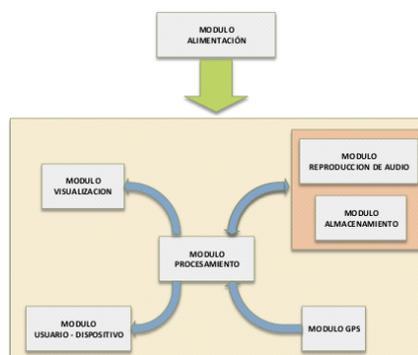
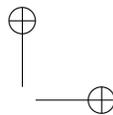


Figura 1. Diagrama de bloques – módulos dispositivos

El modulo GPS se configuró con una tasa de actualización de 1 Hz, donde se obtienen tramas con formato NMEA que brindan información de posicionamiento, hora, fecha y validación de datos confiables; a partir de esto, en el microcontrolador se desarrolla un buffer de almacenamiento que permite el uso de la información obtenida para el desarrollo de los algoritmos de ubicación y



selección de ruta.

El algoritmo de ubicación permite verificar si la posición actual pertenece a un área delimitada; estas áreas indican estaciones de Transmilenio y sitios estratégicos dentro del trayecto propuesto. Utilizando el software Google Earth se ubican cuatro puntos (A, B, C, D) con los cuales se delimita el área deseada (Figura 2).



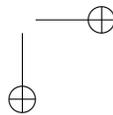
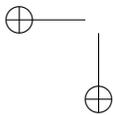
Figura 2. Imagen estación Ricaurte, área para encerrar estación punto A, B, C, D. Fuente: captura imagen del software Google Earth Región Bogotá – Colombia

Para determinar si un punto arbitrario se encuentra dentro o fuera de un área definida, el planteamiento del algoritmo ASUME las siguientes premisas:

- El punto arbitrario debe estar (a nivel de longitud) entre los puntos B y D.
- Se evalúan dos pendientes en el punto arbitrario, una con respecto al punto C y otra con respecto al punto D.
- La pendiente con respecto al punto C debe ser mayor a la pendiente determinada entre el punto B y C.
- La pendiente con respecto al punto D debe ser menor a la pendiente determinada entre el punto A y D.

Si se cumplen todas las premisas anteriores el algoritmo ubica el punto arbitrario dentro del área seleccionada, en caso contrario se determina que no pertenece al área.

Seguidamente, utilizando la tarjeta MP3 shield de Sparkfun, se desarrollan los módulos de MP3 y almacenamiento. Esta tarjeta posee un DSP para decodificación de archivos MP3 y un socket para una tarjeta microSD. Para realizar una escritura sobre la microSD es necesario tener en cuenta el formato de archivos FAT32, microchip ofrece un Application Note AN1045 [10], el cual da información acerca de cómo configurar el microcontrolador para realizar escritura, lectura, creación y eliminación de archivos (entre otras funciones) en una tarjeta microSD.



Para el desarrollo de las pruebas iniciales, en las cuales se requiere verificar la información de una forma fácil y rápida, se implementa el módulo de visualización con un display LCD 16x2 @ 3.3V, en el cual se imprimen los datos de ubicación, fecha y hora tomados de las tramas del GPS (Figura 3). Este módulo hace parte de la solución final del dispositivo como un componente auxiliar que se conecta depen-

diendo la necesidad del usuario.



Figura 3. Visualización datos obtenidos GPS Latitud y Longitud LCD 16x2

Igualmente, se implementó una interfaz de interacción usuario–dispositivo, compuesto de seis botones para el control de las funciones de este en lenguaje braille. Existe un botón para cancelar (CL), para aceptar (OK), para acceder al menú (MN), para ubicación (U) y dos para aumentar y disminuir el volumen de audio como se ve en Figura 4. En el caso del botón de ubicación se utiliza el algoritmo de posicionamiento descrito en el módulo GPS.



Figura 4. Interfaz usuario–dispositivo

A través de software para simulación de sólidos, se generó la ubicación estratégica de los diferentes componentes dentro de la carcasa protectora con un diseño enfocado a la portabilidad y usabilidad de personas con discapacidad visual. Se resalta que el 100 % de los usuarios asemejó el diseño del dispositivo con un MP3 que pasa desapercibido al momento de usar.

En el botón menú se encuentran dos opciones: programar ruta y estado de la batería; este último le permite al usuario, por medio de un audio, conocer el nivel de batería actual en el dispositivo (alto, medio o bajo). Al elegir la opción programar ruta, el dispositivo le pide al usuario elegir su estación de origen. Para este primer prototipo se decidió tomar la troncal de las Américas como escenario de experimentación; de esta manera, el dispositivo reproduce una a una las posibles estaciones dentro de la troncal y el usuario, al escuchar la estación en la que se encuentra, puede seleccionarla pulsando el botón OK., si el usuario no presiona el botón, las estaciones se repetirán nuevamente hasta que el usuario elija alguna. Una vez seleccionada una estación de origen el proceso se repite para seleccionar la estación destino dentro de la troncal Américas; al seleccionar la estación origen y destino, el dispositivo le informa al usuario la ruta que debe tomar para completar su trayecto (Figura 5).

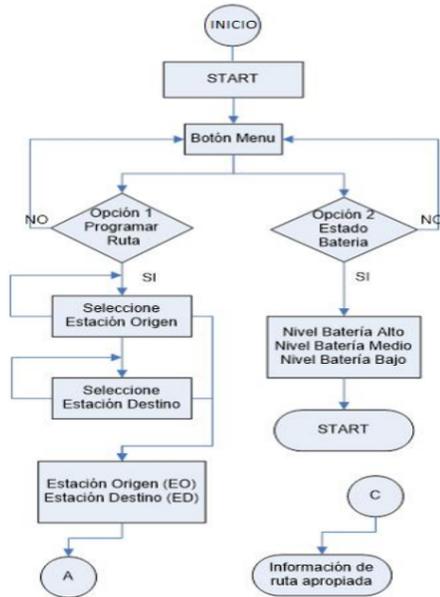


Figura 5. Diagrama de Flujo para el botón menú

El algoritmo de selección de ruta (Figura 6) considera las siguientes rutas asignadas a la troncal Américas: B1/F1, C19/F19 y J23/F23; ya que son las utilizadas para completar el recorrido seleccionado. Inicialmente, se verifica si la fecha es un día domingo o un día festivo, de ser así, se valida que la hora en la que se realizó la consulta este dentro del horario de funcionamiento de Transmilenio para días domingos y festivos (6:00-22:00 h). De cumplirse estas dos premisas, la únicas rutas posibles serían B1/F1, dependiendo hacia donde se dirige (el sentido se revisa más adelante para elegir ya sea entre B1 o F1).

De no ser un día domingo o festivo, el siguiente paso, es comprobar si se encuentra en un horario menor a las 5:00 Hrs o superior a las 22:00 h. Si el horario es menor o superior a los rangos establecidos, se le informa inmediatamente al usuario que se encuentra en un horario de no funcionamiento del sistema Transmilenio.

Si la premisa anterior de horario no es cierta, se verifica si la fecha es un día sábado. En el día sábado se revisa el horario entre las 6:00 y las 22:00 h, de encontrarse en ese horario el usuario, las posibles rutas son C19/F19, de no ser así las rutas posibles son B1/F1.

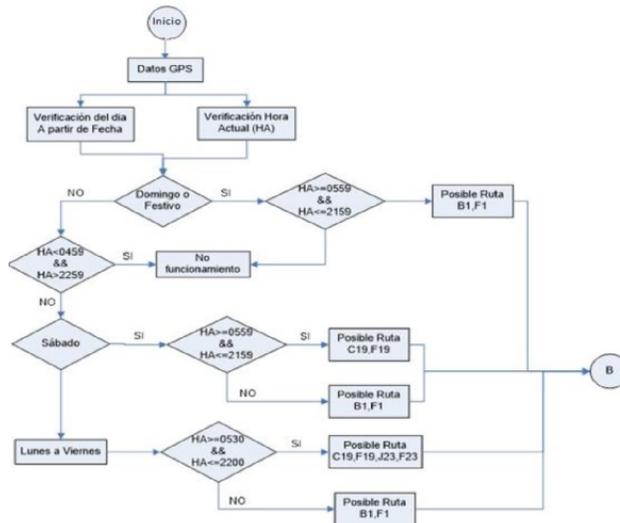


Figura 6. Diagrama de flujo para la selección de posible ruta

En caso de que el día no sea domingo, festivo o sábado, se sobreentiende que se encuentra en un día entre lunes y viernes, donde se encuentran todas las rutas y el horario de la mayoría de ellas no varía como en los otros días. Luego se revisa que el horario se encuentre entre las 05:30 y las 22:00 h, en lo que respecta a las rutas posibles C19/F19 y J23/F23, de no encontrarse en esta franja de horario, las rutas posibles serían B1/F1.

Al obtener en cualquiera de las opciones las rutas posibles, se procede a determinar el sentido correspondiente al trayecto a realizarse. Las estaciones fueron numeradas del 1 al 11 siendo Banderas la número 1 y Ricaurte la número 11 (las demás seguirán la secuencia de números de 1 en 1 dependiendo su orden), a partir de esta numeración y de cuál sea la estación origen y destino que eligió el usuario, se definirá el sentido hacia donde se debe dirigir. Si la esta-

ción origen (EO) es menor a la estación destino (ED), el sentido es de occidente a oriente, de lo contrario es de oriente a occidente.

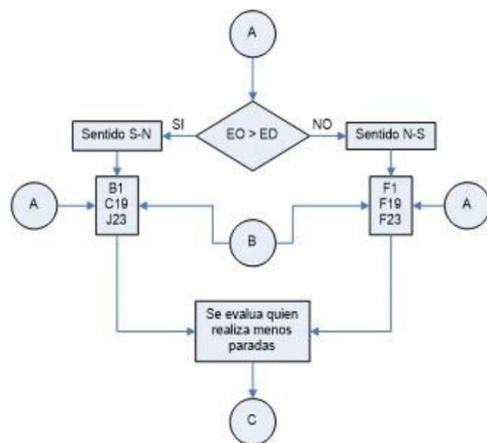


Figura 7. Diagrama de flujo para la selección de la ruta a partir de rutas posibles y del sentido norte-sur o sur-norte

Una vez definido el sentido, a partir de las estaciones destino y origen elegidas por el usuario y de las rutas posibles obtenidas, se evalúa cuál de ellas realiza menos paradas para llevar al usuario desde su estación origen hasta su estación destino; una vez encontrada la ruta más rápida, se le informa al usuario por medio de un audio (Figura 7).

4. Resultados y discusión

Para las pruebas del dispositivo se contó con la colaboración de diez voluntarios en condición de discapacidad visual, cuyas características demográficas se pueden observar en Figura 8.

4.1. Actividades previas

Como actividad previa se le explica a la persona acerca del proyecto y el objetivo de la prueba; seguidamente, se le capacita en el uso del dispositivo y se le pregunta su opinión acerca de su diseño.

4.2. Prueba piloto

La prueba piloto se inicia en el barrio Nueva Marsella, en una casa cercana a la estación Marsella, con el fin de que la persona pueda encender el dispositivo y que el GPS tenga el tiempo para engancharse con los satélites necesarios para dar información; en todo el recorrido la persona se encuentra acompañada por las personas a cargo del proyecto. Al encender el dispositivo la persona

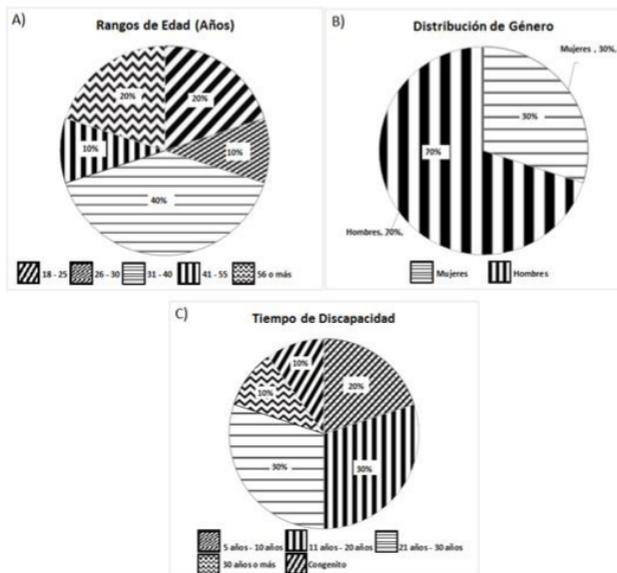


Figura 8. A) Rangos de edad de los usuarios. B) Distribución de Género. C) Tiempo de la Condición de Discapacidad

recibe un mensaje de saludo que le indica que ya se encendió correctamente el dispositivo. Se acompaña a la persona al puente peatonal de la estación Marsella y en ese transcurso, debido a que el dispositivo no se encuentra en el área de cobertura y no brinda información acerca de la ubicación de la persona, por lo que el dispositivo transmite un mensaje que dice “fuera del área de cobertura”. Al llegar a la entrada de la estación, el dispositivo le informa a la persona en qué estación se encuentra; allí se le pide al usuario que programe una ruta e informe lo que el dispositivo le está comunicando.

El usuario programa un recorrido desde la estación Marsella hasta la estación Ricaurte y comunica las indicaciones que escucha, una vez el dispositivo informa la ruta que debe usar, se asiste a la persona al lugar donde esta se toma. Dentro del bus articulado el candidato permanece atento a la información que le brinda el dispositivo en el transcurso del trayecto, como las estaciones inter-



Figura 9. Inicio prueba piloto estación Marsella y ruta C19

medias. El dispositivo informa sobre cada estación por donde transita el articulado y una estación anterior a la de destino le da indicación de prepararse para bajar del bus; al arribar a su destino se le informa que ha llegado al final de su trayecto, la ruta actual se elimina el dispositivo queda disponible para una nueva selección de recorrido.

4.3. Prueba extendida

Para la prueba extendida se aplicó el mismo protocolo tenido en cuenta para la prueba piloto a nueve usuarios más, para así recopilar los datos de opinión de un total de diez usuarios evaluando los aspectos de funcionamiento y diseño del dispositivo, y los rangos de tiempo que tardaron para llegar a su destino (Figura 10), dentro de las pruebas a dos usuarios se les aplicó el protocolo en un día festivo; cabe resaltar que la totalidad de los participantes de la prueba lograron llegar a su destino dentro de los cuales el 70 % demoró un tiempo cercano al promedio indicado por aplicaciones móviles para planeación de viajes como "Transmilenio y SITP", el cual, para el trayecto elegido, se estima en dieciocho minutos aproximadamente, tanto para días festivos como para días laborables [10].

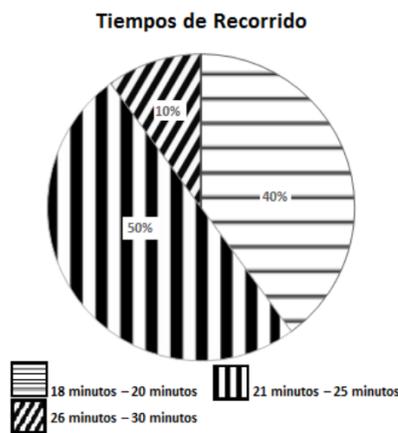


Figura 10. Registro de tiempos de recorrido de los participantes hasta llegar a su destino

Dentro del protocolo de pruebas se realizó un viaje de referencia donde el usuario inicial realiza el mismo recorrido pero no utiliza el dispositivo de apoyo. Se registra que el tiempo que tarda esta persona es de aproximadamente veintiocho minutos y corresponde a un aumento en el tiempo de viaje de aproximadamente ocho minutos más en comparación al 40 % de los usuarios que tardaron de dieciocho a veinte minutos, y un aumento de tres minutos respecto al 50 % de los que lo hicieron en el rango de veintiuno a veintiseis minutos. Este resultado evidencia una mejora respecto al tiempo que tarda una persona en condición de discapacidad cuando utiliza el dispositivo, además que la pone a la par respecto al promedio que demora alguien sin ningún tipo de impedimento visual.

En cada fase se implementaron preguntas que involucraban una evaluación del funcionamiento de esta nueva herramienta, algunas de las cuales se pueden ver recopiladas en la Figura 11. Respecto a la seguridad que proporcionaba el dispositivo en el recorrido por la ciudad, el 60 % de los participantes menciona que se sienten seguros al tenerlo; sin embargo, para mejorar esa percepción se deja abierta la posibilidad de adaptar al dispositivo un módulo de tecnología GSM-GPRS, que posibilite el contacto por mensaje de texto con un familiar del usuario en caso de emergencia, aportando además la ubicación del usuario con solo presionar un botón configurado para esto.

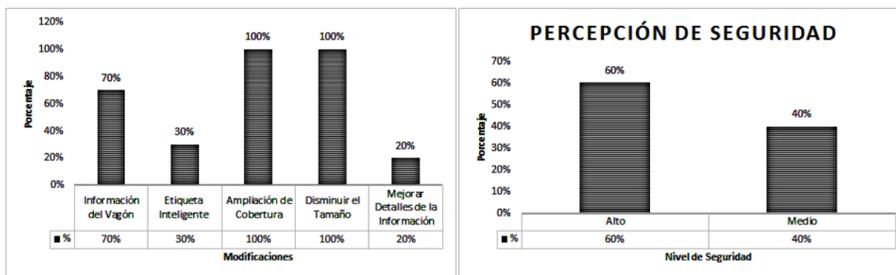


Figura 11. Percepción de los usuarios participantes respecto al dispositivo

Igualmente, para conocer sobre las adaptaciones más convenientes que se le deberían hacer al dispositivo para mejorarlo, el 70 % responde que se debería incluir la información del vagón de la estación en el cual el usuario puede tomar la ruta recomendada. Respecto al diseño la totalidad de los participantes concuerda con la necesidad de disminuir el tamaño del dispositivo para mejorar así mismo su característica portable, por lo que para futuros diseños se debería hacer uso de una única placa utilizando componentes de montaje superficial (SMD) para reducir el tamaño. Sin embargo, los usuarios resaltan la similitud física del dispositivo al de un MP3 por lo que pasa desapercibido entre los demás pasajeros del sistema.

El 30 % restante selecciona como mejora la inclusión de una etiqueta inteligente que se comunique con el dispositivo para brindar información de arribo y ruta de los buses articulados a las estaciones, esto teniendo en cuenta que en una misma puerta pueden llegar diferentes rutas a la seleccionada. Por último, el 100 % de los usuarios se mostraron satisfechos con el funcionamiento y expresaron la necesidad de ampliar las zonas de coberturas.

Debido al lugar de trabajo de algunos usuarios, en algunos casos fuera de Bogotá, el 70 % de los usuarios mencionan la posibilidad de que se les indiquen puntos clave del trayecto y arribo a algunos municipios dentro del trayecto; por lo que se deja abierta la posibilidad de implementaciones personalizadas que cubran la ruta entre Bogotá y los municipios aledaños y posibles rutas alternas para que, en caso de desvío, brinden al usuario información que le permita tomar decisiones acertadas y genere tranquilidad y autonomía al momento de viajar.

Atendiendo a la necesidad de movilización expresada por los usuarios, se deja abierta la posibilidad de ampliar las rutas programadas gracias a la tabla de asignación de archivos (FAT32) que se implementó en el dispositivo, la cual permite ampliar de manera considerable la capacidad de almacenamiento por medio de memorias microSD que actualmente van hasta 64 GB; además, este aumento en la capacidad permite un mayor detalle en los audios informativos, con el fin de darle más autonomía al usuario en su recorrido en el sistema de Transmilenio.

5. Conclusiones

La prueba piloto del dispositivo mostró resultados favorables para la orientación de usuarios con discapacidad visual en recorridos de rutas de Transmilenio, posibilitando un aumentando en su

autonomía, seguridad y tranquilidad al momento de desplazarse al lugar deseado, repercutiendo directamente en una mejora significativa en la calidad de vida gracias a la percepción de independencia y libertad de las personas en condición de discapacidad visual.

Con el uso de un microcontrolador de bajo costo, se logró implementar el sistema de archivos FAT 32, posibilitando la inclusión de una memoria microSD que aumenta de manera considerable la capacidad de almacenamiento de audios, con los cuales se le informa al usuario de manera detallada los pasos a seguir en cada una de las funciones de dispositivo y del recorrido necesario para que este llegue a su destino. Se deja abierta la posibilidad para que se implementen otras tecnologías como la GSM–GPRS y la disminución del tamaño del dispositivo aplicando placas con montajes superficiales. Así mismo, la posibilidad de extender las áreas de viajes para que no se limite a herramienta de ayuda para su ubicación en lugares o trayectos antes conocidos, sino a nuevos recorridos donde el dispositivo le genere la información necesaria para su orientación.

Este tipo de dispositivo representa un bajo costo para quien lo adquiera debido a los componentes electrónicos utilizados en su implementación; representa una ventaja en relación a la seguridad para su portador debido al diseño discreto que posee que lo hace menos vulnerable a robos, en comparación a los dispositivos celulares a los que se le instale una aplicación móvil que efectúe ayudas similares a esta. De esta manera, el dispositivo puede ser incorporado como una herramienta dentro de la política de inclusión de la población en condición de discapacidad visual, al ser adquirido por el Estado para su distribución entre esta población.

De igual forma, es importante resaltar la importancia de la generación de proyectos de investigación, desarrollo e innovación enfocados a mejorar la calidad de vida de las personas en condición de discapacidad visual, así mismo promover la implementación de los ya desarrollados desde de la facultad de ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Dentro de los referentes más cercanos se tienen al proyecto denominado “Ratón USB para personas tetrapléjicas controlado con el movimiento de la cabeza” cuyo hardware está destinado no solo a personas que sufren de tetraplejía, sino a quienes tengan algún tipo de discapacidad en alguno de sus cuatro miembros [11], y al proyecto “Diseño de un dispositivo para la movilidad de personas con discapacidad motriz usando el método función de calidad” enfocado al diseño de un dispositivo de movilidad aplicado a personas con discapacidad motriz entre ocho a quince años, con patologías T12 [12].

6. Agradecimientos

Este trabajo fue llevado a cabo gracias a la colaboración de los voluntarios quienes accedieron a realizar las pruebas, en cabeza del señor Luis Alfredo Segura que facilitó el acercamiento y así mismo la generación de los protocolos de pruebas; a los organizadores del Workshop on Engineering Applications 2016 —IEEE— UD por la gestión académica; y, por último, a los revisores y editores de la revista científica Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas quienes aportaron con sus correcciones y sugerencias a la mejora del trabajo y posibilitaron esta publicación.

Referencias

- [1] Cámara de Comercio de Bogotá and Universidad de los Andes, *Observatorio de Movilidad: Reporte Anual de Movilidad 2014*. 2015. ↑284
- [2] Secretaría Distrital de Movilidad Transmilenio S.A., *Informe de seguimiento plan de acción institucional*. Bogotá D.C., 2016. ↑285
- [3] R. Velázquez, “Wearable assistive devices for the blind. In Wearable and autonomous biomedical devices and systems for smart environment”. *Springer Berlin Heidelberg*, pp. 331–349, Nov. 2010. ↑285
- [4] S. Gholap, G. Ekshinge, P. Naik and P. S. D. Chavan, “Navigation of Blind People Using Passenger Bus Alert System”. *International Journal of Scientific and Research Publications*, vol. 5, no. 12, pp. 189–194, 2015. ↑285
- [5] M. Markiewicz and M. Skomorowski, “Public Transport Information System for Visually Impaired and Blind People”. *Springer Berlin Heidelberg*, 2010, pp. 271–277. ↑286
- [6] S. Park, I.-M. Choi, S.-S. Kim, and S.-M. Kim, “A portable mid-range localization system using infrared LEDs for visually impaired people”. *Infrared Phys. Technol.*, vol. 67, pp. 583–589, Nov. 2014. ↑286
- [7] J. Sánchez and N. de la Torre, “Autonomous navigation through the city for the blind”. *Proceedings of the 12th international ACM SIGACCESS conference on Computers and accessibility - ASSETS '10*, 2010, p. 195. ↑286
- [8] M. Nassih, I. Cherradi, Y. Maghous, B. Ouriaghli, and Y. Salih-Alj, “Obstacles Recognition System for the Blind People Using RFID”. *2012 Sixth International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies*, 2012, pp. 60–63. ↑287
- [9] J. H. Barbosa Díaz, *Sistema inalámbrico de seguimiento de puertas para estaciones en el Sistema Transmilenio*. 2016. ↑287
- [10] LeoSites, Transmilenio y Sitp - Aplicaciones Android en Google Play. [En línea]. Recuperado de: https://play.google.com/store/apps/details?id=com.rutasdeautobuses.transmileniositp&hl=es_419 ↑288, 293
- [11] A. D. Riaño Gómez, S. M. Omar, and S. M. José Jairo, “Ratón USB para personas tetrapléjicas controlado con el movimiento de la cabeza”. *Ingeniería*, vol. 19, no. 2, pp. 41–62, 2014. ↑295
- [12] L. C. Bravo, “Diseño de un dispositivo para la movilidad de personas con discapacidad motriz usando el método función de calidad”. *Ingeniería*, vol. 19, no. 1, Jun. 2014. ↑295

Julián Rolando Camargo López

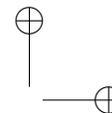
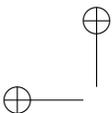
Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; especialista en Diseño y Construcción de Soluciones Telemáticas, Universidad Autónoma de Colombia; se desempeñó como Coordinador de los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería y posteriormente como Docente de Planta en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Sistemas Digitales y como Coordinador de la Especialización en Informática y Automática Industrial en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia, investigador al grupo de investigación GITUD donde realiza estudios sobre el campo de las telecomunicaciones. Correo electrónico: jrcamargol@udistrital.edu.co

Luis Andrés González Castro

Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; obtuvo su Red Hat Certified System Administrator V7 – RHCSA por la Red Hat. Bogotá, Colombia; actualmente es arquitecto de soluciones Red Hat en Bmind y apoya las soluciones TI basadas en Red Hat. Correo electrónico: luagonzalez@correo.udistrital.edu.co

Diego Alejandro Segura Garzón

Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; candidato a Magíster en Arquitectura en Tecnologías de la Información de la Universidad de los Andes; actualmente se desempeña como Especialista de soporte de Software On Site para servidores power IBM i, AIX, Vios server Bogotá, Colombia. Correo electrónico: dasegurag@correo.udistrital.edu.co



Fabián Steven Garay Rairan

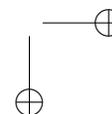
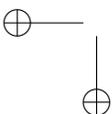
Ingeniero Electrónico, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; con estudios en el nivel de Especialización en Gestión de Proyectos de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; actualmente se desempeña como Asesor de formulación y estructuración de Proyectos de Investigación en la Unidad de Investigación de la Escuela Militar de Suboficiales Sargento Inocencio Chincá y como segundo líder del Grupo de Investigación INTEMIL, Nilo, Cundinamarca.

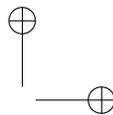
Correo electrónico: fsgarayr@correo.udistrital.edu.co

Nubia Rincón Mosquera

Licenciada en Electrónica, Universidad Pedagógica Nacional; especialista en Bioingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; magíster en Ingeniería Electrónica de la Pontificia Universidad Javeriana; actualmente se desempeña como profesora en el área de Sistemas Digitales en la Universidad Distrital Francisco José de Calda de Bogotá, Colombia; investigadora del Grupo internacional de investigación en informática comunicaciones y gestión del conocimiento – GICOGE, donde realiza estudios sobre el campo de la Bioingeniería.

Correo electrónico: nubiabioing@yahoo.es





Instrucciones para los Autores

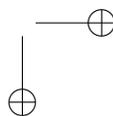
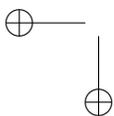
Introducción

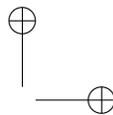
La revista INGENIERÍA es una publicación periódica-científica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Tiene como propósito principal divulgar los resultados de investigación de la comunidad académica de la Facultad del país y del exterior. Por tal motivo, los artículos que se publican en la revista deben tener relación con el trabajo en ingeniería, en general, y con las derivaciones de la ingeniería que se desarrollan en la Universidad, en particular. Su frecuencia es cuatrimestral (tres ediciones por año). 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 los artículos dentro de la revista INGENIERÍA se hace de acuerdo con la categorización sugerida por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología y e Innovación COLCIENCIAS, para revistas científicas y tecnológicas indexadas. Los autores deben definir y comunicar en la carta de presentación y en la plantilla del artículo la categoría del mismo. Las categorías de los artículos están identificadas por el número de orden de la siguiente lista y sus características son:

1. Artículo de investigación científica y tecnológica: Documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
2. Artículo de reflexión: Documento que presenta resultados de investigación desde una perspectiva analítica, interpretativa o crítica del autor, sobre un tema específico, recurriendo a fuentes originales.
3. Artículo de revisión: Documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran resultados de investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de por lo menos 50 referencias.
4. Artículo cortó: Documento breve que presenta resultados originales preliminares o parciales de una investigación científica o tecnológica, que por lo general requieren de una pronta difusión.
5. Reporte de caso: Documento que presenta los resultados de un estudio sobre una situación particular con el fin de dar a conocer las experiencias técnicas y metodológicas consideradas en un caso específico. Incluye una revisión sistemática comentada de la literatura sobre casos análogos.





6. Revisión de tema: Documento resultado de la revisión crítica de la literatura sobre un tema en particular.

La Revista INGENIERÍA dará prelación a aquellos documentos que se clasificarían en los artículos tipo 1, 2 ó 3.

Procedimiento para el envío de artículos para publicación

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 puede descargarse en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>.
La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que se 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/pages/view/Instructivos>.
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
 - Pertenecer a una institución diferente a la de los autores
 - Haber realizado publicaciones en los últimos tres años

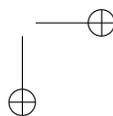
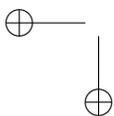
Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica revista_ing@udistrital.edu.co

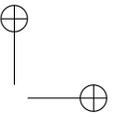
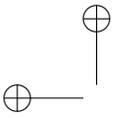
- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>

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 los artículos con las modificaciones sugeridas sin nombres y sin biografías. En general, este intercambio de sugerencias y modificaciones puede llegar a presentarse una o dos 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.

