

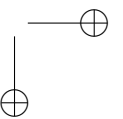
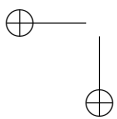
**UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**
FACULTAD DE INGENIERÍA

Revista Ingeniería

Volumen 19 · Número 2 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA SEMESTRAL

2014



Revista Ingeniería

Volumen 19 · Número 2 · Año 2014 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

REVISTA CIENTÍFICA SEMESTRAL



Carrera 7 No. 40-53 Piso 4
Bogotá, Colombia
Correo electrónico:
revista_ing@udistrital.edu.co
Teléfono: + 57 (1) 323 93 00 ext. 2413

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

POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

Su principal objetivo es difundir y debatir avances en investigación y desarrollo en las diferentes áreas de la ingeniería, con artículos de contenido original e inédito. La revista está dirigida a investigadores, especialistas, docentes, estudiantes de pregrado y posgrado, ingenieros en ejercicio y al sector empresarial.

EDITOR

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

COMITÉ EDITORIAL

Jose Marcio Luna, PhD. University of New Mexico	Cristina Gonzalez, PhD. Universidad Autónoma de Bucaramanga
Jose Luis Villa, PhD. Universidad Tecnológica de Bolívar	Victor Hugo Grisales, PhD. Universidad Nacional de Colombia
Henry Dios, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas	
Marco Alzate, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas	
Juan Carlos Figueroa, Dr. Universidad Distrital Francisco José de Caldas	

COMITÉ CIENTÍFICO

Germán Méndez, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas	Edwin Rivas, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Luz Esperanza Bohorquez, Dr. Universidad Distrital Francisco José de Caldas	Rodrigo Herrera, Msc. Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Ana María Peña, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas	

GESTORA EDITORIAL
Carolina Suárez Roldán, Ing.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

DIRECTIVAS

Roberto Vergara Portela
Rector (E)

Borys Rafael Bustamante Bohórquez
Vicerrector Académica

Giovanny Mauricio Tarazona Bermúdez
Decano Facultad Ingeniería

PREPARACIÓN EDITORIAL

Corrección de estilo Jorge Alvis	Diagramación Daniel Contreras Niño
--	--

IMPRESIÓN:
Carvajal

ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

Edgar Duarte Forero, MSc. Universidad Libre de Colombia	Luisa Tumbajoy, Ing. Universidad del Cauca
Jorge Posada, MSc. (c) Natura Software Ltda.	Katherine Galeano, MSc. Alcatel-Lucent
Henry Dios, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas	Manuel José Barón Molina, MSc. Universidad Católica de Colombia
Vanessa Rodríguez Lora, MSc. (c) Universidad EAFIT	Nestor A. Nova Arevalo, MSc. Universidad Cooperativa de Colombia
Oswaldo Padilla Almeida, MSc. Escuela Politécnica del Ejército, Quito.	Dubisay Morales, PhD. Universidad del Zulia
John Faber Archila, PhD. (c) Universidad de São Paulo	Engelberth Soto Estrada, PhD. Universidad del Valle
Aries E. Rodríguez Portela, MSc. Universidad Nacional de Colombia	Luz Esperanza Bohorquez, PhD. Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Andres Mauricio Hualpa, MSc. Universidad Cooperativa de Colombia	Vladimir Sousa Santos, MSc. Universidad de Cienfuegos
Zaimar Domínguez-Claro, PhD. (c) Universidad de Ciencias Pedagógicas "José de la Luz y Caballero"	Nelsy Perfecto Pérez-Ponce de León, PhD. Universidad de Ciencias Pedagógicas "José de la Luz y Caballero"
Humberto Loaiza Correa, PhD. Universidad del Valle	David S. Fernández-McCann, PhD. Universidad de Antioquia

PERMISO DE REPRODUCCIÓN

Los textos de los artículos incluidos en esta edición pueden ser utilizados y reproducidos con fines sin ánimo de lucro y dando crédito a los autores.



Este trabajo está bajo una Licencia de Creative Commons Reconocimiento - No comercial - Sin Obra Derivada 3.0 Unported

SUSCRIPCIÓN

Cra. 7 No. 40-53 Piso 4 Decanatura Facultad de Ingeniería
Teléfono: + 57 (1) 3239300 ext. 2413
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/user/register>

INDIZADA EN



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 endoso, 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.

La ilustración de la carátula es una alegoría sobre la aplicación de conocimientos de modelos, diseños y métodos de ingeniería, prosperando como frutos que abastecen soluciones a los problemas de la ciudad. La variedad de la cosecha alude a la riqueza de creatividad en nuestros ingenieros investigadores.
(Idea creativa: Sergio A. Rojas y Carolina Suarez R. Diseño: Félix López).

CONTENIDO

EDITORIAL

-
- Distinto, Diferente o una crítica del plagio** 5
Sergio A. Rojas, Ph.D.
-

ARTÍCULOS REGULARES

-
- Modelos de inventarios con productos perecederos:revisión de literatura** 9
Inventory models with deteriorating items: A literature review
Freddy Andrés Pérez Mantilla · Fidel Torres
-

- Ratón USB para personas tetrapléjicas controlado con el movimiento de la cabeza** 41
USB Mouse for tetraplegic people based on head tracking
Danny Alexander Riaño Gómez · Omar Salazar Morales · José Jairo Soriano Méndez
-

- Perspectiva de trazabilidad en la cadena de suministros de frutas: un enfoque desde la dinámica de sistemas** 63
Perspective of traceability in the food supply chain: An Approach from System Dynamics
Milton Mauricio Herrera Ramírez · Javier Arturo Orjuela Castro
-

- Realce de candidatos a nódulo pulmonar en radiografías de tórax por medio de filtros de convergencia** 85
Highlight of lung nodule candidates in chest radiographs by convergence filters
Julián Mauricio Aguillón Pérez · Sergio Alejandro Duarte Pacheco
Rodrigo Javier Herrera García
-

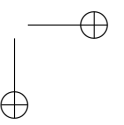
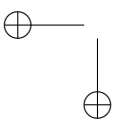
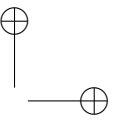
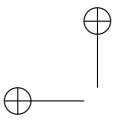
- Modelamiento de estaciones TransMilenio mediante Autómatas Celulares: lecciones aprendidas** 105
Modeling TransMilenio's stations using Cellular Automata: lessons learned
Camilo Alfonso Rodríguez Garzón
-

SECCIÓN ESPECIAL: REFLEXIONES DESDE EL DOCTORADO EN INGENIERÍA EN LA UNIVERSIDAD DISTRITAL F. J. D. C.

-
- Consideraciones sobre la línea de investigación en Inteligencia Organizacional en el Doctorado en Ingeniería U.D.F.J.C.** 115
On research aspects of Organizational Intelligence at the Engineering Doctoral Program of U.D.F.J.C.
Germán A. Méndez Giraldo
-

- Aspectos Técnicos y Normativos para el Monitoreo y Medición de Armónicos** 129
Technical and Regulatory Aspects for Monitoring and Measurement of Harmonics
Herbert Enrique Rojas Cubides · Edwin Rivas Trujillo · Adolfo Andrés Jaramillo Matta
-

- Sobre el rol innovador de la educación energética para la investigación en ingeniería** 147
Energy education: a new research topic in engineering
Adriana Patricia Gallego Torres · Jonn Edgar Castro Montaña
-



Distinto, diferente o una crítica del plagio

Bien puede argumentarse que la originalidad es el bastión fundamental de la publicación académica, esto es, del proceso mediante el cual un nuevo descubrimiento científico es inducido al acervo de conocimiento existente en una determinada disciplina. En efecto, ante un descubrimiento o invención ocurrido como resultado de un proceso riguroso de investigación, revisión o reflexión, el sentir altruista del científico lo motiva a compartirlo con la comunidad que le atañe. Y el mecanismo adoptado para tal fin, desde que se da inicio en el siglo XVII a la publicación académica, es divulgar la primicia de un artículo académico en una revista científica especializada. La inclusión de dicha primicia en la literatura, dependerá del mérito que juzguen pares acreditados para ello (editores, evaluadores, árbitros, correctores, y finalmente lectores conocedores), y su impacto será medido por el reconocimiento que la misma comunidad le otorgue al mencionarlo en conferencias, aulas, cátedras, convenciones y por supuesto, en artículos, patentes y demás productos científicos.

Sorprende pues, encontrar autores que desconozcan dicho principio, y que busquen vulnerarlo al intentar publicar primicias ajenas o propias, previamente incorporadas a la literatura. Asombra aún más que no sea cuestión de casos aislados, sino de reiteradas ocasiones, como hemos podido constatar recientemente dentro de nuestro proceso de revisión arbitrada. Afortunadamente la extrema pericia de nuestros editores y evaluadores nos ha permitido frustrar tales intentos ignominiosos de divulgación de material no original o duplicado en nuestras páginas. Vale resaltar que el agravante de este fenómeno, es que no solamente infringe los derechos morales del autor original, sino los derechos de reproducción de la publicación original. De allí que debamos asumir cero tolerancia con su ocurrencia.

Las argucias varían desde lo relativamente inocente hasta lo altamente sofisticado. La ocurrencia más habitual que hemos encontrado es la reproducción de párrafos ajenos transcritos literalmente sin cita textual sino como cita indirecta (referencia bibliográfica); esto desconoce la autoría original de la frase o el párrafo, atribuyéndolo engañosamente, como si fuera propio (no solo para textos, también ocurre en gráficas y tablas). Casos alarmantes se han encontrado, donde en un mismo artículo, numerosos párrafos son copiados (cuatro o cinco). Incluso, donde páginas enteras ajenas (hasta dos o tres) son re-

producidas sin ningún desparpajo. Algunas veces se utiliza como artimaña la inclusión de material traducido del inglés, como si la mera traducción literal desde otro idioma, despojara de su crédito al autor original. La presunta ingenuidad de este fenómeno, quizás apunte a la necesidad de fortalecer nuestra labor de pedagogía en comunicación científica dentro nuestras aulas de pregrado y posgrado.

Un segundo patrón, menos cándido que el anterior, consiste en la paráfrasis de textos no propios, en menor o mayor extensión sin siquiera citación bibliográfica; un caso similar es el “reciclaje” de material propio sin modificación ni mención a las publicaciones anteriores donde haya sido presentado originalmente. De otra parte un tercer tipo, de mayor gravedad, lo constituyen artículos armados como rompecabezas de extractos de publicaciones propias y ajenas no referenciadas, y que admirablemente alcanzan algún grado de congruencia a pesar de su falta de vigencia, intencionalidad u originalidad.

Es preocupante la tendencia de crecimiento del fenómeno que hemos evidenciado en los últimos seis meses. A manera de ilustración, en un grupo de once artículos recibidos en una convocatoria para una edición especial con reflexiones sobre líneas de investigación, cinco (casi la mitad) fueron rechazados por anomalías de ese tipo. Otro ejemplo de naturaleza patológica que se destaca, fue un manuscrito recibido en nuestra convocatoria regular, que en realidad correspondía a una traducción completa a español de otro previamente publicado en inglés por los mismos autores en una revista colega; la publicación de una traducción no es en sí mismo censurable, siempre y cuando sea manifestado, y consentido por, el editor, lo cual no ocurrió en este caso (los autores diligentemente firmaron carta de originalidad). El editor asignado no solo de manera acertada detecto el potencial engaño, sino que advirtió además que esa publicación previa en español imitaba inquietantemente a trabajos antiguos de otros autores publicados cinco y diez años atrás, copiando su estructura y transcribiendo contenidos originalmente en inglés. Este caso constituye una instancia de reciclaje intensivo y plagio bilingüe alternado: mezcla de material publicado en inglés de diferentes fuentes no propias, que luego se publica en español sin las debidas atribuciones y que posteriormente se intenta publicar nuevamente traducido al inglés, en una ventana de tiempo cercana a la década, sin alteración o actualización significativa del contenido. Un verdadero contra-ejemplo que demuestra la sofisticación que han logrado las estratagemas de apropiación indebida de creaciones ajenas (vale la pena resaltar que como buena práctica de ética editorial, debidamente notificamos al editor general de la otra revista sobre el amargo hallazgo).

Podríamos mencionar mucho mas casos; justo en el momento de escribir esta nota acabamos de identificar un caso de duplicación fragmentada: un artículo recién publicado en otra revista amiga, que copia la estructura, organización y algunos extractos literales de otro artículo anteriormente publicado en nuestra revista, cambiando solo la técnica y datos similares sin citar siquiera la publicación previa, o hacer referencia a ella para contrastar resultados nuevos, en una evidente atribución indebida de originalidad, aun así se trate de los mismos autores¹ (cabe anotar igual, que el hallazgo ha sido compartido con la editora de la revista amiga). Otro más, que excede el ámbito de la Revista pero que da cuenta de la gravedad y proliferación de la mala práctica, es el caso recientemente conocido por el país de un honorable senador de la república que en la redacción del proyecto de Ley 082 de 2014 sobre disposiciones para el

¹Y sin embargo desde una perspectiva científica, resulta de alguna forma gratificante poder corroborar en la práctica lo definido en la teoría, pues todos los casos antes mencionados corresponden en efecto a la caracterización del plagio dada por Steven Shafer en recientes notas editoriales (ver “Yo will be chaught” (2011), *Anesthesia & Analgesia*, Vol. 112, Issue 3, p 491–493, y “Plagiarism Is Plagiarism Is Plagiarism” (2014), Vol. 118, Issue 1, p 1–2).

código de ética de los funcionarios públicos (!), copió sin citar, ni sonrojarse, material del portal “El Rincón del Vago” en Internet².

Frente el angustioso incremento de esta práctica indebida, volviendo a nuestra crítica, se hace necesario vigorizar los esquemas de protección que garanticen la originalidad y no duplicidad de las primicias científicas. Hacemos un llamado para estrechar los lazos de colaboración entre revistas afines. Urge fortalecer la mesa de trabajo de ética y malas prácticas de la Red Colombiana de Revistas de Ingeniería - RCRI. Proponemos mantener repositorios compartidos de manuscritos en evaluación, recomendaciones de no publicación, reportes de casos de conductas no éticas, listas de autores vetados. Valdría la pena compaginar esfuerzos, armonizar procedimientos y estandarizar sanciones relativas a la cero tolerancia con el plagio. Lo que a propósito, pone nuevamente sobre la palestra la discusión en relación a la posibilidad de unificar revistas y construir sobre fortalezas dispersas (ver nuestra Nota Editorial Vol. 18, Num. 1, 2013).

Por otra parte, recomendamos revisar y acoger las guías que han sido propuestas por consorcios académicos internacionales, pues para consuelo de tontos, el fenómeno es un mal que se propaga por todas las latitudes (ver por ejemplo los flujogramas del código de buena conducta propuesto por el Committee of Publication Ethics - COPE³). Igualmente reiteramos nuestro clamor para que la labor que con buen juicio, suspicacia y dedicación realizan los editores y árbitros comprometidos con la divulgación de la ciencia, sea reconocida oficialmente dentro de nuestros planes de trabajo y ejercicio profesional (tema previamente referido en nuestra Nota Editorial Vol. 18, Num. 2, 2013).

Ahora bien, la avalancha de publicaciones en línea y la apertura de medios para consulta bibliográfica en tiempo real, implican una limitación práctica en la capacidad de detección de los revisores humanos y hace incuestionable la necesidad de mecanismos automatizados para filtrado anti-plagio; software del estilo Turnitin™ (iParadigms LLC., Oakland, California) o URKUNDTM (PrioInfo AB., Estocolmo, Suecia) deben ser incluidos dentro de la caja de herramientas básicas suministradas a editores, revisores y los mismos autores, por parte de universidades y editoriales académicas. La optimización de la utilización de estos servicios, y los costos que ello acarrea, constituyen nuevamente un interesante foco de convergencia para todas las revistas afiliadas a la RCRI y en general a los medios de publicación científica en el país. Valga la aclaración que en particular, INGENIERÍA en la actualidad carece de acceso a estos recursos. Y por supuesto, ninguno de estos esfuerzos sería suficiente sin la colaboración última de todos los lectores, quienes con su experticia y perspicacia son los filtros más rigurosos para detectar y censurar conductas anti-éticas que merezcan ser castigadas con el escarnio académico público.

Ante este panorama corresponde pues tomar medidas de urgencia; la más inminente es definir y adoptar una línea editorial anti-plagio, que queremos dar a conocer aprovechando este espacio (la política completa se puede consultar en nuestra página Web): las acciones que serán tomadas en adelante, en caso de sospecha razonable de intento de publicación de material no original o duplicado, y que dependerán de la gravedad de la falta conforme el dictamen del Comité Editorial y/o Científico irán desde amonestación mediante comunicación privada o pública a través de páginas editoriales, pasando por divulgación de la falta en Comité de Ética y de Regulación Profesional de alcance nacional e internacional (como RCRI y COPE), notificación a las entidades de afiliación institucional de los autores o financiadores, editores

²Consultado en Internet: <http://www.semana.com/Imprimir/408386> (ultima visita: Noviembre 24, 2014).

³Disponible via Web en: <http://publicationethics.org/resources/flowcharts> (ultima visita: Noviembre 24, 2014).

y revisores, contemplando solicitud de corrección o inclusive retractación y retiro del artículo de nuestros archivos y de bases de datos e índices bibliográficos en donde se encuentre indizada la Revista, y llegando hasta el veto de publicación para los autores por un periodo de hasta cinco años y denuncia ante las autoridades competentes, en caso que el buen nombre de la Universidad Distrital se vea comprometido.

Buscamos de esta manera brindar a nuestros lectores y autores mayor confianza en que nuestras páginas propenderán por la defensa de la primicia y originalidad en la publicación académica. Y aunque sospechamos que el reto de defender la buena conducta en la literatura científica requerirá un esfuerzo mancomunado enorme, mas del que puedan garantizar los mecanismos y estrategias mencionados anteriormente, nuestro propósito es aportar al debate y unirnos a la causa. Quizás haciendo eco de algunas estrofas de un son de impecable factura en nuestro juicio, interpretado por la Afro-Cuban All Stars y de autoría de Juan de Marcos⁴, podamos transmitir de manera mucho mas armoniosa, graciosa y elegante el mensaje que aspirábamos expresar⁵. Bastaría con parafrasear el término música con el de artículo científico. Júzguenlo ustedes:

“Es muy difícil ver lo original, en estos tiempos en que todos se imitan,
ya la diversidad no se ejercita, y en música muchos suenan igual.

Y en el arte se debe tener sello, algo que se distinga entre la gente,
con imaginación crear lo bello y que sea distinto y diferente.

Porque en la vida se debe andar derecho, rendir tributo a quien se lo merece,
con imaginación crear lo bello y que sea distinto, diferente.

(...)

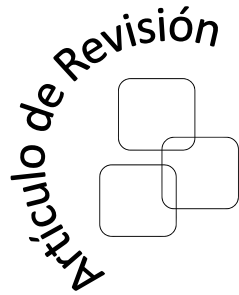
Algo tiene que decir la música que se invente, pero si es buena y original
¡mas lo agradece la gente!”

Colofón. Agradecemos como siempre a los autores, revisores y editores que hicieron posible este número, con aportes sobre dispositivos de control de apuntador para personas discapacitadas, modelos de inventarios con deterioros, estudios de trazabilidad de abastecimiento de frutas, disquisiciones sobre la congestión peatonal en estaciones de transporte masivo, procesamiento de imágenes radiológicas para detección de nódulos cancerosos y una serie de reflexiones de investigadores del programa de doctorado de la Facultad de Ingeniería de la UD.

Sergio A. Rojas, PhD.
Editor General Revista INGENIERÍA

⁴González, Juan de Marcos y Villa, Lázaro, 1999, “Distinto, diferente”, en Distinto, diferente (CD), Londres, World Circuit.

⁵Respondiendo parcialmente al deber pedagógico aludido entrelineas, a lo largo de este escrito hemos reutilizado material ajeno y propio, cuyas fuentes han sido debidamente atribuidas utilizando diferentes modalidades: citas de apoyo o referencias a otros autores (menciones a editoriales en Anesthesia & Analgesia), auto-citaciones (a editoriales en INGENIERIA), citación a material disponible en la Web y mención a marcas registradas y fabricantes. La inclusión de este último fragmento verbatim, tiene como segundo propósito ilustrar la utilización adecuada de citas textuales (nótese que al no tratarse de un artículo ordinario, las citaciones han seguido un formato de notas al pie de página, en vez de lista bibliográfica como exigen nuestras normas).



Freddy Andrés Pérez Mantilla
Universidad de los Andes
fa.perez10@uniandes.edu.co

Fidel Torres
Universidad de los Andes
ftorres@uniandes.edu.co



Modelos de inventarios con productos perecederos: revisión de literatura

Inventory models with deteriorating items: A literature review

Resumen

En el presente artículo se lleva a cabo una revisión de las principales características estudiadas por la comunidad científica en el desarrollo de modelos matemáticos que buscan definir una política de inventario óptima para productos que se deterioran. De este modo, se referencian 390 artículos publicados a partir del año 2001 en revistas de gran impacto, teniendo en cuenta: el tipo de demanda y deterioro representado en los modelos matemáticos, el estudio de una política de precio óptima, la inclusión de faltantes y/o valor del dinero en el tiempo, el estudio de múltiples productos y/o dos o más eslabones de la cadena de suministro, y la utilización de parámetros o variables difusas. Finalmente, se identifican oportunidades de investigación que a la fecha no han sido abordadas por la comunidad científica en este campo del conocimiento.

Palabras claves: control de inventario, productos perecederos, deterioro, revisión de literatura.

Abstract

This paper presents a review of the main characteristics of the mathematical models developed by the scientific community in order to determine an optimal inventory policy for deteriorating items. Thus, a classified bibliography of 390 articles published from 2001 to 2014 in high-impact journals is submitted while considering the type of demand and deterioration, the integration of inventory and pricing decisions, the inclusion of shortage and/or the time value of money, the consideration of multiple items and/or multi-echelon systems, and the incorporation of uncertain parameters other than demand. Finally, research questions not yet addressed by the research community in the field of inventory control for deteriorating items are pointed out.

Palabras claves: inventory control, perishability, deteriorating items, review.

Recibido: 27-11-2013
Modificado: 09-08-2014
Aceptado: 11-12-2014

1. Introducción

La teoría de inventarios tiene sus raíces en el modelo de Cantidad Económica de Pedido (EOQ, por sus siglas en inglés), propuesto por Harris [1] y en donde se asumió entre otros supuestos que los productos tienen vida útil ilimitada. A la fecha, dicho modelo permite obtener una buena aproximación de la política óptima de inventarios en varias situaciones de la vida real. No obstante, en sistemas de inventarios donde el deterioro tiene un impacto económico significativo, asumir que los productos tienen vida útil ilimitada conduce a la adopción de políticas de inventarios muy alejadas a la óptima. La disminución de la calidad de los productos agrega una penalización adicional en el mantenimiento del inventario, y, por tanto, un desafío importante en la gestión de inventarios con productos perecederos es determinar una manera eficiente de mantener la disponibilidad de los artículos mientras que se evitan excesivas pérdidas por productos vencidos.

Cuando se habla de los tipos de deterioro que sufren los productos cuando se mantienen como inventario, en la literatura se pueden observar diferentes tipos de clasificaciones. Nahmias [2], Goyal & Giri [3] hacen una distinción entre productos perecederos con vida útil fija (3 días, 1 mes, etc) y productos cuya vida útil es una variable aleatoria con distribución conocida (*random lifetime perishability*). Raafat [4] distingue entre productos con vida útil fija y productos con deterioro continuo (*continuous decay or random lifetime*), sin embargo, también se sugiere una clasificación de acuerdo con el valor o la utilidad de los productos respecto al tiempo (*constant-utility, decreasing-utility, increasing utility*). En otro trabajo, Nahmias [5] primero define *decay, exponential decay, y age-independent perishability* como el deterioro que se presenta en los sistemas de inventarios cuando se asume que una fracción fija del inventario a la mano se pierde durante cada periodo de tiempo; luego introduce el término *perishability* para aquellos productos que tienen un valor o utilidad constante durante un periodo de caducidad conocido o desconocido. Por su parte, Bakker et al. [6] clasifican el deterioro de los productos como *fixed lifetime, age dependent deterioration rate y time or inventory (but not age) dependent deterioration rate*, implicando en la segunda categoría que la vida útil de los productos siguen una distribución de probabilidad. Finalmente, Amorim et al. [7] clasifican el perecimiento de los productos de acuerdo con su regulación externa (fijada o libre) y el valor percibido por los clientes (constante o decreciente).

Si bien en la última década la mayoría de investigadores han adoptado alguna de estas clasificaciones, en el presente artículo se utiliza una clasificación más acorde con el modelo matemático desarrollado. Por ejemplo, en muchas publicaciones se afirma que el deterioro de los productos sigue una distribución de probabilidad Weibull; no obstante, al observar en los modelos matemáticos que el deterioro con distribución de Weibull no es más que una función respecto al tiempo sin ninguna variable aleatoria, sería incorrecto definir la tasa de deterioro como una variable incierta o aleatoria.

Por otra parte, cuando se trata de inventarios constituidos por componentes electrónicos, celulares, artículos de moda, etc., se dice que dicho inventario está sujeto a obsolescencia debido a la entrada de productos sustitutos y/o el desarrollo de nuevas tecnologías. En este contexto, es claro que el margen de utilidad de los productos inventariados se hace cero o disminuye considerablemente a partir de un instante de tiempo desconocido o aleatorio. Es decir, que contrario a los productos que están sujetos a deterioro, no existe ningún interés en hacer

nuevos pedidos de productos que ya están obsoletos. Los lectores interesados en diferentes enfoques utilizados por los investigadores en modelos de inventario sujeto a obsolescencia pueden consultar los varios trabajos en [8], [9]-[13].

Al igual que Goyal & Giri [3] y Bakker et al. [5], en el presente artículo se da una visión general sobre las principales contribuciones científicas en sistemas de inventario sujeto a deterioro. No obstante, se discuten nuevas características no tenidas en cuenta en dichas revisiones, al igual que nuevos hallazgos encontrados en los últimos dos años. De este modo, el presente artículo se centra en investigaciones que hacen referencia al desarrollo de modelos de inventario con productos que se deterioran, haciendo énfasis en los principales supuestos adoptados y las especificaciones de los modelos matemáticos desarrollados. En la sección 2 se resume la metodología utilizada para la selección de los artículos con los que se desarrolla el presente trabajo. En la sección 3 se discuten las principales características de los sistemas de inventario sujeto a deterioro. La sección 4 presenta la clasificación de la literatura revisada y en la sección 5 se da a conocer la conclusión del estudio llevado a cabo. Para el lector interesado en modelos de inventario para productos perecederos, y enfocados hacia la planeación de la producción en una cadena de suministro se sugiere ver la revisión de literatura realizada en [14]. Para el lector interesado en revisiones de literatura enfocadas en modelos de inventario para productos que tienen una vida útil fija (*finite shelf-life*) se sugiere ver los trabajos en [15, 16]. Para los lectores interesados en revisiones donde sólo se incluyen modelos determinísticos con la inclusión de faltantes se sugiere ver [17].

2. Método

La búsqueda de los artículos de investigación se realizó en las bases de datos EbscoHost, Informa Journals, Jstors, Proquest, Scencedirect, Springerlink, Taylor & Francis Group, y WileyOnlineLibrary. En cada una de éstas, las palabras *deteriorat**, *perish**, *decay**, *shelf life* y *lifetime* fueron ingresadas junto a la palabra *AND inventory* para obtener coincidencias a nivel de *Title*, *Abstract* y *Keywords*, con artículos disponibles desde enero del 2001 a diciembre del 2013. Nótese que el asterisco (*) es utilizado con el fin de incluir dentro de la búsqueda todas las formas posibles de hacer referencia al deterioro (*deteriorating*, *deteriorate*, *perishable*, *perishability*, etc). Nótese también que la búsqueda incluye todos los artículos en donde los autores mencionan tanto el deterioro como la palabra *Inventory*, pero en campos de búsqueda diferentes (*title*, *abstract* o *keywords*). Los artículos fueron juzgados en primera medida de acuerdo con el título, y de ser necesario según el resumen o el desarrollo del tema, para verificar que efectivamente se trataba de un modelo matemático para optimizar el control de inventarios de productos que se deterioran. Los artículos enfocados hacia los modelos de inventario sujeto a obsolescencia fueron descartados a menos que simultáneamente determinaran políticas óptimas de reabastecimiento para la gestión de inventario de productos sujeto a deterioro. Finalmente, como resultado de esta búsqueda, y del proceso de clasificación llevado a cabo mediante el programa EndNote, se obtuvieron 390 artículos de investigación relevantes para la presente revisión de literatura.

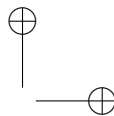
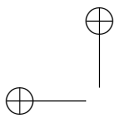
3. Principales características de sistemas de inventario sujeto a deterioro

Teniendo en cuenta las diferentes características que se presentan en el control de inventarios con productos que se deterioran, estos se pueden clasificar principalmente de acuerdo con el tipo de demanda con la que interactúa el sistema o el tipo de deterioro que sufren los artículos cuando se mantienen en inventario.

Dependiendo del tipo de demanda, se puede hablar de modelos de inventarios con demanda determinista (conocida) o incierta: si la demanda es determinista, la variación del inventario respecto al tiempo durante cada ciclo de inventario puede verse afectada por una predicción de demanda constante (e.g., $\partial I(t)/\partial t = -D_1$), o por el efecto combinado de una demanda constante D_1 y una fracción fija D_2 sobre el nivel de inventario en un instante dado (e.g., $\partial I(t)/\partial t = -D_1 - D_2 I(t)$). En modelos de inventarios más elaborados, el consumo del inventario puede también ocurrir mediante una demanda que depende del tiempo y/o de uno o varios parámetros de la mercadotecnia (e.g. precio de venta, frecuencia de publicidad, facilidades de pago, servicios posventa, etc.). Por su parte, si la demanda es incierta, entonces ésta podría estar representada por medio de una distribución de probabilidad conocida, o podría estar representada por medio de una función aditiva o multiplicativa con componentes aleatorios. Cuando no es posible obtener una distribución de probabilidad confiable para representar la demanda, la consideración de una demanda *fuzzy* o híbrida [18-23] suele ser útil para manejar este tipo de incertidumbre.

Como se mencionó en la introducción, no existe un consenso de las anteriores revisiones para clasificar el tipo de deterioro que se manifiesta en los sistemas de inventario. No obstante, en la presente revisión de literatura se usan tres categorías para representar exactamente la forma en que el deterioro fue definido y modelado por la mayoría de los autores que publicaron sus trabajos en revistas de gran impacto. La primera categoría, modelos de inventario con una vida útil fija y conocida, es utilizada para referirse a productos con un periodo de caducidad conocido (e.g. 2 días, 1 mes, etc.). La segunda categoría, modelos de inventario con una tasa de deterioro constante, es utilizada para referirse a modelos donde la variación del inventario en cada periodo o instante de tiempo t se ve afectada por una fracción constante θ sobre el nivel de inventario en un instante de tiempo dado (e.g., $\partial I(t)/\partial t = D_1 - \theta I(t)$). La tercera categoría, modelos de inventarios con tasa de deterioro variable, es utilizada para referirse a aquellos modelos en donde la variación del inventario en cada periodo o instante de tiempo t está afectada por un deterioro $\theta(t)$ que sigue cualquier función del tiempo (e.g., $\partial I(t)/\partial t = D_1 - \theta(t) I(t)$).

Nótese que investigaciones en las que se refieren a productos cuyo deterioro sigue alguna distribución de probabilidad, son clasificadas en la segunda categoría si se asume que la tasa de deterioro θ es igual a la esperanza matemática de la función de distribución de probabilidad [24, 25]. Contribuciones como [26-33] en la que la tasa de deterioro se puede reducir a una tasa $m(\xi)$ mediante la inversión de ξ unidades monetarias en alguna tecnología de preservación, pueden ser clasificadas en la segunda o tercera categoría ($C2$ y $C3$) dependiendo de la variabilidad o no de la tasa de deterioro en el modelo matemático resultante. (e.g., $\partial I(t)/\partial t = D_1 - [\theta - m(\xi)] I(t) \rightarrow C2$; $\partial I(t)/\partial t = -[1 - m(\xi)] \theta(t) I(t) \rightarrow C3$). Mientras que modelos de inventario en donde los productos pueden expirar aleatoriamente



antes de su fecha de caducidad máxima, son clasificados en la categoría tres debido a que la cantidad de productos que se deterioran no es uniforme respecto al tiempo, i.e., la cantidad de productos que se deterioran de un mismo lote o pedido explícitamente varía respecto al tiempo.

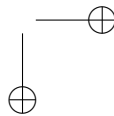
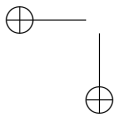
Como se ha podido observar, el nivel de inventario respecto al tiempo puede verse disminuido por el efecto combinado de la demanda y la cantidad de productos que se deterioran. No obstante, dicha disminución puede ser contrarrestada ya sea por una tasa finita de producción [19, 24-26, 30, 34-116], o bien por una reproducción del inventario como el que se presenta en el sector ganadero, en donde los inventarios son ganados que decrecen debido a la demanda y el deterioro, pero que también crecen por la reproducción del mismo [117-119].

Ahora bien, es importante observar que, aunque en la mayoría de los modelos de inventarios el modelamiento del deterioro y la demanda más que representar una situación particular son definidos como un supuesto del modelo matemático que se desarrolla, todas estas encajan bien en situaciones de la vida real. Por ejemplo, en algunas industrias el consumidor podría verse atraído por productos que se exhiben en los almacenes en grandes cantidades, o bien, una empresa podría interactuar en un mercado en el que la demanda esperada es incierta, y en donde además el consumidor es permisivo o castiga fuertemente periodos de desabastecimiento. Por ende, una adecuada aplicación de los modelos de inventarios con productos que se deterioran dependerá en gran medida del buen juicio del profesional.

Entre las demás interacciones, supuestos y/o restricciones que han de tenerse cuenta en mayor o menor medida para el buen desarrollo y/o aplicación de los modelos de inventario sujeto a deterioro se encuentran principalmente el tiempo de entrega (lead time con distribución conocida, desconocida, cero o constante), la política de control de inventario (con revisión periódica o continua), la inclusión de faltantes (acumulación total o parcial de la demanda o con ventas perdidas), la inclusión de múltiples productos (productos sustitutos o complementarios), tasa de producción (finita, infinita o incierta), el precio de venta (fijo, variable o incierto), el valor del dinero en el tiempo, la cantidad de eslabones dentro de la cadena de abastecimiento, la inclusión de políticas de ventas del proveedor (fija o condicionada) y/o el conjunto de parámetros inciertos o difusos.

4. Clasificación de modelos de inventario sujeto a deterioro

En la presente sección se clasifican y analizan 390 artículos científicos, cuyo aporte principal fue el desarrollo de un modelo de inventario con productos que se deterioran. En la sección 4.1 se clasifican las investigaciones desarrolladas entre el año 2001 y 2013 de acuerdo con el tipo de demanda y deterioro asumido, y en la sección 4.2 se clasifican los diferentes trabajos referenciados de acuerdo con las siguientes características distintivas en los sistemas de inventarios: variación en el precio de venta (determinación de una política de precio óptima); existencia de faltantes; inclusión de múltiples productos; existencia de más de un depósito para el almacenamiento de los inventarios; inclusión de más de un nivel dentro de la cadena de suministro; existencia de una política de crédito del proveedor; inclusión del valor del dinero en el tiempo y/o inflación; y utilización de parámetros/variables difusas/híbridas.



4.1. Clasificación de acuerdo con la demanda y el deterioro asumido en los modelos de inventarios

En la Tabla I se muestra el tipo de demanda y deterioro modelado por los diferentes autores de acuerdo con las características mencionadas en la sección 3. De aquí, 331/390 de los trabajos consultados entre el año 2001 y 2013 estudian una demanda determinista y 62/390, una demanda incierta. Así mismo, en 265/390 artículos se consideró un deterioro con tasa constante; en 81/390 se consideró un deterioro con una tasa variable; y en 44/390, un deterioro con vida útil fija. Nótese que de todos los artículos en donde se consideró una vida útil fija, 33/44 tuvieron en cuenta una demanda incierta, y que de todos los trabajos en donde se consideró una demanda determinista, 318/381 no incluyeron ninguna de las estrategias de mercado que generalmente usan las empresas para influenciar la demanda, tales como la publicidad, facilidades de pago, servicios postventas etc.

Tabla I. Clasificación de acuerdo con la demanda y el deterioro (2001-2013)

Demanda	Deterioro con vida útil fija conocida	Deterioro con tasa constante	Deterioro con tasa variable
Constante	[90,109,120-124]	[19, 20, 24, 29, 31, 41, 43, 45, 49-51, 53, 63, 67, 68, 71, 75, 76, 82-84, 86, 94, 99, 100,102-106, 110, 116, 117, 125-186]	[28, 119, 187-193]
En función del tiempo	[194]	[25, 27, 30, 33, 37, 38, 43, 46, 47, 55, 57, 61, 62, 64, 66, 70, 72, 77-79, 88, 89, 91,95, 98, 101, 111, 113, 118, 195-260]	[35, 36, 39, 40, 69, 85, 92, 97, 115, 189, 261-294]
Sensible al nivel de inventario	[295]	[23, 32, 54, 60, 62, 80, 93, 114, 164, 199, 249, 253, 255-257, 260, 296-323]	[48,58, 65, 69, 74, 87, 187, 190, 191, 276, 285, 286, 324, 325]
En función de parámetros de mercadotecnia	[194, 326, 327]	[33, 34, 42, 46, 47, 52, 59, 72, 93, 98, 108, 112, 198,202, 216, 221, 222, 231, 232, 236, 237, 245, 250, 251, 302, 305, 306, 312, 319, 321, 328-340]	[48, 74, 96, 115, 291, 324, 341-357]
Incierta	[26, 56, 73, 107, 358-386]	[18-23, 81, 387-404]	[44, 405-407]

Cuando se utilizan estrategias de mercadotecnia para estimular el consumo de los clientes, la integración de decisiones de mercadotecnia con la gestión de inventario resulta importante para maximizar el beneficio mutuo y evitar conflictos potenciales entre departamentos de una misma compañía. De 331 modelos de inventario con demanda determinística, en donde se buscó tanto una decisión óptima para el departamento de mercadotecnia como para la administración de inventario, sólo 13 artículos han considerado que la demanda depende de factores diferentes al precio: en [328, 355, 357], la demanda es influenciada por facilidades de pago (*trade credit period*) que le ofrece un minorista al consumidor; en [312, 224], la demanda además de depender del precio, también depende del nivel de inventario a la vista de los

consumidores y de la frecuencia con que se publicitan los productos; en [254, 42], la demanda depende del precio de venta, de la frecuencia con que se publicitan los productos y del costo de mercadotecnia asociado; en [48], el consumo de los clientes depende del nivel de inventario disponible, y de la duración del periodo de garantía ofrecido a los clientes; en [291, 326, 327], la demanda es sensible al precio de venta y la calidad instantánea (*freshness*) de los productos, expresada como el tiempo que le queda a los productos para su vencimiento en un periodo o instante de tiempo dado; en [252], la tasa de la demanda depende del precio de venta, del nivel de inventario y de la frescura de los productos que sigue una distribución de Weibull; y en [108] se considera que la demanda depende tanto del precio como del nivel de servicio postventa ofrecido a los clientes.

Ahora bien, cuando factores externos tales como la economía de un país y las tendencias de consumo de un mercado cambian durante el horizonte de planeación, y tienen además un efecto importante sobre la demanda, podría ser incorrecto asumir que la demanda durante cada periodo de planeación es una variable aleatoria independiente de factores externos diferentes al tiempo. Para tales situaciones prácticas, un enfoque basado en las cadenas de Markov provee una alternativa flexible para el modelamiento del proceso de la demanda [361, 366, 370, 376, 379, 380, 388, 395, 397, 400, 401, 404-407] y no sólo generaliza un comportamiento de la demanda que sigue un proceso de Poisson [56, 358, 370, 372, 381, 384, 387, 392-394, 402], sino que es una herramienta conveniente para el modelamiento de procesos de renovación o no de la demanda. Sin embargo, a pesar de este hecho, el correcto modelamiento de la demanda mediante el enfoque de las cadenas de Markov sólo se mantiene para procesos de demanda con coeficientes de variación relativamente bajos, debido a que cuando se observan altas variaciones de la demanda, periodos estándares de longitud constante pueden introducir memoria y generar una distribución de la demanda correlacionada entre periodos. De los modelos de inventario con demanda estocástica que explícitamente tienen en cuenta parámetros de mercadotecnia, solo los modelos desarrollados en [26, 44, 359, 361, 363-365, 370, 373, 378, 379, 398] definen tanto un precio óptimo de venta como políticas de control de inventario. Por su parte, modelos de inventario en [26] [44] [73] [369] [378] [382] [383] tienen en cuenta que la demanda es aleatoria y sensible a la frescura de los productos, pero solo Cai et al. [26] estudian los esfuerzos para mantener la frescura de los productos como variable de decisión.

De investigaciones que tienen en cuenta una demanda determinista y una tasa de deterioro variable: en los modelos de inventario [28, 39, 69, 92, 96, 262, 263, 266, 267, 270, 272, 275, 279, 341, 343-347, 354], la tasa de deterioro se estudia como una función general o arbitraria respecto al tiempo $\theta(t)$; en los modelos desarrollados en [58, 190, 268, 281, 284, 285, 325, 349], la tasa de deterioro se estudia como una fracción del tiempo $\theta(t) = \theta \cdot t$; en los artículos [189, 192, 193, 264, 273, 282, 342, 353], la tasa de deterioro sigue una distribución de Weibull de tres parámetros $\theta(t) = \alpha \cdot \beta (t - \gamma)^{\beta-1}$; en los modelos [35, 36, 48, 65, 74, 85, 87, 97, 115, 119, 187, 265, 271, 276, 278, 280, 286, 287, 289, 290, 292-294, 324, 348, 350-352, 356], la tasa de deterioro sigue una distribución de Weibull de dos parámetros $\theta(t) = \alpha \cdot \beta (t)^{\beta-1}$; y en los modelos desarrollados en [188, 191, 277, 283, 355, 357], los productos se deterioran a una tasa $\theta(t) = 1/(1 + m - t)$, donde m representa la vida útil máxima de los productos. En otros trabajos particulares: Mahapatra & Maiti [74] presentan una tasa deterioro como función tanto del nivel de frescura o calidad como del tiempo mediante una función que sigue la distribución de Weibull de dos parámetros.; Baten et al. [40] y Chen & Lin [269] estudian un deterioro que sigue una distribución de Gumbel y una distribución normal respectivamente;

y Wang & Li [291] introducen una tasa de deterioro que depende del tiempo y la temperatura de almacenamiento al cual los productos son expuestos.

Respecto a los modelos de inventarios con demanda incierta, es interesante resaltar que la mayoría de estos han tenido en cuenta una vida útil fija conocida, y con la excepción de Ketzenberg et al. [406], Gürler & Özkaya [405], y Lian et al. [407] nadie más ha incluido modelos de inventario en donde los productos pueden expirar aleatoriamente antes de su fecha de caducidad máxima. De hecho, considerando artículos previos de revisión que abarcan publicaciones antes del año 2001 [2, 4, 16], sólo se encuentra un artículo, de Nahmias [408]. De acuerdo con la clasificación para el deterioro usada en el presente artículo, el deterioro asumido en [405-407] es clasificado como tasa de deterioro variable. No obstante, modelos como el desarrollado por Cai et al. [44], en donde la tasa de deterioro es modelada como la cantidad de productos que sobreviven mediante una función arbitraria o general del tiempo y con rango de $[0,1]$ puede ser incluida en esta categoría también. Por su lado, de los modelos de inventarios con demanda incierta y tasa de deterioro constante, la vida útil de los productos en [388, 392, 393, 395-397, 400-404] es considerada mediante una distribución exponencial negativa con parámetro $\gamma (> 0)$; y el deterioro de los productos en [18-23, 81, 387, 389-391, 394, 398, 399] es considerado como una fracción constante θ entre $[0-1]$ sobre el nivel de inventario en una instante dado.

En casi todos los modelos de inventarios se asume de una manera implícita que los productos mantenidos como inventarios son entregados inmediatamente al consumidor con su llegada. No obstante, cuando los productos son entregados al cliente mediante un tiempo de servicio, que generalmente es aleatorio, los administradores de inventario necesitan considerar políticas de reabastecimiento que tengan en cuenta la formación de colas, con el fin de implementar políticas adecuadas de servicio. Manuel et al. [396, 397] y Yadavalli et al. [404] analizan un sistema de inventario con tiempo de servicio y productos que siguen una distribución exponencial, asumiendo que el tiempo entre llegada de los consumidores sigue un proceso markoviano; pero el primero considera un solo servidor, y el segundo considera un sistema con múltiples servidores. En [400, 401] y [403], la vida útil de los productos también sigue una distribución exponencial; pero en [400] [401] se tiene en cuenta una distribución cuasialeatoria; y en [403], un proceso de Poisson.

4.2. Clasificación según otras características distintivas en los sistemas de inventarios

Como se puede observar en la Tabla II, entre las características de los sistemas de inventario estudiadas por los autores referenciados en esta sección, 206/390 artículos permiten periodos de desabastecimiento (categoría 1), 86/390 tienen en cuenta políticas de ventas que ofrecen los proveedores (característica 2), 72/390 consideran la determinación de una política óptima de precio (categoría 3), 61/390 estudian sistemas multiniveles (categoría 4), 62/390 desarrollan un modelo de inventario considerando el valor del dinero en el tiempo (categoría 5), 31/390 estudian la existencia de más de una instalación para el almacenamiento de los productos (categoría 6), 20/390 tienen en cuenta la existencia de múltiples productos (categoría 7), y 31/390 estudian la inclusión de parámetros difusos o la inclusión de parámetros estocásticos diferente a la demanda (categoría 8).

Tabla II. Clasificación de acuerdo con la inclusión de características distintivas en los sistemas de inventarios

Categoría	Demanda conocida	Demanda incierta
C1. Permiten periodos de desabastecimiento (faltantes)	[23, 27-29, 31, 32, 34, 36, 39, 41, 42, 45, 46, 48, 50, 52,55, 58, 59, 61, 74, 78, 79, 85, 87-89, 91, 95-97, 102-104, 106, 109, 111, 117, 118, 123, 125, 126, 140, 144, 145, 153, 154, 162, 165, 172, 174-178,182-187, 189, 190, 193, 195-197, 201-206, 208, 209, 211-214, 217, 218, 222-226, 230-232, 236, 240, 242-244, 246-248, 251, 252, 255-262, 264, 265,267-276, 278-281, 284-286, 288-290, 292-294, 297, 298, 301-304, 306-308, 310-312, 315, 316, 323, 324, 328, 330-332, 334, 335, 337, 340, 341, 343-346, 351, 356]	[22, 23, 56, 73, 81, 358, 360-362, 364, 366-372, 374-381, 383-388, 390-393, 395, 398, 399, 401, 402, 404-407]
C2. Consideran políticas de pago a proveedores	[20, 33, 51, 53, 71, 75, 76, 80, 86, 126-130, 133-139, 141-144, 146-148, 152, 155-158, 160, 161, 166-168, 173, 177, 179, 180, 185, 187, 188, 192, 198, 207, 209, 213, 216, 219, 226, 228, 229, 231, 235, 236, 240, 250, 253, 263,265-267, 282, 283, 287, 299, 305, 317-320, 322, 328, 335, 336, 340, 344, 350, 355, 357]	[20-22, 389]
C3. Determinan una política de precios óptima	[33, 34, 42, 46-48, 52, 59, 93, 96, 108, 112, 164, 194, 198, 202, 205,210, 216, 221, 231, 232, 237, 245, 250, 251, 291, 302, 305, 306, 313, 321, 325-327, 329-331, 333-346, 348, 349, 351-354, 356]	[18, 26, 44, 359, 361, 363-365, 370, 373, 378, 379, 398]
C4. Consideran sistemas multi-niveles	[24, 37, 47-49, 51, 53, 57, 58, 60, 61, 67, 68, 72, 83, 84, 94, 98-100, 106, 108, 110, 112-116,120, 124, 150, 151, 154, 162, 163, 178-181, 183, 184, 210, 217, 220, 222, 241, 304, 308, 328, 340]	[26, 44, 56, 107, 373, 374, 376, 383,391, 394, 399]
C5. Tienen en cuenta el valor del dinero en el tiempo	[25, 36, 48, 54, 58, 62, 96, 117-119, 127, 129, 140, 141, 143-145, 160, 177,183-187, 193, 197, 200, 201, 207, 208, 212, 215, 216, 220, 224-226, 236, 240, 254, 260, 262, 263, 267, 269, 270, 276, 285, 286, 300, 302, 306, 308,311, 314, 315, 323, 346, 350, 356]	[81, 359, 368]
C6. Consideran dos o más almacenes	[54, 55, 66, 126, 138, 153, 155, 158, 159, 165, 183-185, 193, 195, 201, 212, 217, 220, 225,229, 264, 277, 285, 286, 304, 305, 315, 332, 347]	[18]
C7. Estudian múltiples productos	[74, 77, 109, 124, 154, 170, 171, 296, 309, 334, 347]	[18, 22, 23, 56, 364, 368,369, 382, 383, 402]
C8. Introducen parámetros inciertos y/o difusos	[18-23, 74, 85, 133, 144, 171, 210, 233, 245, 305, 308, 314, 332, 335, 375]	

De 206 investigaciones que permiten periodos con faltantes: 18, 33, 21, 43, 19, 12 y 17 artículos incluyen la categoría C2, C3, C4, C5, C6, C7 y C8, respectivamente. De 86 investigaciones que consideran políticas de pago a los proveedores: 10, 6, 17, 7, 1 y 6 artículos han considerado la categoría C3, C4, C5, C6, C7, y C8, respectivamente. De 72 investigaciones

que determinan una política de precios óptima: 9, 8, 2, 3 y 6 artículos consideran la categoría C4, C5, C6, C7 y C8, respectivamente. De 61 modelos de inventario para un sistema multinivel: 6, 5, 4, y 4 incluyen la categoría C5, C6, C7 y C8, respectivamente. De 62 investigaciones que consideran el efecto del valor del dinero en el tiempo: 12 y 3 artículos incluyen la categoría C6 y C8, respectivamente. De 31 investigaciones que consideran un sistema con más de una instalación para el almacenamiento de los productos: 2 y 3 artículos han incluido la categoría C7 y C8, respectivamente. Finalmente, de 20 artículos que incluyen la existencia de múltiples productos, 5 consideran la categoría C8.

4.2.1. Modelos de inventarios que incluyen periodos de desabastecimiento (faltantes)

Cuando la demanda es mayor que lo previsto y ésta no se puede satisfacer inmediatamente con las existencias en bodega, se dice que hay exceso de demanda o faltantes. Dependiendo del tipo de relación cliente-empresa, el exceso de demanda (faltantes) podría perderse y penalizarse [45, 50, 102-104, 205, 232], o acumularse y penalizarse de diferentes maneras, incluyendo un costo por faltante. Por tanto, la forma en que se ve afectado el sistema de inventario durante periodos de desabastecimiento puede variar de un modelo a otro.

Como se puede observar en la Tabla III, de 331 artículos que desarrollan un modelo de inventario para productos con demanda determinista y en donde además se incluye la existencia de periodos de desabastecimiento, 65/331 asumen que toda la demanda en exceso se mantiene para ser satisfecha en el futuro con la llegada de nuevos pedidos, 18/331 asumen que una parte fija del exceso de demanda durante los periodos de faltantes se acumula y la otra parte se pierde, y 80/331 consideran que el consumo del inventario durante periodos de desabastecimiento depende de alguna función $\delta(\tau)$ respecto al tiempo τ para la llegada de nuevos pedidos (e.g., $0 \leq \delta(\tau) \leq 1$, con $\delta(\tau) = e^{-\sigma \cdot \tau} = 1$ (ó 0) indicando que los faltantes son completamente satisfechos al inicio del próximo periodo de reabastecimiento (o perdidos).

Tabla III. Artículos que estudian una demanda determinista y la existencia faltantes

Acumulación de la demanda durante periodos de faltantes	Referencias revisadas
Acumulación total	[23, 39, 41, 46, 50, 55, 61, 78, 79, 85, 87-89, 95, 97, 106, 109, 123, 125, 140, 145, 154, 162, 172, 175-178, 182, 183, 187, 189, 197, 203, 206, 208, 211, 213, 218, 224, 226, 230, 236, 240, 242, 256, 261, 264, 267, 269, 271, 273, 276, 278-280, 288, 290, 304, 306, 323, 332, 340, 346, 356]
Acumulación parcial fija	[36, 48, 58, 96, 144, 174, 195, 212, 257, 262, 274, 281, 298, 304, 310, 311, 315, 331]
Acumulación en función del tiempo de espera	[27-29, 31, 32, 34, 42, 52, 58, 59, 74, 91, 111, 117, 118, 126, 153, 165, 184-186, 190, 193, 196, 201, 202, 204, 209, 214, 217, 222, 223, 225, 231, 232, 243, 244, 246-248, 251, 252, 255, 258-260, 265, 268, 270, 272, 275, 279, 284-286, 289, 292-294, 297, 301-303, 307, 308, 312, 316, 324, 328, 330, 332, 334, 335, 337, 341, 343-345, 351, 383]

Respecto a los modelos de inventarios que estudian una demanda incierta y la existencia de faltantes, casi todos los autores asumen que la demanda durante periodos de desabastecimiento se pierde [56, 73, 358, 360, 366, 367, 374, 376, 378, 384-386, 390, 392, 393, 402, 406], o bien se satisface al inicio del periodo de reaprovisionamiento más cercano [22, 23, 81, 361, 362, 364, 368, 370-372, 375, 377, 379-381, 387, 388, 391, 393, 395, 405, 407]. No obstante, en [56, 369, 383, 398, 399] pueden encontrarse modelos de inventario con demanda incierta en los que sólo una fracción fija de los faltantes se satisfacen con la llegada del pedido más cercano; y en [401, 404] se estudian sistemas de inventario en donde la demanda que se presenta durante periodos de desabastecimiento reitera su intento de compra de acuerdo con un tiempo aleatorio y hasta encontrar existencias del producto (*retrial demand*). Es importante notar que contrario al caso en que los faltantes se penalizan, el último caso es más aplicable a casos en los que la compañía no se ve afectada significativamente por el mantenimiento de demanda no satisfecha.

Wu et al. [255], por ejemplo, propusieron un modelo para productos que comienzan a deteriorarse después de cierto tiempo (deterioro no instantáneo), en donde la demanda está en función del inventario y, además, se acumula o pierde en función del tiempo de espera. Olsson & Tydesjö [381] tienen en cuenta un modelo de inventario con demanda estocástica, pero asumen que el exceso de ésta se acumula totalmente indistintamente del tiempo de espera. Por su parte, Agrawal et al. [195] estudian un modelo de inventario con la flexibilidad de operar con uno o dos almacenes, en los que la tasa de deterioro es constante pero diferente y en donde los faltantes se acumulan a una tasa constante.

4.2.2. Modelos de inventarios que consideran políticas de pago a proveedores

En el modelo tradicional EOQ fue tácitamente asumido que el valor total de los pedidos era pagado tan pronto como éste fuera entregado. No obstante, es común encontrar proveedores que conceden un determinado plazo de pago sin el cobro de intereses (*trade credit period*), más allá del cual el valor total o parcial del pedido puede ser también cancelado, pero con el cargo de intereses.

Los modelos de inventarios en donde se otorga sólo un plazo de pago para pedidos mayores o iguales a un valor predeterminado por el proveedor pueden consultarse en [127, 128, 139, 146, 156, 207, 350]. Los modelos de inventarios en donde un plazo de pago es otorgado por el proveedor para cualquier tamaño de pedido pueden encontrarse en [71, 80, 86, 126, 133-135, 137, 141, 144, 148, 155, 158, 168, 173, 177, 185, 187, 188, 192, 213, 228, 229, 231, 235, 236, 240, 250, 263, 265-267, 282, 287, 317, 319, 320, 335, 336]. Mientras que los autores que consideran un plazo de pago pero como variable de decisión pueden consultarse en [53, 180, 198, 253, 340, 355, 357].

Los modelos de inventario desarrollados en [20, 21, 33, 51, 75, 76, 130, 138, 152, 157, 161, 179, 198, 216, 219, 299, 318, 322, 328, 344, 357, 389] no sólo tienen en cuenta la concesión de un plazo de pago entre un proveedor y un comprador, sino de este último al consumidor. En estos modelos se asume que el plazo concedido por el proveedor al minorista es mayor que el ofrecido por el minorista al consumidor. No obstante, Chang et al. [130] relajan este supuesto. Por otra parte, los modelos desarrollados en [136, 142, 147, 166, 209, 226] tienen

en cuenta situaciones en las que el proveedor no sólo ofrece un plazo de pago $M3$ sin el cobro de intereses, sino que también ofrece un descuento por pronto pago si el valor total del pedido se paga dentro de otro plazo $M1$ (con $M3 > M1$). Ouyang et al. [167] y Guchhait et al. [305] no sólo tienen en cuenta situaciones en las que el proveedor ofrece un plazo de pago sin el cobro de intereses $M3$ para tamaños de pedidos iguales o mayores a una cantidad determinada W , sino que ofrece también un plazo de pago sin el cobro de intereses para una parte del valor total del pedido cuando la cantidad que se compre sea menor que W . Al respecto, si la cantidad de pedido Q es menor que W , entonces el minorista debe pagar una fracción $0 \leq \beta \leq 1$ sobre el total de la compra $c \cdot Q$ cuando la orden es entregada, y pagar el resto $c \cdot Q(1 - \beta)$ durante un plazo $M2$ sin el cobro de intereses. Estos casos también son estudiados por Chung et al. [385] y Liao et al. [394]. Pero el minorista puede seleccionar entre un periodo de descuento $M1$ por pronto pago y un plazo de pago sin el cobro de intereses para una parte del valor total del pedido si $Q < W$, o puede elegir entre un periodo de descuento $M1$ por pronto pago y un plazo de pago $M3$ sin el cobro de intereses para el valor total del pedido si $Q \geq W$.

Taleizadeh et al. [22] consideran una situación en la que el proveedor ofrece diferentes descuentos en función del tamaño del pedido bajo la condición de que una parte del valor total del pedido sea cancelada inmediatamente y el resto dentro de un plazo acordado. Por su parte, Sarkar [283] considera tres tipos de descuentos sobre el valor total del pedido realizado a un proveedor de acuerdo con el plazo de pago sin el cobro de intereses seleccionado.

4.2.3. Modelos de inventarios que buscan determinar una política de precio óptima

En ambientes competitivos es común variar el precio de los productos para estimular la demanda y disminuir de este modo el nivel de deterioro de los productos almacenados: en este contexto, la política de precios que se debería adoptar juega un papel importante dentro del horizonte de planeación y por ende es importante tenerla en cuenta.

El precio de venta como variable de decisión fue considerado por primera vez en 1996 para productos perecederos por Eilon & Mallya [409]. Más adelante, Kang & Kim [410] y Aggarwal & Jaggi [411] reformularían y extenderían dicho modelo para abrir paso a investigaciones adicionales en donde se determina tanto una política de precios óptima [26, 33, 34, 42, 44, 46, 48, 52, 59, 93, 96, 108, 112, 164, 194, 198, 202, 205, 216, 231, 232, 245, 251, 302, 305, 306, 330, 331, 334-346, 348, 349, 351-354, 356, 365, 378, 379] como una política de descuento o rebajas óptima [18, 210, 221, 313, 325]. En los artículos [121] [132] se consideran escenarios en los que se ofrece un descuento en el precio de venta para estimular la demanda, pero dicho descuento en lugar de ser una variable de decisión es un parámetro.

Tradicionalmente, una práctica común llevada a cabo por las empresas es la de mantener un precio constante en los bienes o servicios ofrecidos y aplicar descuentos, ya sea cuando los productos o servicios ofrecidos están cerca de caducar o bien en periodos en los que la demanda es baja. No obstante, en compañías tales como hoteles y agencias de viajes, una estrategia en la que los precios varían en diferentes periodos (precios dinámicos) ha demostrado tener mejores beneficios. Los modelos de inventarios que consideran una política con precios dinámicos pueden consultarse en [47, 237, 250, 291, 321, 326, 327, 329, 333, 359, 361, 363, 364, 370, 373, 398].

4.2.4. Modelos de inventarios multiniveles

En la literatura estudiada, 43/61 de los modelos de inventarios que consideran más de un nivel dentro de la cadena de abastecimiento están restringidos a las interacciones que se presentan entre un proveedor o productor y un minorista [24, 26, 47, 48, 53, 56, 58, 60, 61, 67, 68, 72, 94, 98, 100, 108, 110, 114, 115, 124, 150, 151, 162, 163, 178-181, 183, 184, 210, 217, 220, 253, 304, 328, 340, 357, 373, 374, 376, 391, 399]. Sin embargo, los modelos en los que se considera un sistema de múltiples minoristas y un proveedor se estudian en [106, 112, 113, 116, 154, 241]. De los modelos que consideran un vendedor y múltiples compradores, Yang & We [113] y Wu & Sarker [106] consideran una política integrada de producción e inventario; Yu et al. [116] consideran un sistema en el que el inventario es manejado por el proveedor (*Vendor Managed Inventory*, VMI); y Li et al. [154] estudian el impacto de una estrategia de aplazamiento (*postponement strategy*), que consiste en retrasar procesos de diferenciación de productos tanto como sea posible hasta que el costo de la cadena de suministro sea eficiente.

Los modelos que analizan tres eslabones de la cadena de abastecimiento pueden encontrarse en [44, 67, 83, 84, 99, 107, 120, 222, 383, 394]; y los modelos que tienen en cuenta el flujo de productos debido a la logística inversa (cadena de suministro de ciclo cerrado) pueden consultarse en [37, 49, 57, 112, 181]. Seyedhosseini et al. [383] estudian un sistema de múltiples proveedores-compradores-consumidores en un tiempo de horizonte finito con múltiples productos. Cai et al. [44] estudian un sistema en el que un productor le provee los productos a un distribuidor a través de un *outsourcing* con el fin de determinar la cantidad óptima de pedido tanto para el productor como del comprador y el precio óptimo de las tres partes involucradas. Wee et al. [181] consideran un proveedor y un comprador teniendo en cuenta un sistema logístico con productos remanufacturados debido a la logística inversa bajo un sistema VMI. Chung & Wee [49] y Yang et al [112] también tienen en cuenta la logística inversa, pero en un sistema conformado por un productor y un comprador, y un productor y múltiples minoristas, respectivamente. Por su parte Feng et al. [57] y Alamri [37] consideran productos remanufacturados, pero desde la perspectiva de un productor con una y dos instalaciones respectivamente para las operaciones concernientes a la logística inversa.

4.2.5. Modelos de inventarios que consideran el valor del dinero en el tiempo y/o la inflación

El efecto del valor del dinero y la inflación es otra importante extensión del modelo tradicional EOQ que hace a los modelos de inventario aplicables a situaciones de la vida real. El valor del dinero en el tiempo juega un rol importante en los sistemas empresariales, y especialmente en países con doble dígito en el Producto Interno Bruto [270]. Teniendo en cuenta esto, en la Tabla IV se muestran los artículos de investigación que han sido desarrollados para tener en cuenta el efecto del dinero en el tiempo junto a otras características de los sistemas de inventario. Obsérvese que ningún trabajo ha sido desarrollado para tener en cuenta simultáneamente el efecto del dinero en el tiempo y la existencia de múltiples productos, y sólo pocas investigaciones han sido abordadas para incluir el valor del dinero en el tiempo en ambientes difusos.

Tabla IV. Artículos que incluyen el valor del dinero en el tiempo y otras características de los sistemas de inventarios

Característica	Referencias revisadas
Faltantes	[36, 48, 58, 81, 96, 117, 118, 140, 144, 145, 177, 183-187, 193, 197, 201, 208, 212, 224-226, 236, 240, 260, 262, 267, 269, 270, 276, 285, 286, 302, 306, 308, 311, 315, 323, 346, 356, 368]
Política de pago a proveedor	[127, 129, 141, 143, 144, 160, 177, 185, 187, 207, 216, 226, 236, 240, 263, 267, 350]
Política de precios	[48, 96, 216, 302, 306, 346, 356, 359]
Multinivel	[48, 58, 183, 184, 220, 308]
Dos almacenes	[54, 183-185, 193, 201, 212, 220, 225, 285, 286, 315]
Ambiente difuso	[144, 308, 314]

Hou & Lin [306] desarrollaron un modelo de inventario en donde la demanda está representada como función de la cantidad de inventario disponible y en donde los faltantes de cada ciclo de inventario se satisfacen en su totalidad al inicio de cada ciclo. Chern et al. [270] propusieron un modelo con una demanda representada mediante una función del tiempo, y en donde sólo una parte de la demanda en exceso (faltantes) se acumula o se satisface al inicio de cada ciclo. Mientras que Taleizadeh & Nematollahi [177] investigan el efecto de la inflación y del valor del dinero en el tiempo sobre un modelo de inventario con un horizonte de planeación finito y en donde se permite tanto faltantes como políticas de crédito ofrecidas por el proveedor.

En la mayoría de los modelos de inventario que consideran el efecto del dinero en el tiempo, la tasa de inflación es considerada como un valor constante y conocido. No obstante, Mirzazadeh et al. [81] tienen en cuenta una demanda incierta que depende linealmente de la tasa interna y externa de inflación mediante variables aleatorias que siguen una distribución de probabilidad conocida sobre un horizonte de planeación finito. En este modelo, la demanda durante los periodos de desabastecimiento se satisface completamente con la llegada de nuevos pedidos, y una fracción constante sobre el inventario a la mano se deteriora por unidad de tiempo.

4.2.6. Modelos de inventarios con más de un almacén

En la mayoría de los modelos de inventarios se supone que todos los productos se almacenan en una sola instalación. No obstante, en algunos casos las organizaciones cuentan con otros almacenes en los que varía tanto la tasa de deterioro de los productos como su estructura de costos. Por ejemplo, podría darse la situación en la que existe una capacidad limitada y en la que la empresa opta por rentar una bodega adicional. Otro caso podría ser el de un minorista que posee un punto de venta para vender productos frescos a un precio estándar y otro punto de venta para ofrecer descuentos en los productos que no se hayan vendido dentro de un tiempo determinado (productos próximos a caducar). Los modelos de inventario para productos perecederos en donde se tiene en cuenta más de una instalación para el almacenamiento de los productos junto a otras características de los sistemas de inventario se presentan en la

Tabla V. Nótese que modelos que consideran tanto el valor del dinero en el tiempo como dos instalaciones para el almacenamiento de productos que se deterioran se incluyeron dentro de la Tabla IV.

Tabla V. Artículos que incluyen más de un almacén y otras características de los sistemas de inventarios

Característica	Referencias revisadas
Faltantes	[55, 126, 153, 165, 183-185, 193, 195, 201, 212, 217, 225, 264, 285, 286, 304, 315, 332]
Política de pago a proveedores	[126, 138, 155, 158, 185, 229, 305]
Política de precios	[18, 305]
Sistema multinivel	[183, 184, 217, 220, 304]
Múltiples productos	[18, 347]
Ambiente difuso	[18, 305, 332]

Bhunia et al. [201] estudian un modelo determinista bajo condiciones de inflación y emplea la metaheurística PSO (*Particle Swarm Optimization*) para mostrar que se obtiene un mayor costo si se consideraran los faltantes al final del ciclo en lugar que al inicio. Guchhait et al. [305], en cambio, combinan las características del PSO con las del algoritmo genético en una heurística híbrida PSGA (*Particle Swarm-Genetic Algorithm*) para demostrar que el desempeño de ésta es mejor en comparación al FGA (*Fuzzy Genetic Algorithm*) y el PSGA tradicional en un sistema de inventario en el que la demanda es sensible al precio de venta y los costos son conocidos o inciertos.

4.2.7. Modelos de inventarios con la inclusión de múltiples productos

Pese a que en la mayoría de los sistemas empresariales se manejan diferentes clases de productos, son muy pocos los estudios llevados a cabo en este contexto en comparación con los modelos que tienen en cuenta una misma clase de productos (*single ítem*). La razón se debe tal vez a la complejidad que supone la inclusión de dicho factor, ya que a diferencia de los modelos de inventarios con un solo tipo de producto, el espectro de solución asociado a los modelos de inventarios con múltiples productos se aumenta considerablemente y más aún cuando se tienen en cuenta otras implicaciones tales como la complementariedad y/o sustitución entre los productos.

Los modelos de inventarios con la incorporación de múltiples productos y periodos de faltantes se tienen en cuenta en [22, 23, 56, 74, 109, 154, 334, 364, 368, 369, 383, 402]. Los modelos de inventarios que determinan una política óptima de precio en un sistema con múltiples productos pueden consultarse en [18, 334, 364]. Los modelos de inventarios con múltiples productos y parámetros difusos se estudian en [18, 23, 74, 171]. De éstos, Gumasta et al. [369] y Frank et al [368] desarrollaron un modelo de inventario de revisión periódica y demanda incierta. El primero considerando una longitud de ciclo arbitrario pero fijo y el segundo teniendo en cuenta un sistema de producción en el que los productos son fabricados por

medio de un componente que se deteriora y otro que no. Maity & Maiti [309] y Shavandi et al. [334] presentan un modelo de inventario que tiene en cuenta la presencia de productos sustitutos y complementarios con una tasa de deterioro constante. Shavandi et al. [334] estudian una política de producción e inventario y de precios que permite maximizar el beneficio neto en un modelo en el que la demanda es sensible al precio de productos sustitutos, complementarios e independientes y en donde se permiten faltantes que se acumulan en función del tiempo de espera. Mientras que en [309] se consideran productos sustitutos y complementarios, pero la demanda es sensible al nivel del inventario y no se permiten faltantes. Finalmente, en artículos de investigación más recientes, Chew et al. [364] y Duan & Liao [56] consideran un sistema con demanda incierta y productos con fecha de caducidad conocida de múltiples periodos, y en donde se presenta sustitución entre productos de diferente edad. Duan & Liao [56] toman en cuenta la sustitución en una cadena de suministro con bancos de sangre humana; y Chew et al. [364] consideran la sustitución en un contexto en que la demanda de los productos de diferente edad depende tanto de su propio precio como del precio de productos sustitutos.

4.2.8. Modelos de inventarios que incluyen parámetros inciertos

En la mayoría de los modelos de inventario con demanda estocástica, el tiempo de entrega (*lead time*) es considerado como cero o insignificante [81, 361, 364-366, 368, 369, 371, 373, 378-380, 383, 386, 389, 390, 395, 398, 405, 407] o bien como una constante fija y positiva [56, 358, 360, 372, 374, 376-378, 380, 381, 384, 386, 387, 393, 399, 405]. Sin embargo, en la literatura también se encuentran modelos de inventario que consideran el tiempo de entrega como variable de decisión [107, 391], o como un parámetro incierto que sigue una distribución de probabilidad general o arbitraria [44, 388, 392, 400], o bien que sigue una distribución exponencial [397, 401, 402, 404]. Adicionalmente, aunque el estudio del tiempo de entrega usualmente se relaciona con modelos que estudian una demanda incierta, un modelo con demanda conocida y tiempo de entrega incierto se desarrolla en [123, 222], y un modelo de inventario en donde se determina el límite inferior y superior óptimo para el tiempo de entrega se estudia en [212].

En algunos modelos que consideran una demanda estocástica, el inventario es controlado explícitamente mediante un sistema de revisión periódica [56, 360, 361, 363, 364, 366-369, 372-374, 376, 378, 379, 386, 389, 393, 394, 398, 406], mientras que en otros es controlado mediante un sistema de revisión continua [358, 371, 374, 377, 380, 381, 384, 387, 388, 392, 395, 397, 400-402, 404, 405, 407]. La mayoría de modelos de inventario encontrados desde el año 2001 y que consideran un sistema de revisión continua han estudiado una política (s, S) que consiste en realizar un pedido de tamaño $S - s$ cada vez que el inventario llega al nivel s [371, 374, 380, 388, 395, 397, 400-402, 404, 405, 407], con la excepción de [358, 377, 381, 384, 387, 392]: una política $(S - 1, S)$ en la que se solicita una unidad de producto cada vez que el inventario cae en una unidad, ya sea por la demanda o bien por el efecto combinado de la demanda y el perecimiento de los productos se estudia en [387, 392] y [381] respectivamente; una política de control de inventario (Q, r) en la que un pedido de tamaño Q es solicitado cada vez la posición del inventario llega a r (o por debajo debido al perecimiento de los productos) puede encontrarse en [358, 377]; y una política (Q, r, T) en la que se ordena un pedido de tamaño Q cada vez que el inventario alcanza el nivel r , o bien cuando T unidades de tiempo transcurren, lo primero que ocurra primero, puede encontrarse en [384].

Por su parte, la mayoría de modelos de inventario que estudian un sistema de revisión periódica ha estudiado la determinación de políticas de control de inventario en la que se solicita una orden de pedido al inicio de cada periodo [361, 363, 364, 366, 368, 369, 373, 376, 378, 385, 398, 406], con la excepción de [56, 360, 366, 367, 374, 386, 389, 393, 394]: una política (R, S) en la que el nivel de inventario es observado en intervalos de tiempo R y las unidades de productos son ordenadas de tal manera que la posición de inventario alcance el nivel S se estudia en [374, 386, 389, 393, 394]; una política de control de inventario (s, S, q, Q) , la cual consiste en una política (s, S) , pero con tiempos de revisión de un día y órdenes de pedido restringidos entre $[q, Q]$ se introduce en [372]; y nuevas políticas de control de inventario basada en la edad de los productos, *Old Inventory Ratio* y *EWA*, se estudian en [56, 367] y [360] respectivamente.

Por otra parte, en el desarrollo de los modelos de inventario usualmente se asume que todos los parámetros del sistema son conocidos y/o fijos. No obstante, en algunas aplicaciones prácticas, la obtención de algunos de éstos (costos, demanda, tasa de producción, inflación, etc.) puede ser vaga e imprecisa o inclusive imposible de tener con exactitud. Al respecto, con la excepción de [18, 22, 308, 335], casi todos los artículos que consideran un modelo de inventario en ambientes difusos, incorporan un número difuso en lugar de una variable difusa [19-21, 23, 74, 85, 133, 144, 171, 210, 233, 245, 305, 314, 332, 375]. Téngase en cuenta que una variable difusa puede estudiarse como una variable difusa aleatoria, como una variable aleatoria difusa o como una variable híbrida. Una variable aleatoria difusa puede ser vista como una variable aleatoria cuyos valores son difusos en lugar de números reales, y una variable difusa aleatoria puede ser vista como una variable difusa que toma valores aleatorios. Para el lector interesado en afianzar estos y otros conceptos básicos sobre la teoría difusa (*Fuzzy theory*) se recomienda consultar los artículos en [413-415].

Kumar et al. [19] consideran como un número difuso tanto la demanda como la tasa de deterioro. Chen & Ouyang [133] y Soni & Patel [335] consideran simultáneamente el costo de mantener inventarios y los intereses pagados y ganados como difuso en un modelo donde se permite el retraso en el pago de los pedidos, pero [133] como números difusos y [335] como variables difusas. Taleizadeh et al. [22] consideran la demanda como una variable difusa en un sistema que sigue una política de compra con descuento y faltantes. Katagiri & Ishii [375] consideran el costo de faltante y el costo de salvamento de los productos deteriorados (*shortage and outdated cost*) como valores difusos. Roy et al. [314] estudian la inflación como un valor difuso en un modelo en donde el horizonte de planeación sigue una distribución de probabilidad exponencial con media conocida.

5. Conclusiones

En el presente artículo se ha mostrado la manera en que han sido abordadas las diferentes características que se presentan en los sistemas de inventarios con productos que se deterioran. Es notoria la cantidad de modelos desarrollados asumiendo una demanda determinista en lugar de una demanda incierta. No obstante, un análisis más detallado sobre modelos de inventarios que incluyen una demanda determinista revela que las estrategias habituales de los sistemas empresariales para influenciar la demanda escasamente han sido incluidas. Al respecto, entre

el año 2001 y 2013, de 331 artículos de investigación (ver sección 4.1), sólo 13 han tenido en cuenta que la demanda depende de otros factores diferentes al precio, del nivel de inventario y/o del tiempo con el fin de determinar tanto políticas óptimas de inventarios como políticas para la inversión en estrategias de mercadotecnia [42, 48, 108, 291, 312, 324, 326-328, 352, 354, 355, 357].

En cuanto al tipo de deterioro incluido en los diferentes modelos encontrados en la literatura, solo ocho contribuciones científicas [26-33] estudian políticas de inventario óptimas teniendo en cuenta la inversión en tecnologías de preservación para la reducción de la tasa de deterioro de los productos; sólo tres modelos de inventario [19, 144, 308] han considerado una tasa de deterioro difusa; y sólo cinco modelos de inventarios con demanda estocástica (incluyendo revisiones de artículos antes del año 2001) han sido encontrado considerando que la cantidad de un mismo tipo de producto perecedero no es uniforme respecto al tiempo.

Mientras que es claro que un sistema empresarial en donde se determine holísticamente políticas de inventario podría generar sinergias entre diferentes departamentos, muy pocos artículos han sido desarrollados para abordar decisiones de diferentes departamentos en conjunto con políticas óptimas de reaprovisionamiento. Al respecto, sólo se han encontrados modelos de inventario que consideran sinérgicamente decisiones sobre el precio de venta, frescura de los productos, y la formación de colas. Modelos de inventario con demanda incierta, y que abordan decisiones óptimas para el control de inventario y la fijación de precios de venta se estudian en [26, 44, 359, 361, 363, 364, 370, 378, 379, 398]. De modelos de inventario que consideran una demanda estocástica y sensible a la frescura de los productos [26, 44, 73, 369, 378, 382, 383], sólo Cai et al. [26] ha estudiado como variable de decisión los esfuerzos necesarios para prolongar la frescura de los productos. Finalmente, a pesar de que muchos autores han considerado modelos de inventario con demanda incierta y formación de colas, hasta donde sabemos, sólo pocos estudios [396, 397, 400, 401, 403, 404] han sido desarrollados para unificar dos áreas de investigación: formación de colas y políticas de control de inventario para productos que se deterioran.

Ahora bien, una revisión de características distintivas en los sistemas de inventario, diferentes al de la demanda y del deterioro, revela que varias de estas se encuentran muy bien representadas en la actual literatura, mientras que otras han sido muy poco estudiadas (ver sección 4.2). Sin embargo, aún hay oportunidades de investigación dentro de cada una de las características discutidas. Por ejemplo, aunque la inclusión de faltantes ha sido ampliamente abordada en modelos de inventario para productos perecederos, y se ha puesto considerable atención en estudios de sistemas con formación de colas, el supuesto de que los clientes durante los periodos de faltantes persisten en su requerimiento de una manera aleatoria introduce una alternativa natural para los modelos en donde los faltantes se consideran como ventas pérdidas o se satisfacen totalmente o parcialmente con la llegada de nuevos pedidos. Al respecto, basado en nuestro conocimiento, sólo los artículos en [401] y [404] han sido desarrollados para considerar esta característica en sistemas de inventario para productos perecederos.

De igual forma, un análisis cruzado de cada una de las anteriores características distintivas en los sistemas de inventario muestra también que son escasas las investigaciones que han tenido en cuenta las diferentes políticas de precios que podría adoptar una empresa en un sistema con más de un depósito para el almacenamiento de los productos y/o en donde se tenga en cuenta el valor del dinero del tiempo. Por otra parte, un análisis sobre la evolución de las características mencionadas en la sección 4.2 muestra que la cantidad de modelos de inventario desarrollados entre el año 2011 a 2013, y que estudian un sistema multinivel, superó en número a los desarrollados entre el año 2001 y 2010 (i.d. 20 artículos entre el año 2001-2010 y 41 entre 2011 y 2013). No obstante, los modelos de inventarios que integren varios eslabones de la cadena de suministro a través de un adecuado sistema de información y la inclusión de múltiples productos sustitutos y/o complementarios contribuirían aún más con el marco teórico y práctico de los sistemas de inventario sujeto a deterioro. De los pocos artículos donde se considera una política óptima de inventario para múltiples productos que son sustitutos y/o complementarios entre sí, sólo Duan & Liao [56] han tenido en cuenta un sistema multinivel con productos sustitutos. Por tanto, deberían llevarse a cabo investigaciones futuras para cubrir cada uno de los anteriores aspectos señalados en el presente artículo.

Referencias

- [1] Harris, F.W., How many parts to make at once. *Factory, The Magazine of Management Science*, 1913. 10(2): p. 135-136, 152.
- [2] Nahmias, S., Perishable Inventory Theory: A Review. *Operations Research*, 1982. 30(4): p. 680-708.
- [3] Goyal, S.K. and B.C. Giri, Recent trends in modeling of deteriorating inventory. *European Journal of Operational Research*, 2001. 134(1): p. 1-16.
- [4] Raafat, F., Survey of Literature on Continuously Deteriorating Inventory Models. *Journal of the Operational Research Society*, 1991. 42(1): p. 27-37.
- [5] Nahmias, S., *Perishable Inventory Systems*. International Series in Operations Research & Management Science. 2011: Springer US. 80.
- [6] Bakker, M., J. Riezebos, and R.H. Teunter, Review of inventory systems with deterioration since 2001. *European Journal of Operational Research*, 2012. 221(2): p. 275-284.
- [7] Amorim, P., et al., Managing perishability in production-distribution planning: a discussion and review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 2013. 25(3): p. 389-413.
- [8] Masters, J.M., A Note on the Effect of Sudden Obsolescence on the Optimal Lot Size. *Decision Sciences*, 1991. 22(5): p. 1180.
- [9] Song, Y. and H.C. Lau, A periodic-review inventory model with application to the continuous-review obsolescence problem. *European Journal of Operational Research*, 2004. 159(1): p. 110-120.
- [10] Hadley, G. and T.M. Whitin, *Analysis of Inventory Systems*. 1963, Englewood Cliffs, N.J.
- [11] David, I., E. Greenshtein, and A. Mehrez, A dynamic-programming approach to continuous-review obsolescent inventory problems. *Naval Research Logistics (NRL)*, 1997. 44(8): p. 757-774.
- [12] David, I. and A. Mehrez, An Inventory Model with Exogenous Failures. *Operations Research*, 1995. 43(5): p. 902-903.
- [13] Joglekar, P. and P. Lee, An exact formulation of inventory costs and optimal lot size in face of sudden obsolescence. *Operations Research Letters*, 1993. 14(5): p. 283-290.
- [14] Pahl, J. and S. Voß, Integrating deterioration and lifetime constraints in production and supply chain planning: A survey. *European Journal of Operational Research*, 2014(0).
- [15] Karaesmen, I., A. Scheller-Wolf, and B. Deniz, Managing Perishable and Aging Inventories: Review and Future Research Directions, in *Planning Production and Inventories in the Extended Enterprise*, K.G. Kempf, P. Keskinocak, and R. Uzsoy, Editors. 2011, Springer US. p. 393-436.
- [16] Liu, L. and Z. Lian, (s, S) Continuous Review Models for Products with Fixed Lifetimes. *Operations Research*, 1999. 47(1): p. 150-158.
- [17] Pentico, D.W. and M.J. Drake, A survey of deterministic models for the EOQ and EPQ with partial backordering. *European Journal of Operational Research*, 2011. 214(2): p. 179-198.
- [18] Chakraborty, N., S. Mondal, and M. Maiti, A deteriorating multi-item inventory model with price discount and variable demands via fuzzy logic under resource constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 2013. 66(4): p. 976-987.
- [19] Kumar, S.D., P.K. Kundu, and A. Goswami, An economic production quantity inventory model involving fuzzy demand rate and fuzzy deterioration rate. *Journal of Applied Mathematics and Computing*, 2003 12(1-2): p. 251-260.
- [20] Mahata, G.C. and A. Goswami, An EOQ model for deteriorating items under trade credit financing in the fuzzy sense. *Production Planning & Control*, 2007. 18(8): p. 681-692.
- [21] Mahata, G.C. and P. Mahata, Analysis of a fuzzy economic order quantity model for deteriorating items under retailer partial trade credit financing in a supply chain. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011. 53(9-10): p. 1621-1636.
- [22] Taleizadeh, A.A., H.-M. Wee, and F. Jolai, Revisiting a fuzzy rough economic order quantity model for deteriorating items considering quantity discount and prepayment. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013. 57(5-6): p. 1466-1479.
- [23] Wee, H.-M., C.-C. Lo, and P.-H. Hsu, A multi-objective joint replenishment inventory model of deteriorated items in a fuzzy environment. *European Journal of Operational Research*, 2009. 197(2): p. 620-631.
- [24] Sarkar, B., A production-inventory model with probabilistic deterioration in two-echelon supply chain management. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(5): p. 3138-3151.
- [25] Sarkar, M. and B. Sarkar, An economic manufacturing quantity model with probabilistic deterioration in a production system. *Economic Modelling*, 2013. 31: p. 245-252.
- [26] Cai, X., et al., Optimization and coordination of fresh product supply chains with freshness-keeping effort. *Production and Operations Management*, 2009. 19(3): p. 261-278.
- [27] Chen, Y.-R. and C.-Y. Dye, Application of particle swarm optimisation for solving deteriorating inventory model with fluctuating demand and controllable deterioration rate. *International Journal of Systems Science*, 2013. 44(6): p. 1026-1039.

- [28] Dye, C.-Y., The effect of preservation technology investment on a non-instantaneous deteriorating inventory model. *Omega*, 2013, 41(5): p. 872-880.
- [29] Dye, C.-Y. and T.-P. Hsieh, An optimal replenishment policy for deteriorating items with effective investment in preservation technology. *European Journal of Operational Research*, 2012, 218(1): p. 106-112.
- [30] Hsieh, T.-P. and C.-Y. Dye, A production-inventory model incorporating the effect of preservation technology investment when demand is fluctuating with time. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2013, 239: p. 25-36.
- [31] Hsu, P.H., H.M. Wee, and H.M. Teng, Preservation technology investment for deteriorating inventory. *International Journal of Production Economics*, 2010, 124(2): p. 388-394.
- [32] Lee, Y.-P. and C.-Y. Dye, An inventory model for deteriorating items under stock-dependent demand and controllable deterioration rate. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 63(2): p. 474-482.
- [33] Shah, N., D. Shah, and D. Patel, Optimal Preservation Technology Investment, Retail Price and Ordering Policies for Deteriorating Items under Trended Demand and Two Level Trade Credit Financing. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms in Operations Research*, 2014: p. 1-12.
- [34] Abad, P.L., Optimal pricing and lot-sizing under conditions of perishability, finite production and partial backordering and lost sale. *European Journal of Operational Research*, 2003, 144(0): p. 677-685.
- [35] Abdul, I. and A. Murata, A fast-response production-inventory model for deteriorating seasonal products with learning in set-ups. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011, 2(4): p. 715-736.
- [36] Abdul, I. and A. Murata, Optimal production strategy for deteriorating items with varying demand pattern under inflation. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011, 2(3): p. 449-466.
- [37] Alamri, A.A., Theory and methodology on the global optimal solution to a General Reverse Logistics Inventory Model for deteriorating items and time-varying rates. *Computers & Industrial Engineering*, 2011, 60(2): p. 236-247.
- [38] Alshamrani, A.M., Optimal control of a stochastic production-inventory model with deteriorating items. *Journal of King Saud University - Science*, 2012.
- [39] Balkhi, Z.T., On a finite horizon production lot size inventory model for deteriorating items: an optimal solution. *European Journal of Operational Research*, 2001, 132(4): p. 210-223.
- [40] Batan, M.A., A.A. Kamil, and H. Lateh, Inventory-Production Control Systems with Gumbel Distributed Deterioration. *AASRI Procedia*, 2012, 2: p. 93-105.
- [41] Bhowmick, J. and G.P. Samanta, A Deterministic Inventory Model of Deteriorating Items with Two Rates of Production, Shortages, and Variable Production Cycle. *ISRN Applied Mathematics*, 2011, 2011: p. 1-16.
- [42] Bhumia, A.K., et al., An application of tournament genetic algorithm in a marketing oriented economic production lot-size model for deteriorating items. *International Journal of Production Economics*, 2009, 119(1): p. 112-121.
- [43] Bukhari, F.A. and A. El-Gohary, Optimal control of a production-maintenance system with deteriorating items. *Journal of King Saud University - Science*, 2012, 24(4): p. 351-357.
- [44] Cai, X., et al., Fresh-product supply chain management with logistics outsourcing. *Omega*, 2013, 41(4): p. 752-765.
- [45] Chakraborty, T. and B.C. Giri, Joint determination of optimal safety stocks and production policy for an imperfect production system. *Applied Mathematical Modelling*, 2012, 36(2): p. 712-722.
- [46] Chen, J.-M. and L.-T. Chen, Pricing and production lot-size/scheduling with finite capacity for a deteriorating item over a finite horizon. *Computers & Operations Research*, 2005, 32(11): p. 2801-2819.
- [47] Chen, L.-T. and C.-C. Wei, Multi-period channel coordination in vendor-managed inventory for deteriorating goods. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(16): p. 4396-4413.
- [48] Chung, C.J. and H.M. Wee, An integrated production-inventory deteriorating model for pricing policy considering imperfect production, inspection planning and warranty-period-and stock-level-dependent demand. *International Journal of Systems Science*, 2008, 39(8): p. 823-837.
- [49] Chung, C.-J. and H.-M. Wee, Short life-cycle deteriorating product remanufacturing in a green supply chain inventory control system. *International Journal of Production Economics*, 2011, 129(1): p. 195-203.
- [50] Chung, C.-J., G.A. Widyadana, and H. Ming Wee, Economic production quantity model for deteriorating inventory with random machine unavailability and shortage. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(3): p. 883-902.
- [51] Chung, K.-J., L. Eduardo Cárdenas-Barrón, and P.-S. Ting, An inventory model with non-instantaneous receipt and exponentially deteriorating items for an integrated three layer supply chain system under two levels of trade credit. *International Journal of Production Economics*, (0).
- [52] Dalfard, V. and N. Nosrati, A new pricing constrained single-product inventory-production model in perishable food for maximizing the total profit. *Neural Computing and Applications*, 2012: p. 1-9.
- [53] Das, B.C., B. Das, and S.K. Mondal, Integrated supply chain model for a deteriorating item with procurement cost dependent credit period. *Computers & Industrial Engineering*, 2013, 64(3): p. 788-796.
- [54] Das, D., et al., Two-warehouse production model for deteriorating inventory items with stock-dependent demand under inflation over a random planning horizon. *Central European Journal of Operations Research*, 2012, 20(2): p. 251-280.
- [55] Das, D., et al., Two-warehouse production inventory model for a deteriorating item with time-varying demand and shortages: a genetic algorithm with varying population size approach. *Optimization and Engineering*, 2013: p. 1-19.
- [56] Duan, Q. and T.W. Liao, Optimization of blood supply chain with shortened shelf lives and ABO compatibility. *International Journal of Production Economics*, (0).
- [57] Feng, L., J. Zhang, and W. Tang, Optimal control of production and remanufacturing for a recovery system with perishable items. *International Journal of Production Research*, 2013, 51(13): p. 3977-3994.
- [58] Gaur, N.K., S. Kumar, and S.R. Singh, An Integrated Production-Inventory Model for Deteriorating Items under the effect of Inflation. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011, 3(3): p. 543-562.
- [59] Ghosh, S.K., S. Khanra, and K.S. Chaudhuri, Optimal price and lot size determination for a perishable product under conditions of finite production, partial backordering and lost sale. *Applied Mathematics and Computation*, 2011, 217(13): p. 6047-6053.
- [60] Giri, B.C. and A. A. Chakraborty, Supply chain coordination for a deteriorating product under stock-dependent consumption rate and unreliable production process. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011, 2(2): p. 263-272.
- [61] Giri, B.C. and T. Maiti, Supply chain model for a deteriorating product with time-varying demand and production rate. *Journal of the Operational Research Society*, 2011, 63(5): p. 665-673.
- [62] Guchhait, P., M. Kumar Maiti, and M. Maiti, Production-inventory models for a damageable item with variable demands and inventory costs in an imperfect production process. *International Journal of Production Economics*, 2013, 144(1): p. 180-188.
- [63] He, Y. and S. Wang, Analysis of production-inventory system for deteriorating items with demand disruption. *International Journal of Production Research*, 2012, 50(16): p. 4580-4592.
- [64] He, Y., S.-Y. Wang, and K.K. Lai, An optimal production-inventory model for deteriorating items with multiple-market demand. *European Journal of Operational Research*, 2010, 203(3): p. 593-600.
- [65] Konstantaras, I. and K. Skouri, A note on a production-inventory model under stock-dependent demand, Weibull distribution deterioration, and shortage. *International Transactions in Operational Research*, 2011, 18(4): p. 527-531.
- [66] Lee, C.C. and S.-L. Hsu, A two-warehouse production model for deteriorating inventory items with time-dependent demands. *European Journal of Operational Research*, 2009, 194(3): p. 700-710.

- [67] Lee, C.-F. and C.-P. Chung, An Inventory Model for Deteriorating Items in a Supply Chain with System Dynamics Analysis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2012. 40: p. 41-51.
- [68] Lee, S. and D. Kim, An optimal policy for a single-vendor single-buyer integrated production–distribution model with both deteriorating and defective items. *International Journal of Production Economics*, 2014. 147: p. 161-170.
- [69] Li, S., Optimal control of the production–inventory system with deteriorating items and tradable emission permits. *International Journal of Systems Science*, 2013: p. 1-12.
- [70] Li, S., Optimal control of production-maintenance system with deteriorating items, emission tax and pollution R&D investment. *International Journal of Production Research*, 2014. 52(6): p. 1787-1807.
- [71] Liao, J.-J., On an EPQ model for deteriorating items under permissible delay in payments. *Applied Mathematical Modelling*, 2007. 31(3): p. 393-403.
- [72] Lin, Y.S., J.C.P. Yu, and K.-J. Wang, An efficient replenishment model of deteriorating items for a supplier–buyer partnership in hi-tech industry. *Production Planning & Control*, 2009. 20(5): p. 431-444.
- [73] Lodree, E.J. and B.M. Uzochukwu, Production planning for a deteriorating item with stochastic demand and consumer choice. *International Journal of Production Economics*, 2008. 116(2): p. 219-232.
- [74] Mahapatra, N.K. and M. Maiti, Decision process for multiobjective, multi-item production-inventory system via interactive fuzzy satisficing technique. *Computers & Mathematics with Applications*, 2005. 49(5-6): p. 805-821.
- [75] Mahata, G.C., A Production Lot-Size Model for Perishable Items Under Two Level Trade Credit Policy for a Retailer with a Powerful Position in a Supply Chain System. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2011. 10(4): p. 323-340.
- [76] Mahata, G.C., An EPQ-based inventory model for exponentially deteriorating items under retailer partial trade credit policy in supply chain. *Expert Systems with Applications*, 2012. 39(3): p. 3537-3550.
- [77] Maity, A.K., et al., A Chebyshev approximation for solving the optimal production inventory problem of deteriorating multi-item. *Mathematical and Computer Modelling*, 2007. 45(1-2): p. 149-161.
- [78] Manna, S.K. and K.S. Chaudhuri, An economic order quantity model for deteriorating items with time-dependent deterioration rate, demand rate, unit production cost and shortages. *International Journal of Systems Science*, 2001 32(8): p. 1003–1009.
- [79] Manna, S.K. and K.S. Chaudhuri, An EOQ model with ramp type demand rate, time dependent deterioration rate, unit production cost and shortages. *European Journal of Operational Research*, 2006. 171(2): p. 557-566.
- [80] Min, J., et al., An EPQ model for deteriorating items with inventory-level-dependent demand and permissible delay in payments. *International Journal of Systems Science*, 2012. 43(6): p. 1039-1053.
- [81] Mirzazadeh, A., M.M. Seyyed Esfahani, and S.M.T. Fatemi Ghomi, An inventory model under uncertain inflationary conditions, finite production rate and inflation-dependent demand rate for deteriorating items with shortages. *International Journal of Systems Science*, 2009. 40(1): p. 21-31.
- [82] Nasr, W.W., M.K. Salameh, and L. Moussawi-Haidar, Integrating the economic production model with deteriorating raw material over multi-production cycles. *International Journal of Production Research*, 2014. 52(8): p. 2477-2489.
- [83] Rau, H., M.-Y. Wu, and H.M. Wee, Deteriorating item inventory model with shortage due to supplier in an integrated supply chain. *International Journal of Systems Science*, 2004. 35(5): p. 293-303.
- [84] Rau, H., M.-Y. Wu, and H.-M. Wee, Integrated inventory model for deteriorating items under a multi-echelon supply chain environment. *International Journal of Production Economics*, 2003. 86(2): p. 155-168.
- [85] Roy, A., S. Kar, and M. Maiti, A volume flexible production-policy for randomly deteriorating item with trended demand and shortages. *International Journal of Production Economics*, 2010. 128(1): p. 188-199.
- [86] Roy, A. and G.P. Samanta, Inventory model with two rates of production for deteriorating items with permissible delay in payments. *International Journal of Systems Science*, 2011. 42(8): p. 1375-1386.
- [87] Roy, T. and K.S. Chaudhuri, A production-inventory model under stock-dependent demand, Weibull distribution deterioration and shortage. *International Transactions in Operational Research*, 2009. 16(3): p. 325-346.
- [88] Sana, S., K.S. Chaudhuri, and B. Mahavidyalaya, On a volume flexible production policy for a deteriorating item with time-dependent demand and shortages. *Advanced Modeling & Optimization*, 2004. 6(1): p. 57-74.
- [89] Sana, S., S.K. Goyal, and K.S. Chaudhuri, A production–inventory model for a deteriorating item with trended demand and shortages. *European Journal of Operational Research*, 2004. 157(2): p. 357-371.
- [90] Shen, Z., M. Dessouky, and F. Ordenez, Perishable inventory management system with a minimum volume constraint. *The Journal of the Operational Research Society*, 2011. 62(12): p. 2063-2082.
- [91] Skouri, K. and S. Papachristos, Optimal stopping and restarting production times for an EOQ model with deteriorating items and time-dependent partial backlogging. *International Journal of Production Economics*, 2003. 81-82(0): p. 525–531.
- [92] Tadj, L., M. Bounkhel, and Y. Benhadid, Optimal control of a production inventory system with deteriorating items. *International Journal of Systems Science*, 2006. 37(15): p. 1111-1121.
- [93] Teng, J.-T. and C.-T. Chang, Economic production quantity models for deteriorating items with price- and stock-dependent demand. *Computers & Operations Research*, 2005. 32(2): p. 297-308.
- [94] Tsai, D.-M., An optimal production and shipment policy for a single-vendor single-buyer integrated system with both learning effect and deteriorating items. *International Journal of Production Research*, 2011. 49(3): p. 903-922.
- [95] Tyagi, V.K., S. Singh, and S.R. Singh, Probabilistic Inventory Model for Deteriorating Items with Non-Linear Production Rate Depending on Linear Demand Rate. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(3): p. 313-322.
- [96] Valliathal, M. and R. Uthayakumar, Simple approach of obtaining the optimal pricing and lot-sizing policies for an EPQ model on deteriorating items with shortages under inflation and time-discounting. *Istanbul University Journal Of The School Of Business Administration*, 2011. 40(2): p. 304-320.
- [97] Valliathal, M. and R. Uthayakumar, Designing and computing optimal policies on a production model for non-instantaneous deteriorating items with shortages. *International Journal of Production Research*, 2013. 51(1): p. 215-229.
- [98] Wang, K.-J. and Y.-S. Lin, Optimal inventory replenishment strategy for deteriorating items in a demand-declining market with the retailer's price manipulation. *Annals of Operations Research*, 2012. 201(1): p. 475-494.
- [99] Wang, K.-J., Y.S. Lin, and J.C.P. Yu, Optimizing inventory policy for products with time-sensitive deteriorating rates in a multi-echelon supply chain. *International Journal of Production Economics*, 2011. 130(1): p. 66-76.
- [100] Wang, S.P., W. Lee, and C.Y. Chang, Modeling the consignment inventory for a deteriorating item while the buyer has warehouse capacity constraint. *International Journal of Production Economics*, 2012. 138(2): p. 284-292.
- [101] Wang, T.-Y. and L.-H. Chen, A production lot size inventory model for deteriorating items with time-varying demand. *International Journal of Systems Science*, 2001. 32(6): p. 745-751.
- [102] Wee, H.M. and G.A. Widyadana, Economic production quantity models for deteriorating items with rework and stochastic preventive maintenance time. *International Journal of Production Research*, 2012. 50(11): p. 2940-2952.
- [103] Wee, H.M. and G.A. Widyadana, A production model for deteriorating items with stochastic preventive maintenance time and rework process with FIFO rule. *Omega*, 2013. 41(6): p. 941-954.

- [104] Widyadana, G.A. and H.M. Wee, Optimal deteriorating items production inventory models with random machine breakdown and stochastic repair time. *Applied Mathematical Modelling*, 2011. 35(7): p. 3495-3508.
- [105] Widyadana, G.A. and H.M. Wee, An economic production quantity model for deteriorating items with multiple production setups and rework. *International Journal of Production Economics*, 2012. 138(1): p. 62-67.
- [106] Wu, B. and B.R. Sarker, Optimal manufacturing and delivery schedules in a supply chain system of deteriorating items. *International Journal of Production Research*, 2013. 51(3): p. 798-812.
- [107] Xiao, T., et al., Ordering, wholesale pricing and lead-time decisions in a three-stage supply chain under demand uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 2010. 59(4): p. 840-852.
- [108] Xiao, T. and T. Xu, Coordinating price and service level decisions for a supply chain with deteriorating item under vendor managed inventory. *International Journal of Production Economics*, 2013.
- [109] Xu, Y. and B.R. Sarker, Models for a family of products with shelf life, and production and shortage costs in emerging markets. *Computers & Operations Research*, 2003. 30(6): p. 925-938.
- [110] Yan, C., A. Banerjee, and L. Yang, An integrated production-distribution model for a deteriorating inventory item. *International Journal of Production Economics*, 2011. 133(1): p. 228-232.
- [111] Yang, H.-L., A partial backlogging production-inventory lot-size model for deteriorating items with time-varying production and demand rate over a finite time horizon. *International Journal of Systems Science*, 2011. 42(8): p. 1397-1407.
- [112] Yang, P.C., et al., Collaboration for a closed-loop deteriorating inventory supply chain with multi-retailer and price-sensitive demand. *International Journal of Production Economics*, 2013. 143(2): p. 557-566.
- [113] Yang, P.C. and H.M. Wee, A single-vendor and multiple-buyers production inventory policy for a deteriorating item. *European Journal of Operational Research*, 2002. 143(3): p. 570-581.
- [114] Yang, P.-C. and H.-M. Wee, An integrated multi-lot-size production inventory model for deteriorating item. *Computers & Operations Research*, 2003. 30(5): p. 671-682.
- [115] Yu, J.C.P., Y.-S. Lin, and K.-J. Wang, Coordination-based inventory management for deteriorating items in a two-echelon supply chain with profit sharing. *International Journal of Systems Science*, 2013. 44(9): p. 1587-1601.
- [116] Yu, Y., Z. Wang, and L. Liang, A vendor managed inventory supply chain with deteriorating raw materials and products. *International Journal of Production Economics*, 2012. 136(2): p. 266-274.
- [117] Mishra, S., et al., Optimal control of an inventory system for weibull ameliorating, deteriorating items under the influence of inflation. *Bulletin of Pure & Applied Sciences-Mathematics*, 2011. 30E(1): p. 85-94.
- [118] Moon, I., B.C. Giri, and B. Ko, Economic order quantity models for ameliorating/deteriorating items under inflation and time discounting. *European Journal of Operational Research*, 2005. 162(3): p. 773-785.
- [119] Wee, H.-M., et al., An inventory model for ameliorating and deteriorating items taking account of time value of money and finite planning horizon. *International Journal of Systems Science*, 2008. 39(8): p. 801-807.
- [120] Coelho, L.C. and G. Laporte, Optimal joint replenishment, delivery and inventory management policies for perishable products. *Computers & Operations Research*, 2014. 47: p. 42-52.
- [121] Ferguson, M., V. Jayaraman, and G.C. Souza, Note: An application of the EOQ model with nonlinear holding cost to inventory management of perishables. *European Journal of Operational Research*, 2007. 180(1): p. 485-490.
- [122] Kishore, R.A., et al., N-Period Dynamic Deterministic Inventory Model for Perishable Goods. *IUP Journal of Operations Management*, 2011. 10(1): p. 7-17.
- [123] Sazvar, Z., A. Baboli, and M. Akbari Jokar, A replenishment policy for perishable products with non-linear holding cost under stochastic supply lead time. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013. 64(5-8): p. 1087-1098.
- [124] Zaroni, S. and L. Zavanella, Single-vendor single-buyer with integrated transport-inventory system: Models and heuristics in the case of perishable goods. *Computers & Industrial Engineering*, 2007. 52(1): p. 107-123.
- [125] Atici, F.M., A. Lebedinsky, and F. Uysal, Inventory model of deteriorating items on non-periodic discrete-time domains. *European Journal of Operational Research*, 2013. 230(2): p. 284-289.
- [126] Bhunia, A.K., et al., A two-warehouse inventory model for deteriorating items under permissible delay in payment with partial backlogging. *Applied Mathematics and Computation*, 2014. 232: p. 1125-1137.
- [127] Chang, C.-T., An EOQ model with deteriorating items under inflation when supplier credits linked to order quantity. *International Journal of Production Economics*, 2004. 88(3): p. 307-316.
- [128] Chang, C.-T., L.-Y. Ouyang, and J.-T. Teng, An EOQ model for deteriorating items under supplier credits linked to ordering quantity. *Applied Mathematical Modelling*, 2003. 27(12): p. 983-996.
- [129] Chang, C.-T., et al., Optimal ordering policies for deteriorating items using a discounted cash-flow analysis when a trade credit is linked to order quantity. *Computers & Industrial Engineering*, 2010. 59(4): p. 770-777.
- [130] Chang, C.-T., J.-T. Teng, and M.-S. Chern, Optimal manufacturer's replenishment policies for deteriorating items in a supply chain with up-stream and down-stream trade credits. *International Journal of Production Economics*, 2010. 127(1): p. 197-202.
- [131] Chang, H.-J. and W.-F. Lin, A Simple Solution Method for the Finite Horizon Eoq Model for Deteriorating Items with Cost Changes. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 2011. 28(06): p. 689-704.
- [132] Chang, H.-J., W.-F. Lin, and J.-F. Ho, Closed-form solutions for Wee's and Martin's EOQ models with a temporary price discount. *International Journal of Production Economics*, 2011. 131(2): p. 528-534.
- [133] Chen, L.-H. and L.-Y. Ouyang, Fuzzy inventory model for deteriorating items with permissible delay in payment. *Applied Mathematics and Computation*, 2006. 182(1): p. 711-726.
- [134] Chung, K.-J., A complete proof on the solution procedure for non-instantaneous deteriorating items with permissible delay in payment. *Computers & Industrial Engineering*, 2009. 56(1): p. 267-273.
- [135] Chung, K.-J., Using the convexities of total annual relevant costs to determine the optimal cycle times of inventory models for deteriorating items with permissible delay in payments. *Computers & Industrial Engineering*, 2010. 58(4): p. 801-808.
- [136] Chung, K.-J., Some improved algorithms to locate the optimal solutions for exponentially deteriorating items under trade credit financing in a supply chain system. *Computers & Mathematics with Applications*, 2011. 61(9): p. 2353-2361.
- [137] Chung, K.-J., S.-L. Chang, and W.-D. Yang, The Optimal Cycle Time for Exponentially Deteriorating Products under Trade Credit Financing. *The Engineering Economist*, 2001. 46(3): p. 232-242.
- [138] Chung, K.-J. and T.-S. Huang, The optimal retailer's ordering policies for deteriorating items with limited storage capacity under trade credit financing. *International Journal of Production Economics*, 2007. 106(1): p. 127-145.
- [139] Chung, K.-J. and J.-J. Liao, Lot-sizing decisions under trade credit depending on the ordering quantity. *Computers & Operations Research*, 2004. 31(6): p. 909-928.
- [140] Chung, K.-J. and C.-N. Lin, Optimal inventory replenishment models for deteriorating items taking account of time discounting. *Computers & Operations Research*, 2001. 28(1): p. 67-83.
- [141] Chung, K.-J. and S.-D. Lin, The inventory model for trade credit in economic ordering policies of deteriorating items in a supply chain system. *Applied Mathematical Modelling*, 2011. 35(6): p. 3111-3115.

- [142] Chung, K.-J., S.-D. Lin, and H.M. Srivastava, The complete solution procedures for the mathematical analysis of some families of optimal inventory models with order-size dependent trade credit and deterministic and constant demand. *Applied Mathematics and Computation*, 2012. 219(1): p. 142-157.
- [143] Chung, K.-J., S.-D. Lin, and H.M. Srivastava, The Inventory Models for Deteriorating Items in the Discounted Cash-Flows Approach Under Conditional Trade Credit and Cash Discount in a Supply Chain System. *Applied Mathematics & Information Sciences*, 2014. 8(5): p. 2103-2111.
- [144] De, S.K. and A. Goswami, An EOQ model with fuzzy inflation rate and fuzzy deterioration rate when a delay in payment is permissible. *International Journal of Systems Science*, 2006. 37(5): p. 323-335.
- [145] Hou, K.-L., An inventory model for deteriorating items with stock-dependent consumption rate and shortages under inflation and time discounting. *European Journal of Operational Research*, 2006. 168(2): p. 463-474.
- [146] Huang, K.-N. and J.-J. Liao, Bounds on the Optimum Order Quantity of the EOQ Model with Deteriorating Items under Supplier Credit Linked to Order Quantity. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2006 17(3): p. 105-116.
- [147] Huang, K.-N. and J.-J. Liao, A simple method to locate the optimal solution for exponentially deteriorating items under trade credit financing. *Computers & Mathematics with Applications*, 2008. 56(4): p. 965-977.
- [148] Jaggi, C.K., S.K. Goel, and M. Mittal, Economic order quantity model for deteriorating items with imperfect quality and permissible delay on payment. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011. 2(2): p. 237-248.
- [149] Jaggi, C.K. and M. Mittal, Economic order quantity model for deteriorating items with imperfect quality. *Investigación Operacional*, 2011. 32(2): p. 107-113.
- [150] Kawakatsu, H., A Wholesaler's Optimal Ordering and Quantity Discount Policies for Deteriorating Items. *Engineering Letters*, 2011. 19(4): p. 339-345.
- [151] Kawakatsu, H., An Optimal Quantity Discount Pricing Policy for Deteriorating Items. *Australian Journal of Basic & Applied Sciences*, 2011. 5(3): p. 11-19.
- [152] Kumar, A., K.K. Kaanodiya, and R.R. Pachauri, Retailer's inventory policy for deteriorating items under partial trade credit policy. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011: p. 699-714.
- [153] Lee, C.C., Two-warehouse inventory model with deterioration under FIFO dispatching policy. *European Journal of Operational Research*, 2006. 174(2): p. 861-873.
- [154] Li, J., T.C. Edwin Cheng, and S. Wang, Analysis of postponement strategy for perishable items by EOQ-based models. *International Journal of Production Economics*, 2007. 107(1): p. 31-38.
- [155] Liang, Y. and F. Zhou, A two-warehouse inventory model for deteriorating items under conditionally permissible delay in payment. *Applied Mathematical Modelling*, 2011. 35(5): p. 2221-2231.
- [156] Liao, J.-J., A note on an EOQ model for deteriorating items under supplier credit linked to ordering quantity. *Applied Mathematical Modelling*, 2007. 31(8): p. 1690-1699.
- [157] Liao, J.-J., An EOQ model with noninstantaneous receipt and exponentially deteriorating items under two-level trade credit. *International Journal of Production Economics*, 2008. 113(2): p. 852-861.
- [158] Liao, J.-J., K.-J. Chung, and K.-N. Huang, A deterministic inventory model for deteriorating items with two warehouses and trade credit in a supply chain system. *International Journal of Production Economics*, 2013. 146(2): p. 557-565.
- [159] Liao, J.-J., K.-N. Huang, and K.-J. Chung, Lot-sizing decisions for deteriorating items with two warehouses under an order-size-dependent trade credit. *International Journal of Production Economics*, 2012. 137(1): p. 102-115.
- [160] Liao, J.-J., K.-N. Huang, and Y.-F. Huang, A note on the optimal order and payment policies for deteriorating items in discount cash flows analysis under the alternatives of conditionally permissible delay in payments and cash discount. *Journal of Statistics and Management Systems*, 2012. 15(1): p. 21-27.
- [161] Liao, J.-J., K.-N. Huang, and P.-S. Ting, Optimal strategy of deteriorating items with capacity constraints under two-levels of trade credit policy. *Applied Mathematics and Computation*, 2014. 233: p. 647-658.
- [162] Lin, C. and Y. Lin, A cooperative inventory policy with deteriorating items for a two-echelon model. *European Journal of Operational Research*, 2007. 178(1): p. 92-111.
- [163] Lin, Y.-H., C. Lin, and B. Lin, On conflict and cooperation in a two-echelon inventory model for deteriorating items. *Computers & Industrial Engineering*, 2010. 59(4): p. 703-711.
- [164] Mishra, S.S. and P.P. Mishra, Price determination for an EOQ model for deteriorating items under perfect competition. *Computers & Mathematics with Applications*, 2008. 56(4): p. 1082-1101.
- [165] Niu, B. and J. Xie, A note on "Two-warehouse inventory model with deterioration under FIFO dispatch policy". *European Journal of Operational Research*, 2008. 190(2): p. 571-577.
- [166] Ouyang, L.Y., C.T. Chang, and J.T. Teng, An EOQ model for deteriorating items under trade credits. *Journal of the Operational Research Society*, 2005. 56(6): p. 719-726.
- [167] Ouyang, L.-Y., et al., An economic order quantity model for deteriorating items with partially permissible delay in payments linked to order quantity. *European Journal of Operational Research*, 2009. 194(2): p. 418-431.
- [168] Ouyang, L.-Y., K.-S. Wu, and C.-T. Yang, A study on an inventory model for non-instantaneous deteriorating items with permissible delay in payments. *Computers & Industrial Engineering*, 2006. 51(4): p. 637-651.
- [169] Pattnaik, M., An EOQ model for perishable items with constant demand and instant deterioration. *Decision (0304-0941)*, 2012. 39(1): p. 55-61.
- [170] Purohit, G.N. and H. Rathore, Multi-Item Inventory Control Model with Space Constraints for Perishable Items. *IUP Journal of Operations Management*, 2012. 11(1): p. 35-41.
- [171] Roy, A., S. Kar, and M. Maiti, A deteriorating multi-item inventory model with fuzzy costs and resources based on two different defuzzification techniques. *Applied Mathematical Modelling*, 2008. 32(2): p. 208-223.
- [172] Sazvar, Z., M.R. Akbari Jokar, and A. Baboli, A new order splitting model with stochastic lead times for deterioration items. *International Journal of Systems Science*, 2013: p. 1-19.
- [173] Song, X. and X. Cai, On optimal payment time for a retailer under permitted delay of payment by the wholesaler. *International Journal of Production Economics*, 2006. 103(1): p. 246-251.
- [174] Taleizadeh, A.A., An EOQ model with partial backordering and advance payments for an evaporating item. *International Journal of Production Economics*, (0).
- [175] Taleizadeh, A.A., An economic order quantity model for a deteriorating item in a purchasing system with multiple prepayments. *Applied Mathematical Modelling*, 2014.
- [176] Taleizadeh, A.A., et al., An EOQ model for perishable product with special sale and shortage. *International Journal of Production Economics*, 2013. 145(1): p. 318-338.
- [177] Taleizadeh, A.A. and M. Nematollahi, An inventory control problem for deteriorating items with back-ordering and financial considerations. *Applied Mathematical Modelling*, 2014. 38(1): p. 93-109.
- [178] Tat, R., A.A. Taleizadeh, and M. Esmaili, Developing economic order quantity model for non-instantaneous deteriorating items in vendor-managed inventory (VMI) system. *International Journal of Systems Science*, 2013: p. 1-12.
- [179] Thangam, A., Optimal price discounting and lot-sizing policies for perishable items in a supply chain under advance payment scheme and two-echelon trade credits. *International Journal of Production Economics*, 2012. 139(2): p. 459-472.
- [180] Uthayakumar, R. and P. Parvathi, A two-stage supply chain with order cost reduction and credit period incentives for deteriorating items. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011. 56(5-8): p. 799-807.
- [181] Wee, H.-M., et al., Optimal replenishment policy for a deteriorating green product: Life cycle costing analysis. *International Journal of Production Economics*, 2011. 133(2): p. 603-611.
- [182] Widyadana, G.A., L.E. Cárdenas-Barrón, and H.M. Wee, Economic order quantity model for deteriorating items with planned backorder level. *Mathematical and Computer Modelling*, 2011. 54(5-6): p. 1569-1575.

- [183] Yang, H.-L., Two-warehouse inventory models for deteriorating items with shortages under inflation. *European Journal of Operational Research*, 2004. 157(2): p. 344-356.
- [184] Yang, H.-L., Two-warehouse partial backlogging inventory models for deteriorating items under inflation. *International Journal of Production Economics*, 2006. 103(1): p. 362-370.
- [185] Yang, H.-L. and C.-T. Chang, A two-warehouse partial backlogging inventory model for deteriorating items with permissible delay in payment under inflation. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(5): p. 2717-2726.
- [186] Yang, H.-L., J.-T. Teng, and M.-S. Chern, Deterministic inventory lot-size models under inflation with shortages and deterioration for fluctuating demand. *Naval Research Logistics*, 2001. 48(2): p. 144-158.
- [187] Chauhan, S.S. and R. Kumari, Optimal Policy for Deteriorating Inventory with Permissible Delay in Payments Under Inflation. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(4): p. 615-636.
- [188] Chen, S.-C. and J.-T. Teng, Retailer's optimal ordering policy for deteriorating items with maximum lifetime under supplier's trade credit financing. *Applied Mathematical Modelling*, 2014.
- [189] Sanni, S.S. and W.I.E. Chukwu, An Economic order quantity model for Items with Three-parameter Weibull distribution Deterioration, Ramp-type Demand and Shortages. *Applied Mathematical Modelling*, 2013.
- [190] Sarkar, B. and S. Sarkar, An improved inventory model with partial backlogging, time varying deterioration and stock-dependent demand. *Economic Modelling*, 2013. 30: p. 924-932.
- [191] Sarkar, B. and S. Sarkar, Variable deterioration and demand—An inventory model. *Economic Modelling*, 2013. 31: p. 548-556.
- [192] Tripathy, C.K. and L.M. Pradhan, An EOQ model for three parameter Weibull deterioration with permissible delay in payments and associated salvage value. *international journal of industrial engineering computations*, 2012. 3(2): p. 115-122.
- [193] Yang, H.-L., Two-warehouse partial backlogging inventory models with three-parameter Weibull distribution deterioration under inflation. *International Journal of Production Economics*, 2012. 138(1): p. 107-116.
- [194] Avinadav, T., A. Herbon, and U. Spiegel, Optimal inventory policy for a perishable item with demand function sensitive to price and time. *International Journal of Production Economics*, 2013. 144(2): p. 497-506.
- [195] Agrawal, S., S. Banerjee, and S. Papachristos, Inventory model with deteriorating items, ramp-type demand and partially backlogged shortages for a two warehouse system. *Applied Mathematical Modelling*, 2013.
- [196] Ahmed, M.A., T.A. Al-Khamis, and L. Benkherouf, Inventory models with ramp type demand rate, partial backlogging and general deterioration rate. *Applied Mathematics and Computation*, 2013. 219(9): p. 4288-4307.
- [197] Ali, S.S., et al., Inventory management of perishable products: a time decay linked logistic approach. *International Journal of Production Research*, 2013. 51(13): p. 3864-3879.
- [198] Arcelus, F.J., N.H. Shah, and G. Srinivasan, Retailer's pricing, credit and inventory policies for deteriorating items in response to temporary price/credit incentives. *International Journal of Production Economics*, 2003. 81-82(0): p. 153-162.
- [199] Balkhi, Z.T. and L. Benkherouf, On an inventory model for deteriorating items with stock dependent and time-varying demand rates. *Computers & Operations Research*, 2004. 31(2): p. 223-240.
- [200] Balkhi, Z.T. and L. Tadj, A generalized economic order quantity model with deteriorating items and time varying demand, deterioration and costs. *International Transactions in Operational Research*, 2008. 15(4): p. 509-517.
- [201] Bhunia, A.K., A.A. Shaikh, and R.K. Gupta, A study on two-warehouse partially backlogged deteriorating inventory models under inflation via particle swarm optimisation. *International Journal of Systems Science*, 2013: p. 1-15.
- [202] Chang, H.-J., et al., Retailer's optimal pricing and lot-sizing policies for deteriorating items with partial backlogging. *European Journal of Operational Research*, 2006. 168(1): p. 51-64.
- [203] Cheng, M. and G. Wang, A note on the inventory model for deteriorating items with trapezoidal type demand rate. *Computers & Industrial Engineering*, 2009. 56(4): p. 1296-1300.
- [204] Cheng, M., B. Zhang, and G. Wang, Optimal policy for deteriorating items with trapezoidal type demand and partial backlogging. *Applied Mathematical Modelling*, 2011. 35(7): p. 3552-3560.
- [205] Chung, C.-J., H.-M. Wee, and Y.-L. Chen, Retailer's replenishment policy for deteriorating item in response to future cost increase and incentive-dependent sale. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013. 57(3-4): p. 536-550.
- [206] Chung, K.-J., The correct process of arguments of the solution procedure on the inventory model for deteriorating items with trapezoidal type demand rate in supply chain management. *Applied Mathematics Letters*, 2012. 25(11): p. 1901-1905.
- [207] Chung, K.-J. and J.-J. Liao, The optimal ordering policy in a DCF analysis for deteriorating items when trade credit depends on the order quantity. *International Journal of Production Economics*, 2006. 100(1): p. 116-130.
- [208] Chung, K.-J. and S.-F. Tsai, Inventory systems for deteriorating items with shortages and a linear trend in demand-taking account of time value. *Computers & Operations Research*, 2001. 28(9): p. 915-934.
- [209] Darzanou, G. and K. Skouri, An Inventory System for Deteriorating Products with Ramp-Type Demand Rate under Two-Level Trade Credit Financing. *Advances in Decision Sciences*, 2011. 2011: p. 1-15.
- [210] Das, K., T.K. Roy, and M. Maiti *, Buyer-seller fuzzy inventory model for a deteriorating item with discount. *International Journal of Systems Science*, 2004. 35(8): p. 457-466.
- [211] Deng, P.S., R.H.J. Lin, and P. Chu, A note on the inventory models for deteriorating items with ramp type demand rate. *European Journal of Operational Research*, 2007. 178(1): p. 112-120.
- [212] Dey, J.K., S.K. Mondal, and M. Maiti, Two storage inventory problem with dynamic demand and interval valued lead-time over finite time horizon under inflation and time-value of money. *European Journal of Operational Research*, 2008. 185(1): p. 170-194.
- [213] Dye, C.-Y. and H.-J. Chang, A replenishment policy for deteriorating items with linear trend demand and shortages when payment periods are offered. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2003. 14(2): p. 31-45.
- [214] Dye, C.-Y., H.-J. Chang, and J.-T. Teng, A deteriorating inventory model with time-varying demand and shortage-dependent partial backlogging. *European Journal of Operational Research*, 2006. 172(2): p. 417-429.
- [215] Dye, C.-Y., H.-J. Chang, and C.-H. Wu, Purchase-inventory decision models for deteriorating items with a temporary sale price. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2007. 18(1): p. 17-35.
- [216] Dye, C.-Y. and L.-Y. Ouyang, A particle swarm optimization for solving joint pricing and lot-sizing problem with fluctuating demand and trade credit financing. *Computers & Industrial Engineering*, 2011. 60(1): p. 127-137.
- [217] Dye, C.-Y., L.-Y. Ouyang, and T.-P. Hsieh, Deterministic inventory model for deteriorating items with capacity constraint and time-proportional backlogging rate. *European Journal of Operational Research*, 2007. 178(3): p. 789-807.
- [218] Ghosh, S.K. and K.S. Chaudhuri, An EOQ model with a quadratic demand, time-proportional deterioration and shortages in all cycles. *International Journal of Systems Science*, 2006. 37(10): p. 663-672.
- [219] Hsieh, T.-P., et al., Optimal lot size under trade credit financing when demand and deterioration are fluctuating with time. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2009. 20(2): p. 191-204.
- [220] Hsieh, T.-P., C.-Y. Dye, and L.-Y. Ouyang, Determining optimal lot size for a two-warehouse system with deterioration and shortages using net present value. *European Journal of Operational Research*, 2008. 191(1): p. 182-192.

- [221] Hsu, P.H. and H.M. Wee, Discounting decision for enterprises with high fixed cost and low variable cost. *International Transactions in Operational Research*, 2006 13(2): p. 111–124.
- [222] Hsu, P.-H., H.M. Wee, and H.-M. Teng, Optimal ordering decision for deteriorating items with expiration date and uncertain lead time. *Computers & Industrial Engineering*, 2007. 52(4): p. 448-458.
- [223] Hung, K.-C., An inventory model with generalized type demand, deterioration and backorder rates. *European Journal of Operational Research*, 2011. 208(3): p. 239-242.
- [224] Jaggi, C.K., K.K. Aggarwal, and S.K. Goel, Optimal order policy for deteriorating items with inflation induced demand. *International Journal of Production Economics*, 2006. 103(2): p. 707-714.
- [225] Jaggi, C.K., A. Khanna, and P. Verma, Two-warehouse partial backlogging inventory model for deteriorating items with linear trend in demand under inflationary conditions. *International Journal of Systems Science*, 2011. 42(7): p. 1185-1196.
- [226] Jain, D. and K.K. Aggarwal, The effect of inflation-induced demand and trade credit on ordering policy of exponentially deteriorating and imperfect quality items. *International Transactions in Operational Research*, 2012. 19(6): p. 863-889.
- [227] Khanra, S. and K.S. Chaudhuri, A note on an order-level inventory model for a deteriorating item with time-dependent quadratic demand. *Computers & Operations Research*, 2003. 30(12): p. 1901-1916.
- [228] Khanra, S., S.K. Ghosh, and K.S. Chaudhuri, An EOQ model for a deteriorating item with time dependent quadratic demand under permissible delay in payment. *Applied Mathematics and Computation*, 2011. 218(1): p. 1-9.
- [229] Liao, J.-J. and K.-N. Huang, Deterministic inventory model for deteriorating items with trade credit financing and capacity constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 2010. 59(4): p. 611-618.
- [230] Lin, S.-W., Inventory models with managerial policy independent of demand. *European Journal of Operational Research*, 2011. 211(3): p. 520-524.
- [231] Maihami, R. and I.N.K. Abadi, Joint control of inventory and its pricing for non-instantaneously deteriorating items under permissible delay in payments and partial backlogging. *Mathematical and Computer Modelling*, 2012. 55(5-6): p. 1722-1733.
- [232] Maihami, R. and I. Nakhai Kamalabadi, Joint pricing and inventory control for non-instantaneous deteriorating items with partial backlogging and time and price dependent demand. *International Journal of Production Economics*, 2012. 136(1): p. 116-122.
- [233] Maity, K. and M. Maiti Numerical approach of multi-objective optimal control problem in imprecise environment. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2005 4(4): p. 313–330.
- [234] Mandal, N.K., T.K. Roy, and M. Maiti, Inventory model of deteriorated items with a constraint: A geometric programming approach. *European Journal of Operational Research*, 2006. 173(1): p. 199-210.
- [235] Musa, A. and B. Sani, Inventory ordering policies of delayed deteriorating items under permissible delay in payments. *International Journal of Production Economics*, 2012. 136(1): p. 75-83.
- [236] Pal, M. and H.K. Maity, An Inventory Model for Deteriorating Items with Permissible Delay in Payment and Inflation Under Price Dependent Demand. *Pakistan Journal of Statistics & Operation Research*, 2012. 8(3): p. 583-592.
- [237] Panda, S., S. Saha, and M. Basu, Optimal pricing and lot-sizing for perishable inventory with price and time dependent ramp-type demand. *International Journal of Systems Science*, 2013. 44(1): p. 127-138.
- [238] Panda, S., S. Senapati, and M. Basu, Optimal replenishment policy for perishable seasonal products in a season with ramp-type time dependent demand. *Computers & Industrial Engineering*, 2008. 54(2): p. 301-314.
- [239] Sarkar, B., S. Saren, and H.-M. Wee, An inventory model with variable demand, component cost and selling price for deteriorating items. *Economic Modelling*, 2013. 30: p. 306-310.
- [240] Shah, N.H., Inventory model for deteriorating items and time value of money for a finite time horizon under the permissible delay in payments. *International Journal of Systems Science*, 2006. 37(1): p. 9-15.
- [241] Shah, N.H., A.S. Gor, and C. Jhaveri, An integrated inventory policy with deterioration for a single vendor and multiple buyers in supply chain when demand is quadratic. *Investigaciones Operacionales*, 2011. 32(2): p. 95-106.
- [242] Sicilia, J., et al., An inventory model for deteriorating items with shortages and time-varying demand. *International Journal of Production Economics*, (0).
- [243] Skouri, K. and I. Konstantaras, Order Level Inventory Models for Deteriorating Seasonable/Fashionable Products with Time Dependent Demand and Shortages. *Mathematical Problems in Engineering*, 2009. 2009: p. 1-25.
- [244] Skouri, K. and S. Papachristos, Four inventory models for deteriorating items with time varying demand and partial backlogging: A cost comparison. *Optimal Control Applications and Methods*, 2003. 24(6): p. 315-330.
- [245] Soni, H.N. and K.A. Patel, Joint pricing and replenishment policies for non-instantaneous deteriorating items with imprecise deterioration free time and credibility constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 2013. 66(4): p. 944-951.
- [246] Tan, Y. and M.X. Weng, A discrete-in-time deteriorating inventory model with time-varying demand, variable deterioration rate and waiting-time-dependent partial backlogging. *International Journal of Systems Science*, 2013. 44(8): p. 1483-1493.
- [247] Teng, J.T. and H.L. Yang, Deterministic economic order quantity models with partial backlogging when demand and cost are fluctuating with time. *Journal of the Operational Research Society*, 2004. 55(5): p. 495-503.
- [248] Teng, J.-T., et al., An optimal replenishment policy for deteriorating items with time-varying demand and partial backlogging. *Operations Research Letters*, 2002. 30(6): p. 387–393.
- [249] Teng, J.-T., L.-Y. Ouyang, and M.-C. Cheng, An EOQ model for deteriorating items with power-form stock-dependent demand. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2005 16(1): p. 1–16.
- [250] Tsao, Y.-C. and G.-J. Sheen, Dynamic pricing, promotion and replenishment policies for a deteriorating item under permissible delay in payments. *Computers & Operations Research*, 2008. 35(11): p. 3562-3580.
- [251] Valliathal, M. and R. Uthayakumar, Optimal pricing and replenishment policies of an EOQ model for non-instantaneous deteriorating items with shortages. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010. 54(1-4): p. 361-371.
- [252] Wang, S.-P., An inventory replenishment policy for deteriorating items with shortages and partial backlogging. *Computers & Operations Research*, 2002. 29(14): p. 2043–2051.
- [253] Wu, C. and Q. Zhao, Supplier–retailer inventory coordination with credit term for inventory-dependent and linear-trend demand. *International Transactions in Operational Research*, 2013: p. n/a-n/a.
- [254] Wu, K.-S., Discounted-cash-flow EOQ model for a deteriorating item. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2002 13(4): p. 55–67.
- [255] Wu, K.-S., L.-Y. Ouyang, and C.-T. Yang, An optimal replenishment policy for non-instantaneous deteriorating items with stock-dependent demand and partial backlogging. *International Journal of Production Economics*, 2006. 101(2): p. 369-384.
- [256] Wu, K.-S., L.-Y. Ouyang, and C.-T. Yang, Retailer's optimal ordering policy for deteriorating items with ramp-type demand under stock-dependent consumption rate. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2008. 19(2): p. 245–262.
- [257] Yang, C.-T., et al., An optimal replenishment policy for deteriorating items with stock-dependent demand and relaxed terminal conditions under limited storage space. *Central European Journal of Operations Research*, 2009. 19(1): p. 139-153.
- [258] Yang, H.-L., A comparison among various partial backlogging inventory lot-size models for deteriorating items on the basis of maximum profit. *International Journal of Production Economics*, 2005. 96(1): p. 119-128.

- [259] Yang, H.-L., A Partial Backlogging Inventory Model for Deteriorating Items with Fluctuating Selling Price and Purchasing Cost. *Advances in Operations Research*, 2012. 2012: p. 1-15.
- [260] Yang, H.-L., J.-T. Teng, and M.-S. Chern, An inventory model under inflation for deteriorating items with stock-dependent consumption rate and partial backlogging shortages. *International Journal of Production Economics*, 2010. 123(1): p. 8-19.
- [261] Bai, Q.-G., Y.-Z. Zhang, and G.-L. Dong, A note on an economic lot-sizing problem with perishable inventory and economies of scale costs: Approximation solutions and worst case analysis. *International Journal of Automation and Computing*, 2010. 7(1): p. 132-136.
- [262] Balkhi, Z.T., An optimal solution of a general lot size inventory model with deteriorated and imperfect products, taking into account inflation and time value of money. *International Journal of Systems Science*, 2004. 35(2): p. 87-96.
- [263] Balkhi, Z.T., Optimal economic ordering policy with deteriorating items under different supplier trade credits for finite horizon case. *International Journal of Production Economics*, 2011. 133(1): p. 216-223.
- [264] Banerjee, S. and S. Agrawal, A two-warehouse inventory model for items with three-parameter Weibull distribution deterioration, shortages and linear trend in demand. *International Transactions in Operational Research*, 2008 15(6): p. 755-775.
- [265] Chang, H.-J. and C.-Y. Dye, An inventory model for deteriorating items with partial backlogging and permissible delay in payments. *International Journal of Systems Science*, 2001. 32(3): p. 345-352.
- [266] Chang, H.-J., C.-H. Hung, and C.-Y. Dye, An inventory model for deteriorating items with linear trend demand under the condition of permissible delay in payments. *Production Planning & Control*, 2001. 12(3): p. 274-282.
- [267] Chang, H.-J., C.-H. Hung, and C.-Y. Dye, A finite time horizon inventory model with deterioration and time-value of money under the conditions of permissible delay in payments. *International Journal of Systems Science*, 2002. 33(2): p. 141-151.
- [268] Chaudhary, R., S.R. Singh, and A. Chauhan, An inventory model with time dependent demand and deterioration under partial backlogging. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(1): p. 55-62.
- [269] Chen, J.-M. and C.-S. Lin, An optimal replenishment model for inventory items with normally distributed deterioration. *Production Planning & Control*, 2002. 13(5): p. 470-480.
- [270] Chern, M.-S., et al., Partial backlogging inventory lot-size models for deteriorating items with fluctuating demand under inflation. *European Journal of Operational Research*, 2008. 191(1): p. 127-141.
- [271] Deng, P.S., Improved inventory models with ramp type demand and weibull deterioration. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2005 16(4): p. 79-86.
- [272] Dye, C.-Y., A note on an EOQ model for items with weibull distributed deterioration, shortages and power demand pattern. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2004 15(2): p. 81-84.
- [273] Giri, B.C., A.K. Jalan, and K.S. Chaudhuri Economic order quantity model with Weibull deterioration distribution, shortage and ramp-type demand. *International Journal of Systems Science*, 2003 34(4): p. 237-243.
- [274] Goyal, S.K. and B.C. Giri, The production-inventory problem of a product with time varying demand, production and deterioration rates. *European Journal of Operational Research*, 2003. 147(3): p. 549-557.
- [275] Jung, S.-T., J.S.-J. Lin, and J.P.C. Chuang, A note on an EOQ model for items with weibull distributed deterioration, shortages and power demand pattern. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2008 19(4): p. 667-672.
- [276] Kaushal, P., A.P. Singh, and D. Singh, An Inventory Model with Shortages, with Time Dependent Deterioration and the Demand Rate as Stock Dependent Over a Finite Planning Horizon. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(4): p. 727-742.
- [277] Kumar Sett, B., B. Sarkar, and A. Goswami, A two-warehouse inventory model with increasing demand and time varying deterioration. *Scientia Iranica*, 2012. 19(6): p. 1969-1977.
- [278] Lee, W.-C. and J.-W. Wu, An EOQ model for items with Weibull distributed deterioration, shortages and power demand pattern.pdf. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2002. 13(2): p. 19-34.
- [279] Lin, K.-P., An extended inventory models with trapezoidal type demands. *Applied Mathematics and Computation*, 2013. 219(24): p. 11414-11419.
- [280] Mishra, U. and C.K. Tripathy, An EOQ model for time dependent Weibull deterioration with linear demand and shortages. *LogForum*, 2012. 8(2): p. 123-136.
- [281] Mishra, V., L. Singh, and R. Kumar, An inventory model for deteriorating items with time-dependent demand and time-varying holding cost under partial backlogging. *Journal of Industrial Engineering International*, 2013. 9(1): p. 1-5.
- [282] Pradhan, L.M. and C.K. Tripathy, An EOQ model for Weibull deteriorating item with ramp type demand and salvage value under trade credit system. *LogForum*, 2014. 10(1): p. 61-72.
- [283] Sarkar, B., An EOQ model with delay in payments and time varying deterioration rate. *Mathematical and Computer Modelling*, 2012. 55(3-4): p. 367-377.
- [284] Sarkar, T., S.K. Ghosh, and K.S. Chaudhuri, An optimal inventory replenishment policy for a deteriorating item with time-quadratic demand and time-dependent partial backlogging with shortages in all cycles. *Applied Mathematics and Computation*, 2012. 218(18): p. 9147-9155.
- [285] Sharma, S., An Inventory Model for Deteriorating Products with Inflation, Lost Sales and Stock and Time Dependent Demand. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(4): p. 695-708.
- [286] Singh, J., B.B. Singh, and S.R. Singh, Optimal Inventory Replenishment Model for Deteriorating Items Taking Account of Time Discounting. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(4): p. 791-812.
- [287] Singh, T., S.K. Sahu, and A.K. Nayak, An EOQ Model for a Deteriorating Item with Time Dependent Quadratic Demand and Weibull Distribution Deterioration under Permissible Delay in Payment. *Advances in Theoretical & Applied Mathematics*, 2012. 7(3): p. 295-307.
- [288] Skouri, K., et al., Inventory models with ramp type demand rate, time dependent deterioration rate, unit production cost and shortages. *Annals of Operations Research*, 2011. 191(1): p. 73-95.
- [289] Skouri, K., et al., Inventory models with ramp type demand rate, partial backlogging and Weibull deterioration rate. *European Journal of Operational Research*, 2009. 192(1): p. 79-92.
- [290] Tripathy, C.K. and U. Mishra, An EOQ model with time dependent Weibull deterioration and ramp type demand. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011. 2(2): p. 307-318.
- [291] Wang, X. and D. Li, A dynamic product quality evaluation based pricing model for perishable food supply chains. *Omega*, 2012. 40(6): p. 906-917.
- [292] Wu, K.-S., An EOQ inventory model for items with Weibull distribution deterioration, ramp type demand rate and partial backlogging. *Production Planning & Control*, 2001. 12(8): p. 787-793.
- [293] Wu, K.-S., EOQ inventory model for items with Weibull distribution deterioration, time-varying demand and partial backlogging. *International Journal of Systems Science*, 2002. 33(5): p. 323-329.
- [294] Yang, G.K., et al., Note on inventory models with Weibull distribution deterioration. *Production Planning & Control*, 2011. 22(4): p. 437-444.
- [295] Zhou, Y.W. and S.L. Yang, An optimal replenishment policy for items with inventory-level-dependent demand and fixed lifetime under the LIFO policy. *Journal of the Operational Research Society*, 2003. 54(6): p. 585-593.
- [296] Bhattacharya, D.K., On multi-item inventory. *European Journal of Operational Research*, 2005. 162(3): p. 786-791.
- [297] Chang, C.-T., J.-T. Teng, and S.K. Goyal, Optimal replenishment policies for non-instantaneous deteriorating items with stock-dependent demand. *International Journal of Production Economics*, 2010. 123(1): p. 62-68.
- [298] Chu, P. and P.S. Chen, A note on inventory replenishment policies for deteriorating items in an exponentially declining market. *Computers & Operations Research*, 2002 29(13): p. 1827-1842.

- [299] Chung, K.-J. and L.E. Cárdenas-Barrón, The simplified solution procedure for deteriorating items under stock-dependent demand and two-level trade credit in the supply chain management. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(7): p. 4653-4660.
- [300] Disney, S.M. and R.D.H. Warburton, On the Lambert W function: Economic Order Quantity applications and pedagogical considerations. *International Journal of Production Economics*, 2012. 140(2): p. 756-764.
- [301] Duan, Y., et al., Inventory models for perishable items with inventory level dependent demand rate. *Applied Mathematical Modelling*, 2012. 36(10): p. 5015-5028.
- [302] Dye, C.-Y. and T.-P. Hsieh, Deterministic ordering policy with price- and stock-dependent demand under fluctuating cost and limited capacity. *Expert Systems with Applications*, 2011. 38(12): p. 14976-14983.
- [303] Dye, C.-Y. and L.-Y. Ouyang, An EOQ model for perishable items under stock-dependent selling rate and time-dependent partial backlogging. *European Journal of Operational Research*, 2005. 163(3): p. 776-783.
- [304] Ghiami, Y., T. Williams, and Y. Wu, A two-echelon inventory model for a deteriorating item with stock-dependent demand, partial backlogging and capacity constraints. *European Journal of Operational Research*, 2013. 231(3): p. 587-597.
- [305] Guchhait, P., M.K. Maiti, and M. Maiti, Two storage inventory model of a deteriorating item with variable demand under partial credit period. *Applied Soft Computing*, 2013. 13(1): p. 428-448.
- [306] Hou, K.L. and L.C. Lin, An EOQ model for deteriorating items with price- and stock-dependent selling rates under inflation and time value of money. *International Journal of Systems Science*, 2006. 37(15): p. 1131-1139.
- [307] Hsieh, T.-P. and C.-Y. Dye, Optimal replenishment policy for perishable items with stock-dependent selling rate and capacity constraint. *Computers & Industrial Engineering*, 2010. 59(2): p. 251-258.
- [308] Jana, D.K., B. Das, and M. Maiti, Multi-item partial backlogging inventory models over random planning horizon in random fuzzy environment. *Applied Soft Computing*, 2014. 21: p. 12-27.
- [309] Maity, K. and M. Maiti, Optimal inventory policies for deteriorating complementary and substitute items. *International Journal of Systems Science*, 2009. 40(3): p. 267-276.
- [310] Min, J. and Y.-W. Zhou, A perishable inventory model under stock-dependent selling rate and shortage-dependent partial backlogging with capacity constraint. *International Journal of Systems Science*, 2009. 40(1): p. 33-44.
- [311] Ouyang, L.-Y., et al., An Inventory Model for Deteriorating Items with Stock-Dependent Demand under the Conditions of Inflation and Time-Value of Money. *The Engineering Economist*, 2003. 48(1): p. 52-68.
- [312] Pal, A.K., A.K. Bhunia, and R.N. Mukherjee, Optimal lot size model for deteriorating items with demand rate dependent on displayed stock level (DSL) and partial backordering. *European Journal of Operational Research*, 2006. 175(2): p. 977-991.
- [313] Panda, S., S. Saha, and M. Basu, An EOQ model for perishable products with discounted selling price and stock dependent demand. *Central European Journal of Operations Research*, 2009. 17(1): p. 31-53.
- [314] Roy, A., et al., An inventory model for a deteriorating item with displayed stock dependent demand under fuzzy inflation and time discounting over a random planning horizon. *Applied Mathematical Modelling*, 2009. 33(2): p. 744-759.
- [315] Singh, M. and P. Sharma, An Inventory Model for Deteriorating Items With Two-Level Storage Under Inflation. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(4): p. 683-694.
- [316] Singh, S.R. and A.K. Malik, Two Warehouses Inventory Model for Non-Instantaneous Deteriorating Items With Stock-Dependent Demand. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(4): p. 911-920.
- [317] Skouri, K., et al., Supply chain models for deteriorating products with ramp type demand rate under permissible delay in payments. *Expert Systems with Applications*, 2011. 38(12): p. 14861-14869.
- [318] Soni, H.N., Optimal replenishment policies for deteriorating items with stock sensitive demand under two-level trade credit and limited capacity. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(8): p. 5887-5895.
- [319] Soni, H.N., Optimal replenishment policies for non-instantaneous deteriorating items with price and stock sensitive demand under permissible delay in payment. *International Journal of Production Economics*, 2013. 146(1): p. 259-268.
- [320] Teng, J.-T., et al., A comprehensive extension of optimal ordering policy for stock-dependent demand under progressive payment scheme. *European Journal of Operational Research*, 2011. 215(1): p. 97-104.
- [321] Tripathy, P.K., M. Pattnaik, and P. Tripathy, The finite horizon trended continuous inventory replenishment and pricing problems for deteriorating items with stock and price sensitive demand. *Investigaciones Operacionales*, 2012. 33(1): p. 1-12.
- [322] Urban, T.L., An extension of inventory models incorporating financing agreements with both suppliers and customers. *Applied Mathematical Modelling*, 2012. 36(12): p. 6323-6330.
- [323] Uthayakumar, R. and M. Rameswari, Economic order quantity for deteriorating items with time discounting. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2011. 58(5-8): p. 817-840.
- [324] Bhunia, A.K. and A.A. Shaikh, A deterministic model for deteriorating items with displayed inventory level dependent demand rate incorporating marketing decisions with transportation cost. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2011. 2(3): p. 547-562.
- [325] Vaish, B. and G. Garg, Optimal Price Discount Policy for Non-instantaneous Deteriorating Items with Stock-dependent and Time Decreasing Demand. *Journal of Mathematics Research*, 2011. 3(3).
- [326] Herbon, A., Dynamic pricing vs. acquiring information on consumers' heterogeneous sensitivity to product freshness. *International Journal of Production Research*, 2014. 52(3): p. 918-933.
- [327] Herbon, A., E. Levner, and T.C.E. Cheng, Perishable inventory management with dynamic pricing using time-temperature indicators linked to automatic detecting devices. *International Journal of Production Economics*, 2014. 147: p. 605-613.
- [328] Annadurai, K. and R. Uthayakumar, Two-echelon inventory model for deteriorating items with credit period dependent demand including shortages under trade credit. *Optimization Letters*, 2013. 7(6): p. 1227-1249.
- [329] Cai, X., et al., Optimal pricing policy for a deteriorating product by dynamic tracking control. *International Journal of Production Research*, 2013. 51(8): p. 2491-2504.
- [330] Dye, C.-Y. and T.-P. Hsieh, Joint pricing and ordering policy for an advance booking system with partial order cancellations. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(6): p. 3645-3659.
- [331] Neetu and A.K. Tomer, Deteriorating inventory model with linear demand, quantity discount, constant deterioration and partial backordering. *International Transactions in Applied Sciences*, 2011. 3(1): p. 141-148.
- [332] Rong, M., N.K. Mahapatra, and M. Maiti, A two warehouse inventory model for a deteriorating item with partially/fully backlogged shortage and fuzzy lead time. *European Journal of Operational Research*, 2008. 189(1): p. 59-75.
- [333] Sankar Sana, S., Price-sensitive demand for perishable items – an EOQ model. *Applied Mathematics and Computation*, 2011. 217(13): p. 6248-6259.
- [334] Shavandi, H., H. Mahlooji, and N.E. Nosrati, A constrained multi-product pricing and inventory control problem. *Applied Soft Computing*, 2012. 12(8): p. 2454-2461.
- [335] Soni, H.N. and K.A. Patel, Optimal pricing and inventory policies for non-instantaneous deteriorating items with permissible delay in payment: Fuzzy expected value model. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2012. 3(3): p. 281-300.
- [336] Teng, J.-T., C.-T. Chang, and S.K. Goyal, Optimal pricing and ordering policy under permissible delay in payments. *International Journal of Production Economics*, 2005. 97(2): p. 121-129.

- [337] Teng, J.-T., L.-Y. Ouyang, and L.-H. Chen, A comparison between two pricing and lot-sizing models with partial backlogging and deteriorated items. *International Journal of Production Economics*, 2007. 105(1): p. 190-203.
- [338] Tsao, Y.-C. and G.-J. Sheen, Joint pricing and replenishment decisions for deteriorating items with lot-size and time-dependent purchasing cost under credit period. *International Journal of Systems Science*, 2007. 38(7): p. 549-561.
- [339] Wu, K.-S., L.-Y. Ouyang, and C.-T. Yang, Coordinating replenishment and pricing policies for non-instantaneous deteriorating items with price-sensitive demand. *International Journal of Systems Science*, 2009. 40(12): p. 1273-1281.
- [340] Yu, J.C.P., A collaborative strategy for deteriorating inventory system with imperfect items and supplier credits. *International Journal of Production Economics*, 2013. 143(2): p. 403-409.
- [341] Abad, P.L., Optimal price and order size for a reseller under partial backordering. *Computers & Operations Research*, 2001. 28(1): p. 53-65.
- [342] Begum, R., R.R. Sahoo, and S.K. Sahu, A replenishment policy for items with price-dependent demand, time-proportional deterioration and no shortages. *International Journal of Systems Science*, 2012. 43(5): p. 903-910.
- [343] Dye, C.-Y., Joint pricing and ordering policy for a deteriorating inventory with partial backlogging. *Omega*, 2007. 35(2): p. 184-189.
- [344] Dye, C.-Y., A finite horizon deteriorating inventory model with two-phase pricing and time-varying demand and cost under trade credit financing using particle swarm optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 2012. 5: p. 37-53.
- [345] Dye, C.-Y., T.-P. Hsieh, and L.-Y. Ouyang, Determining optimal selling price and lot size with a varying rate of deterioration and exponential partial backlogging. *European Journal of Operational Research*, 2007. 181(2): p. 668-678.
- [346] Dye, C.-Y., L.-Y. Ouyang, and T.-P. Hsieh, Inventory and pricing strategies for deteriorating items with shortages: A discounted cash flow approach. *Computers & Industrial Engineering*, 2007. 52(1): p. 29-40.
- [347] Kar, S., A.K. Bhunia, and M. Maiti, Inventory of multi-deteriorating items sold from two shops under single management with constraints on space and investment. *Computers & Operations Research*, 2001. 28(12): p. 1203-1221.
- [348] Mukhopadhyay, S., R.N. Mukherjee, and K.S. Chaudhuri, An EOQ model with two-parameter Weibull distribution deterioration and price-dependent demand. *International Journal of Mathematical Education in Science and Technology*, 2005. 36(1): p. 25-33.
- [349] Mukhopadhyay, S., R.N. Mukherjee, and K.S. Chaudhuri, Joint pricing and ordering policy for a deteriorating inventory. *Computers & Industrial Engineering*, 2004. 47(4): p. 339-349.
- [350] Neetu and A.K. Tomer, A Deteriorating Inventory Model Under Variable Inflation When Supplier Credits Linked to Order Quantity. *Procedia Engineering*, 2012. 38: p. 1241-1263.
- [351] Papachristos, S. and K. Skouri, An inventory model with deteriorating items, quantity discount, pricing and time-dependent partial backlogging. *International Journal of Production Economics*, 2003. 83(3): p. 247-256.
- [352] Qin, Y., J. Wang, and C. Wei, Joint pricing and inventory control for fresh produce and foods with quality and physical quantity deteriorating simultaneously. *International Journal of Production Economics*, (0).
- [353] Shah, N.H., H.N. Soni, and J. Gupta, A note on 'a replenishment policy for items with price-dependent demand, time-proportional deterioration and no shortages'. *International Journal of Systems Science*, 2012: p. 1-5.
- [354] Shah, N.H., H.N. Soni, and K.A. Patel, Optimizing inventory and marketing policy for non-instantaneous deteriorating items with generalized type deterioration and holding cost rates. *Omega*, 2013. 41(2): p. 421-430.
- [355] Wang, W.-C., J.-T. Teng, and K.-R. Lou, Seller's optimal credit period and cycle time in a supply chain for deteriorating items with maximum lifetime. *European Journal of Operational Research*, 2014. 232(2): p. 315-321.
- [356] Wee, H.-M. and S.-T. Law, Replenishment and pricing policy for deteriorating items taking into account the time-value of money. *International Journal of Production Economics*, 2001. 71(1-3): p. 213-220.
- [357] Wu, J., et al., Optimal credit period and lot size for deteriorating items with expiration dates under two-level trade credit financing. *European Journal of Operational Research*, 2014(0).
- [358] Berk, E. and U. Gurler, Analysis of the (Q, r) Inventory Model for Perishables with Positive Lead Times and Lost Sales. *Operations Research*, 2008. 56(5): p. 1238-1246.
- [359] Berk, E., Ü. Gürler, and G. Yıldırım, On pricing of perishable assets with menu costs. *International Journal of Production Economics*, 2009. 121(2): p. 678-699.
- [360] Broekmeulen, R.A.C.M. and K.H. van Donselaar, A heuristic to manage perishable inventory with batch ordering, positive lead-times, and time-varying demand. *Computers & Operations Research*, 2009. 36(11): p. 3013-3018.
- [361] Chande, A., et al., Perishable inventory management and dynamic pricing using RFID technology. *Sadhana*, 2005 30(2-3): p. 445-462.
- [362] Cheong, T., Joint inventory and transshipment control for perishable products of a two-period lifetime. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012. 66(9-12): p. 1327-1341.
- [363] Chew, E.P., C. Lee, and R. Liu, Joint inventory allocation and pricing decisions for perishable products. *International Journal of Production Economics*, 2009. 120(1): p. 139-150.
- [364] Chew, E.P., et al., Optimal dynamic pricing and ordering decisions for perishable products. *International Journal of Production Economics*, (0).
- [365] Chun, Y.H., Optimal pricing and ordering policies for perishable commodities. *European Journal of Operational Research*, 2003 144(1): p. 68-82.
- [366] Cooper, W.L., Pathwise properties and performance bounds for a perishable inventory system. *Operations Research*, 2001 49(3): p. 455-466.
- [367] Duan, Q. and T.W. Liao, A new age-based replenishment policy for supply chain inventory optimization of highly perishable products. *International Journal of Production Economics*, 2013. 145(2): p. 658-671.
- [368] Frank, K.C., H.-S. Ahn, and R.Q. Zhang, Inventory policies for a make-to-order system with a perishable component and fixed ordering cost. *Naval Research Logistics*, 2009. 56(2): p. 127-141.
- [369] Gumasta, K., F.T.S. Chan, and M.K. Tiwari, An incorporated inventory transport system with two types of customers for multiple perishable goods. *International Journal of Production Economics*, 2012. 139(2): p. 678-686.
- [370] Guo, P., Z. Lian, and Y. Wang, Pricing Perishable Products with Compound Poisson Demands. *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, 2011. 25(03): p. 289-306.
- [371] Gürler, Ü. and B.Y. Özkaya, A note on continuous review perishable inventory systems: models and heuristics. *IIE Transactions*, 2003. 35(3): p. 321-323.
- [372] Hajjema, R., A new class of stock-level dependent ordering policies for perishables with a short maximum shelf life. *International Journal of Production Economics*, 2013. 143(2): p. 434-439.
- [373] Jia, J. and Q. Hu, Dynamic ordering and pricing for a perishable goods supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 2011. 60(2): p. 302-309.
- [374] Kanchanasuntorn, K. and A. Techanitisawad, An approximate periodic model for fixed-life perishable products in a two-echelon inventory-distribution system. *International Journal of Production Economics*, 2006. 100(1): p. 101-115.
- [375] Katagiri, H. and H. Ishii, Fuzzy inventory problems for perishable commodities. *European Journal of Operational Research*, 2002 138(3): p. 545-553.
- [376] Ketzenberg, M. and M.E. Ferguson, Managing Slow-Moving Perishables in the Grocery Industry. *Production and Operations Management*, 2008. 17(5): p. 513-521.
- [377] Kouki, C., et al., Assessing the impact of perishability and the use of time temperature technologies on inventory management. *International Journal of Production Economics*, 2013. 143(1): p. 72-85.
- [378] Li, Y., B. Cheang, and A. Lim, Grocery Perishables Management. *Production and Operations Management*, 2012. 21(3): p. 504-517.
- [379] Li, Y., A. Lim, and B. Rodrigues, Note—Pricing and Inventory Control for a Perishable Product. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2008. 11(3): p. 538-542.

- [380] Lian, Z. and L. Liu, Continuous review perishable inventory systems: models and heuristics. *IIE Transactions*, 2001. 33(9): p. 809-822.
- [381] Olsson, F. and P. Tydesjö, Inventory problems with perishable items: Fixed lifetimes and backlogging. *European Journal of Operational Research*, 2010. 202(1): p. 131-137.
- [382] Piramuthu, S. and W. Zhou, RFID and perishable inventory management with shelf-space and freshness dependent demand. *International Journal of Production Economics*, 2013. 144(2): p. 635-640.
- [383] Seyedhosseini, S.-M., B. Elahi, and A. Akhlaghy, Proposing a non-linear mathematical model for order splitting in a supply chain with perishable products: solving by genetic algorithm. *International Journal of Business Research*, 2011. 11(4): p. 104-111.
- [384] Tekin, E., Ü. Gürler, and E. Berk, Age-based vs. stock level control policies for a perishable inventory system. *European Journal of Operational Research*, 2001. 134(2): p. 309-329.
- [385] Yun, Y., S. Osako, and T. Nakai, Optimal inventory control for deteriorative goods considering delays of deliveries. *Journal of Information and Optimization Sciences*, 2012. 33(1): p. 103-114.
- [386] Zhou, D., L.C. Leung, and W.P. Pierskalla, Inventory Management of Platelets in Hospitals: Optimal Inventory Policy for Perishable Products with Regular and Optional Expedited Replenishments. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2011. 13(4): p. 420-438.
- [387] Alizadeh, M., H. Eskandari, and S.M. Sajadifar, A modified (S-1,S) inventory system for deteriorating items with Poisson demand and non-zero lead time. *Applied Mathematical Modelling*, 2014. 38(2): p. 699-711.
- [388] Chakravorthy, S.R. and J.K. Daniel, A Markovian inventory system with random shelf time and back orders. *Computers & Industrial Engineering*, 2004. 47(4): p. 315-337.
- [389] De, L.N. and A. Goswami, Probabilistic EOQ model for deteriorating items under trade credit financing. *International Journal of Systems Science*, 2009. 40(4): p. 335-346.
- [390] Huang, M.-G., Economic ordering model for deteriorating items with random demand and deterioration. *International Journal of Production Research*, 2013. 51(18): p. 5612-5624.
- [391] Huang, Y.-S., W.-J. Su, and Z.-L. Lin, A study on lead-time discount coordination for deteriorating products. *European Journal of Operational Research*, 2011.
- [392] Kalpakam, S. and S. Shanthi, A perishable inventory system with modified (S-1,S) policy and arbitrary processing times. *Computers & Operations Research*, 2001 28(5): p. 453-471.
- [393] Kouki, C., et al., Analysis of a periodic review inventory control system with perishables having random lifetime. *International Journal of Production Research*, 2014. 52(1): p. 283-298.
- [394] Lan, H., et al., Study on the inventory control of deteriorating items under VMI model based on bi-level programming. *Expert Systems with Applications*, 2011. 38(8): p. 9287-9295.
- [395] Lian, Z., X. Liu, and N. Zhao, A perishable inventory model with Markovian renewal demands. *International Journal of Production Economics*, 2009. 121(1): p. 176-182.
- [396] Manuel, P., B. Sivakumar, and G. Arivarigan, A perishable inventory system with service facilities, MAP arrivals and PH — Service times. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 2007. 16(1): p. 62-73.
- [397] Manuel, P., B. Sivakumar, and G. Arivarigan, A perishable inventory system with service facilities and retrieval customers. *Computers & Industrial Engineering*, 2008. 54(3): p. 484-501.
- [398] Pang, Z., Optimal dynamic pricing and inventory control with stock deterioration and partial backordering. *Operations Research Letters*, 2011. 39(5): p. 375-379.
- [399] Sazvar, Z., et al., A bi-objective stochastic programming model for a centralized green supply chain with deteriorating products. *International Journal of Production Economics*, 2014. 150: p. 140-154.
- [400] Shophia Lawrence, A., B. Sivakumar, and G. Arivarigan, A perishable inventory system with service facility and finite source. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. 37(7): p. 4771-4786.
- [401] Sivakumar, B., A perishable inventory system with retrieval demands and a finite population. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2009. 224(1): p. 29-38.
- [402] Sivakumar, B., N. Anbazhagan, and G. Arivarigan, Two commodity continuous review perishable inventory system. *International Journal of Information and Management Sciences*, 2006. 17(3): p. 47-64.
- [403] Sivakumar, B. and G. Arivarigan, A Perishable Inventory System at Service Facilities with Negative Customers. *Journal of Information and Management Sciences*, 2006. 17(2): p. 1-18.
- [404] Yadavalli, V.S.S., et al., A multi-server perishable inventory system with negative customer. *Computers & Industrial Engineering*, 2011. 61(2): p. 254-273.
- [405] Gürler, Ü. and B.Y. Özkaya, Analysis of the (s,S) policy for perishables with a random shelf life. *IIE Transactions*, 2008. 40(8): p. 759-781.
- [406] Ketzenberg, M., J. Bloemhof, and G. Gaukler, Managing Perishables with Time and Temperature History. *Production and Operations Management*, 2014: p. n/a-n/a.
- [407] Lian, Z., L. Liu, and M.F. Neuts, A Discrete-Time Model for Common Lifetime Inventory Systems. *Mathematics of Operations Research*, 2005. 30(3): p. 718-732.
- [408] Nahmias, S., On Ordering Perishable Inventory when Both Demand and Lifetime are Random. *Management Science*, 1977. 24(1): p. 82-90.
- [409] Eilon, S. and R.V. Mallya, Issuing and pricing policy of semi-perishables. 1966. New York: Wiley-Interscience.
- [410] Kang, S. and I.-T. Kim, A study on the price and production level of the deteriorating inventory system. *International Journal of Production Research*, 1983. 21(6): p. 899-908.
- [411] Aggarwal, S.P. and C.K. Jaggi, Ordering policy for decaying inventory. *International Journal of Systems Science*, 1989. 20(1): p. 151-155.
- [412] Li, G., et al., Dynamic pricing for perishable products with hybrid uncertainty in demand. *Applied Mathematics and Computation*, 2013. 219(20): p. 10366-10377.
- [413] Kwakernaak, H., Fuzzy random variables—I. definitions and theorems. *Information Sciences*, 1978. 15(1): p. 1-29.
- [414] Liu, B., *Uncertainty Theory*. 2004, Springer Berlin Heidelberg.
- [415] Liu, B., A survey of credibility theory. *Fuzzy Optimization and Decision Making*, 2006. 5(4): p. 387-408.

Freddy Andrés Pérez Mantilla

Nació en Barranquilla, Colombia. Es ingeniero industrial de la Universidad del Atlántico, de Barranquilla, Colombia. Actualmente es estudiante de doctorado en ingeniería en la Universidad de los Andes, de Bogotá, Colombia, y se desempeña como investigador del grupo PYLO, donde realiza estudios sobre la gestión de inventarios para productos perecederos. e-mail: fa.perez10@uniandes.edu.co

Fidel Torres

Nació en Bogotá, Colombia. Es ingeniero eléctrico y matemático de la Universidad de los Andes, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Eléctrica en la Universidad de los Andes de Bogotá, Colombia. Obtuvo su Magíster y PhD en Automática Informática Industrial en la Universidad Toulouse III-Paul Sabatier, de Toulouse, Francia. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Logística, producción y simulación en la Universidad de los Andes de Bogotá, Colombia, y es investigador del grupo PYLO. e-mail: ftorres@uniandes.edu.co

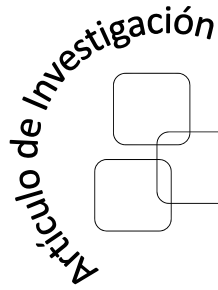
Anexo: clasificación consolidada

Se presenta de manera tabulada y consolidada el resumen de los modelos revisados en la sección 4, conforme a la siguiente nomenclatura:

- Ref = número de la referencia bibliográfica
- θ = tipo deterioro (**F** = vida útil fija conocida, **C** = tasa constante; **V** = tasa variable)
- λ = tipo de demanda (**C** = constante, **T** = en función del tiempo, **I** = sensible al nivel de inventario, **M** = en función de estrategias de mercado, **S** = estocástica **F** = fuzzy)
- σ = determinación de una política de precio de venta (**R** = con descuentos, **S** = con precios óptimos, **D** = con precios dinámicos)
- Φ = inclusión de faltantes (**T** = con acumulación total, **F** = con acumulación parcial pero fija, **I** = con acumulación parcial pero en función del tiempo de espera, **L** = con venta perdidas, **R** =retrial)
- Σ = inclusión de múltiples productos (**M**)
- W = inclusión de más de un depósito para el almacenamiento (**w**)
- X = estudios de sistemas multiniveles (**S** = un proveedor-un comprador, **M** = un proveedor/productor-múltiples compradores, **T** = tres eslabones, **L** = con logística inversa)
- Π = Determinación de políticas de pago a proveedores (**F** =con un plazo de pago sin interés para cualquier tamaño de pedido, **G** = con plazo de pago en sin intereses para pedidos mayores a "q", **B** = con plazo de pago entre proveedor/comprador /consumidor, **D** = con plazo de pago y descuento por pronto pago, **V** = con plazo de pago como variable de decisión, **Q** = con plazo de pago parcial)
- ρ = inclusión del valor del dinero en el tiempo e inflación (**I**)
- H = utilización de variables/constantes híbridas/difusas, o parámetros estocásticos diferente a la demanda (**F**)

Modelos de inventarios con productos precederos: revisión de literatura

Ref	θ	λ	σ	Φ	Σ	w	X	Π	ρ	H	Ref	θ	λ	σ	Φ	Σ	w	X	Π	ρ	H	Ref	θ	λ	σ	Φ	Σ	w	X	Π	ρ	H			
258.	C	T		I							308.	C	I		I							I	F	358.	F	S		L							
259.	C	T		I							309.	C	I			M								359.	F	S	D							I	
260.	C	TI		I						I	310.	C	I		F									360.	F	S		L							
261.	V	T		T							311.	C	I		F							I		361.	F	S	D	T							
262.	V	T		F						I	312.	C	IM		I									362.	F	S		T							
263.	V	T								F	313.	C	I	R										363.	F	S	D								
264.	V	T		T		w					314.	C	I									I	F	364.	F	S	D	T	M						
265.	V	T		I						F	315.	C	I		F		w					I		365.	F	S	S								
266.	V	T								F	316.	C	I		I									366.	F	S		L							
267.	V	T		T						F	317.	C	I		I							F		367.	F	S		L							
268.	V	T		I							318.	C	I									B		368.	F	S		T	M					I	
269.	V	T		T						I	319.	C	IM									F		369.	F	S		F	M						
270.	V	T		I						I	320.	C	I									F		370.	F	S	D	T							
271.	V	T		T							321.	C	IM	D										371.	F	S		T							
272.	V	T		I							322.	C	I									B		372.	F	S		T							
273.	V	T		T							323.	C	I		T							I		373.	F	S	D							S	
274.	V	T		F							324.	V	IM		I									374.	F	S		L						S	
275.	V	T		I							325.	V	I	R										375.	F	S		T						F	
276.	V	TI		T						I	326.	F	M	D										376.	F	S		L						S	
277.	V	T				w					327.	F	M	D										377.	F	S		T							
278.	V	T		T							328.	C	M		I							S	B	378.	F	S	S	L						S	
279.	V	T		TI							329.	C	M	D										379.	F	S	S	T							
280.	V	T		T							330.	C	M	S	I									380.	F	S		T							
281.	V	T		F							331.	C	M	S	F									381.	F	S		T							
282.	V	T								F	332.	C	M		TI		w						F	382.	F	S									
283.	V	T								D	333.	C	M	D										383.	F	S		IF	M					T	
284.	V	T		I							334.	C	M	S	I	M								384.	F	S		L							
285.	V	TI		I		w				I	335.	C	M	S	I								F	F	385.	F	S		L						
286.	V	TI		I		w				I	336.	C	M	S									F		386.	F	S		L						
287.	V	T								F	337.	C	M	S	I									387.	C	S		T							
288.	V	T		T							338.	C	M	S										388.	C	S		T							F
289.	V	T		I							339.	C	M	S										389.	C	S								B	
290.	V	T		T							340.	C	M	S	T							S	V	390.	C	S		L							
291.	V	TM	D								341.	V	M	S	I									391.	C	S		T						S	
292.	V	T		I							342.	V	M	S										392.	C	S		L							F
293.	V	T		I							343.	V	M	S	I									393.	C	S		LT							
294.	V	T		I							344.	V	M	S	I								B	394.	C	S								T	
295.	F	I									345.	V	M	S	I									395.	C	S		T							
296.	C	I			M						346.	V	M	S	T								I	396.	C	S									
297.	C	I		I							347.	V	M			M	w							397.	C	S									F
298.	C	I		F							348.	V	M	S										398.	C	S	D	F							
299.	C	I									349.	V	M	S										399.	C	S		F						S	
300.	C	I									350.	V	M											400.	C	S									F
301.	C	I		I							351.	V	M	S	I									401.	C	S		R							F
302.	C	IM	S	I						I	352.	V	M	S										402.	C	S		L	M						F
303.	C	I		I							353.	V	M	S										403.	C	S									
304.	C	I		TF		w	S				354.	V	M	S										404.	C	S		R							F
305.	C	IM	S			w		Q		F	355.	V	M										V	405.	V	S		T							
306.	C	IM	S	T							356.	V	M	S	T									406.	V	S		L							
307.	C	I		I							357.	V	M										S	VB	407.	V	S		T						



Danny Alexander Riaño Gómez
Universidad Distrital Francisco José de
Caldas
dlrianog@correo.udistrital.edu.co

Omar Salazar Morales
Universidad Distrital Francisco José de
Caldas
osalazarm@correo.udistrital.edu.co

José Jairo Soriano Méndez
Universidad Distrital Francisco José de
Caldas
jairosoriano@udistrital.edu.co



Ratón USB para personas tetrapléjicas controlado con el movimiento de la cabeza

USB Mouse for Tetraplegic People based on Head Tracking

Resumen

Este artículo presenta los resultados del diseño e implementación de un ratón USB (*Universal Serial Bus*) totalmente hardware destinado a personas que tienen algún tipo de discapacidad en alguno de sus cuatro miembros, con especial utilidad para aquellos que sufren de tetraplejía. La teoría detrás del diseño supone que el usuario puede mover el cursor en la pantalla del computador y hacer clics izquierdo y derecho, utilizando solamente la cabeza. La implementación se realizó con un microcontrolador que dispone de interfaz USB y conversor analógico-digital (ADC). El registro del movimiento de la cabeza del usuario y la posición de la pantalla se hizo mediante tecnología de acelerómetros de tres ejes. Los algoritmos diseñados e implementados en el *firmware* del microcontrolador realizan todo el trabajo necesario para procesar la información de los acelerómetros y así controlar el cursor en pantalla.

Se observó que el diseño es fácil de usar: el sensor del usuario se pone sobre sus gafas y el sensor de la pantalla se pone sobre ésta con una pinza plástica. La conexión al computador no requiere instalar software adicional, dado que es compatible con la clase HID (*Human Interface Devices*) que viene por defecto en varias plataformas como Windows® y Linux. El ratón fue probado en tres sistemas operativos sobre computadores diferentes, a saber, Windows® XP (32 bit), Windows® 7 (64 bit) y Ubuntu Linux (32 bit). Se realizó una prueba de las funciones básicas del ratón sobre siete personas sin entrenamiento previo. Esta prueba mostró la necesidad de una mejor sintonización de los umbrales en los algoritmos propuestos, que puede realizarse como trabajo futuro tomando una muestra representativa de la población objetivo. Se alcanzaron 6 %, 3 % y 1 % de desaciertos en la ejecución del clic derecho, y movimientos arriba y abajo del cursor respectivamente. Por el contrario, se alcanzaron 22 %, 12 % y 10 % de desaciertos en la ejecución del clic izquierdo, y movimientos izquierda y derecha respectivamente.

Palabras clave: ratón para discapacitados; tetraplejía; dispositivo de entrada USB.

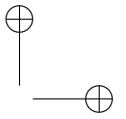
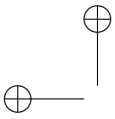
Abstract

This paper presents the design and implementation of a USB mouse for disabled people, with special attention for those who are tetraplegic. The theory behind this design supposes the user has his head as the only resource for moving and clicking the mouse cursor on the screen. The implementation was made by means of a microcontroller unit which has an USB (*Universal Serial Bus*) interface and an analog-digital converter (ADC). Head movements and screen position were registered by means of accelerometer technology. Designed and implemented algorithms on the microcontroller firmware process all the accelerometer information for controlling the mouse cursor on the screen.

This design is easy to use: a sensor is put on user's glasses, and another one is put on computer's screen. Connection to the computer is made by means of an USB cable, without installing additional software, since this design was developed using the HID (*Human Interface Devices*) class that comes with some platforms as Windows® or Linux. The mouse was tested under three operating systems on different computers, namely, Windows® XP (32 bit), Windows® 7 (64 bit) and Ubuntu Linux (32 bit). Mouse's basic functions was tested by seven people without previous training. This test showed that a better tuning for the thresholds on our proposed algorithms is desirable, and it could be made as a future work by taking a representative sample of our target population. We got 6 %, 3 % and 1 % in mistakes on right-click, and up and down cursor's movements respectively. On the other hand, we got 22 %, 12 % and 10 % in mistakes on left-click, and left and right cursor's movements respectively.

Key words: Hands-free mouse; Tetraplegia; USB input device.

Recibido: 13-05-2014
Modificado: 13-06-2014
Aceptado: 29-11-2014



1. Introducción y motivación

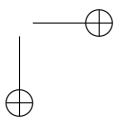
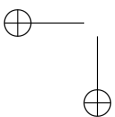
El ratón (o *mouse* por su nombre en inglés) se ha convertido en el dispositivo de entrada de datos más popular para interactuar con computadores y acceder a internet. Los computadores modernos cuentan con numerosas ventajas; sin embargo, estos equipos no han sido diseñados para que sean accesibles a personas en situación de discapacidad. El manejo de un computador tradicional requiere la capacidad física del movimiento de por lo menos una de las extremidades del ser humano, lo cual limita el acceso a personas tetraplégicas (enfermedad que impide la movilidad de las cuatro extremidades) y reduce la capacidad de éstas para realizar actividades diarias como ingresar a su correo electrónico, o al chat, o desarrollar trabajos básicos de procesamiento de texto.

Según cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) [1], en el último censo del 2005, se pueden identificar varios tipos de limitaciones permanentes en el total de 41.174.853 de personas de la población colombiana. Dentro de ellas se encuentran limitaciones permanentes en moverse o caminar con 758.009 personas; y limitaciones para usar sus brazos y manos en 381.724 personas. Si bien las cifras mencionadas no reflejan el número exacto de personas con tetraplejía, sí dan una idea del número de personas a las cuales podría beneficiar el desarrollo de un ratón diseñado especialmente para ellas.

Actualmente existen alternativas al ratón tradicional como dispositivo de entrada de datos. Algunos de estos sistemas no requieren de contacto con el usuario, dado que se basan en una cámara web y la utilización de algoritmos de visión artificial, basados en procesamiento de imágenes, para medir y transformar los movimientos de la cabeza de un usuario en desplazamientos relativos del cursor [2]. La detección del movimiento de la cabeza de un usuario se realiza por medio del cálculo de la diferencia entre dos imágenes consecutivas I^k e I^{k-1} , donde k es el número de secuencia de una imagen con m columnas y n filas.

Otra propuesta consiste en la creación de una herramienta que permite mover el cursor de un computador mediante el movimiento ocular, técnicas de visión artificial e interfaz USB [3]. En la herramienta creada se utiliza una cámara de video que permite capturar las imágenes en tiempo real y se recurre a un LED (*Light Emitting Diode*) emisor de infrarrojo para iluminar la zona del ojo humano que se desea capturar, ya que este tipo de luz no es percibida por el mismo. En dicho trabajo resulta necesaria la aplicación de diversas técnicas para lograr obtener una imagen del ojo con áreas significativas que puedan ser tratadas, y conseguir el movimiento del cursor.

Teniendo en cuenta señales electrooculográficas (señales producidas por movimientos oculares), se ha considerado la fabricación de un dispositivo que permite a pacientes privados de motricidad fina en sus manos, o con discapacidad aún más severa, usar el movimiento de sus ojos para posicionar un cursor en la pantalla de un computador, y por medio de algún dispositivo adicional, tal como una tecla o interruptor a medida, validar algún comando seleccionado en la pantalla del computador [4]. Este dispositivo funciona en conjunto con un teclado virtual y electrodos ubicados cerca a los ojos del usuario. Existe otra aproximación similar a esta última propuesta, con la excepción de que se introduce un motor para controlarlo [5].



Existen propuestas similares a los ratones ya mencionados [6]. La diferencia radica en que se usan algoritmos supervisados para el aprendizaje del sistema. El aprendizaje supervisado se fundamenta en una programación por ejemplos donde el algoritmo conoce la respuesta correcta a los patrones de entrada y encuentra una regla de clasificación (hipótesis) que asigna una etiqueta a cada elemento en el espacio de entrada. El desempeño se evalúa por medio de los errores de entrenamiento y generalización. En el primero se evalúan los datos nuevos (que no han sido pasados por el algoritmo) y en el segundo, los datos con los que se aprende.

Las personas que presentan tetraplejía tienen un amplio control del movimiento facial, por lo que es posible monitorear dichos movimientos para utilizar un computador con el mínimo esfuerzo. El ratón diseñado por otros autores [7] está compuesto por una interfaz electrónica basada en sensores optoelectrónicos, que utiliza un microcontrolador con interfaz USB para la comunicación y conectividad del mismo con el computador. Usa un protocolo de comunicación con luz infrarroja (IR) para establecer comandos de control, de tal manera que se pueda manipular el cursor sin necesidad de emplear cables de conexión. Incorpora un dispositivo mecánico, el cual se ajusta a los diferentes contornos faciales del usuario.

Otro ratón construido está basado en un controlador con interfaz USB y con capacidad de realizar conversión analógico-digital (A/D) [8]. La interfaz USB usa la clase de dispositivos HID, lo cual significa que no es necesario el diseño de algún software, dado que la mayoría de sistemas operativos ya dan soporte a esta clase de dispositivos USB. El módulo del sensor fue construido en una caja plástica de 40 mm × 25 mm × 15 mm que encapsula y aísla cualquier componente electrónico del usuario, además de permitirle mover el cursor con alguna parte del cuerpo: brazo, mano, pierna o pie. El módulo del sensor está basado en acelerómetros. La función de “clic” fue implementada por medio de una unidad de “sorbo-y-soplo” donde el usuario tiene que hacer uso de su capacidad aeróbica para hacer clic al ratón, además de ser necesario usar una pequeña manguera que lleva el aire del usuario al sensor que registra la presión del aire. Una de las principales desventajas del diseño es que el sistema total es poco flexible para el usuario, dado que es necesario que éste sea ayudado para que el ratón sea puesto en el lugar adecuado antes de ser usado.

Recientemente se ha desarrollado una interfaz de reconocimiento de voz y de movimiento basada en tecnología de sensores cinéticos para sistema operativo Windows® [9], [10]. El propósito es dar a usuarios con inhabilidades en manos y brazos la habilidad de controlar varias funcionalidades del computador, tales como reproducir música o videos, navegar por internet o editar documentos. El estudio presentado está enfocado en cómo usar sensores cinéticos para reconocer comandos de voz y movimientos del cuerpo, especialmente manos, brazos y cabeza.

En este artículo se presenta el resultado del diseño e implementación de un prototipo de ratón hardware USB para hacer frente a algunos problemas de accesibilidad que afrontan personas con movilidad reducida o discapacitadas [11]. Esta propuesta se enfoca en el uso del movimiento de la cabeza del usuario para controlar el cursor en la pantalla del computador y hacer los clics izquierdo y derecho. La captura del movimiento se hace con un acelerómetro de tres ejes ubicado sobre las gafas del usuario (método no invasivo), contrario a otras propuestas que usan tres acelerómetros de dos ejes sobre ambientes virtuales [12], o las otras recién mencionadas, que usan cámaras web o video (procesamiento de imágenes, visión artificial) o sensores optoelectrónicos. Un segundo acelerómetro de tres ejes se ubica sobre la pantalla del

computador por medio de pinzas plásticas para detectar su inclinación. El diseño propuesto es totalmente hardware, y contrario a algunas propuestas ya descritas, no es necesaria la instalación de algún software para su funcionamiento. Se usa la clase HID, así que es funcional sobre varios sistemas operativos (como Windows® y Linux), contrario a otros desarrollos para una única plataforma. Además, el diseño es un dispositivo *plug-and-play*, portable y de fácil uso por su conexión USB.

El artículo está organizado como sigue: la sección 2 presenta el ratón construido. La sección 3 la teoría relacionada con su funcionamiento. La sección 4 muestra su uso por parte de un usuario. La sección 5 presenta las pruebas realizadas y los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro se presentan en las secciones 6, 7 y 8.

2. Materiales del ratón

El hardware del ratón USB implementado se compone de los siguientes elementos: cable USB, dos cables (de 5 hilos y 1 m de longitud cada uno) fabricados a medida para los sensores, gafas plásticas para el usuario con el sensor ubicado en la parte frontal, pinza plástica para el computador con el sensor ubicado en la parte lateral y circuito del microcontrolador. Todos estos elementos se muestran en la Figura 1.

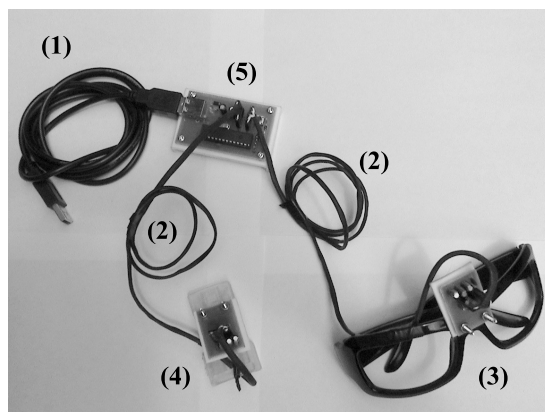


Figura 1. Elementos del ratón implementado: (1) Cable USB, (2) dos cables de 5 hilos cada uno, (3) gafas plásticas con sensor de usuario, (4) pinza plástica con sensor computador y (5) circuito del microcontrolador.

3. Funcionamiento del ratón

El movimiento de la cabeza del usuario se detecta por medio de un sensor tipo acelerómetro, el cual se ubica sobre sus gafas. Esta señal se muestrea y procesa a través de un microcontrolador. Un segundo sensor tipo acelerómetro se ubica sobre la pantalla del computador con el fin de detectar su inclinación y poder realizar la proyección del movimiento de la cabeza del usuario. Esta señal también se muestrea y procesa con el microcontrolador.

El microcontrolador dispone de un conversor analógico-digital con resolución de 10 bit, interfaz USB 2.0 configurada en modo *full-speed* cuya tasa de transferencia por el *bus* es de 12 Mbit/s [13], y además procesa los datos provenientes de los sensores para realizar la proyección del movimiento de la cabeza de tres dimensiones a dos dimensiones (Figura 2(a)). También tiene la función de detectar si el usuario ha hecho clic izquierdo, clic derecho y calcular el desplazamiento del cursor del ratón basado en la información del movimiento de la cabeza del usuario (Figura 2(b)). El desplazamiento sobre la pantalla, clic izquierdo y clic derecho necesarios para ser entregados en el reporte USB al computador son obtenidos por medio del *firmware* del microcontrolador. La Figura 2(c) muestra un diagrama de bloques propuesto para la implementación de ratón USB.

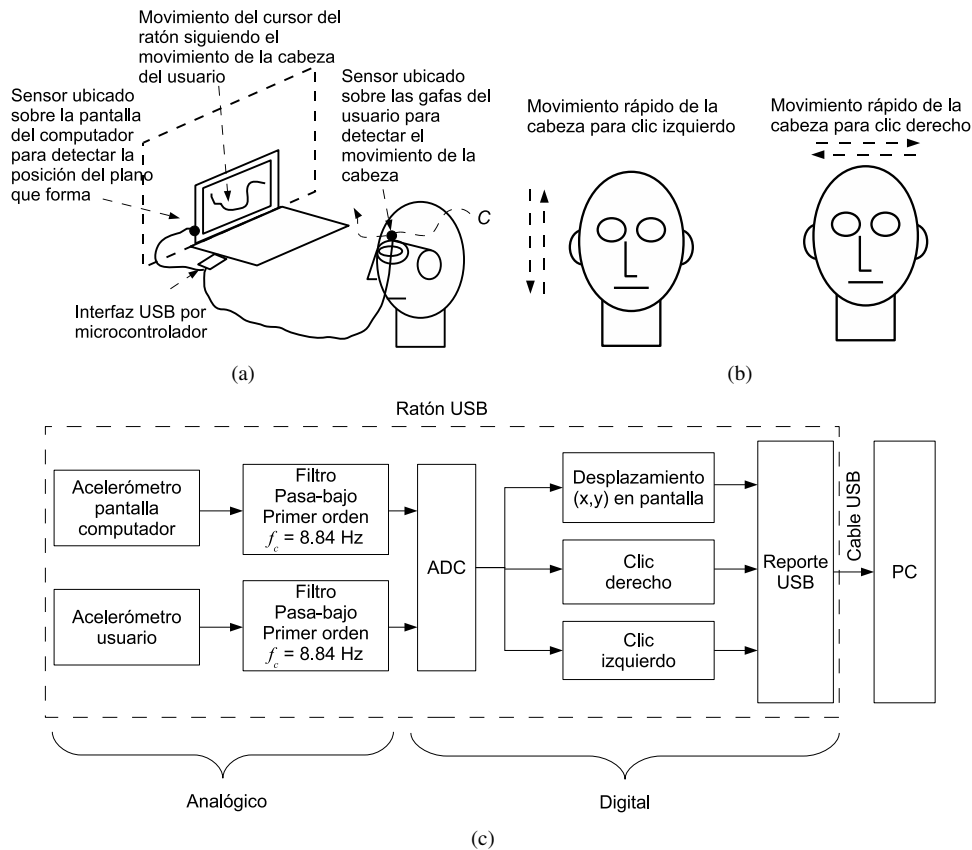


Figura 2. (a) Propuesta de ratón hardware USB con el uso de sensores ubicados en las gafas del usuario y pantalla del computador para el seguimiento del movimiento de la cabeza del usuario e inclinación de la pantalla. (b) Movimientos rápidos de la cabeza para clic izquierdo y clic derecho del ratón. (c) Diagrama de bloques propuesto del ratón USB

El *firmware* para el microcontrolador PIC18F2550 [14] fue desarrollado sobre lenguaje C, usando el entorno de desarrollo MPLAB X IDE, versión beta 7.12, y el compilador C18, versión 3.40. Ambos son software libre y disponibles para descarga gratuita en el sitio web del fabricante.

Los algoritmos que se muestran en las siguientes secciones están basados en el esquema de muestreo uniforme que se realiza sobre las tres salidas XOUT, YOUT y ZOUT de los

dos acelerómetros MMA7260QT [15] (usuario y pantalla del computador) a un periodo de muestreo $T_m = 50$ ms (frecuencia de muestreo $f_m = 20$ Hz). Esta frecuencia fue escogida para garantizar el teorema del muestreo de acuerdo con un estudio presentado para un grupo de 20 personas en edades de 20–61 años (donde 9 eran hombres), con alturas entre 147 cm y 183 cm, pesos entre 49 kg y 98 kg, y circunferencia de la cabeza entre 53 cm y 60 cm, donde las frecuencias del movimiento de la cabeza en varias condiciones no superan los 8,2 Hz [16] (Tabla I).

Tabla I. Resumen del estudio de las frecuencias del movimiento de la cabeza para un grupo de 20 personas. [16]

Condición de prueba*	Frecuencia predominante (Hz)	Velocidad máxima (°/s)	Amplitud** (°)
Caminando			
Horizontal	0,8 (0,6 – 1,0)	36 (16 – 89)	± 6 (2 – 11)
Vertical	1,8 (0,6 – 4,20)	32 (14 – 81)	± 3 (2 – 8)
Corriendo			
Horizontal	1,5 (1,1 – 2,7)	62 (26 – 590)	± 6 (4 – 20)
Vertical	3,2 (2,2 – 8,2)	87 (23 – 240)	± 5 (2 – 14)
Sacudida horizontal de la cabeza	2,6 (1,4 – 5,4)	780 (380 – 1100)	± 50 (20 – 80)
Sacudida vertical de la cabeza	2,4 (1,2 – 4,3)	380 (180 – 700)	± 40 (10 – 50)

* Los valores están dados en medianas, con el rango entre paréntesis

** La amplitud está expresada como la mediana y el rango de las desviaciones máximas (\pm) hacia los lados del punto de inicio

La Figura 3 presenta una línea de tiempo que ilustra la forma como son muestreados los seis canales del microcontrolador cada periodo de muestreo. La Tabla II presenta una correspondencia de los seis canales del ADC usados y las señales muestreadas de los acelerómetros.

Cada T_m se muestrean 6 señales: XOUT, YOUT y ZOUT del usuario y pantalla

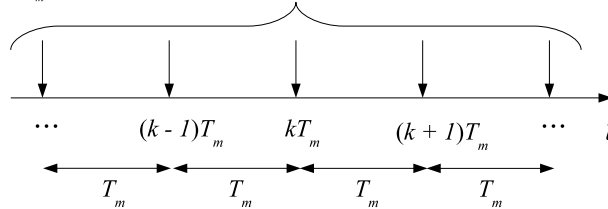


Figura 3. Muestreo de las tres salidas XOUT, YOUT y ZOUT de los dos acelerómetros ubicados en los sensores de usuario y pantalla del computador. T_m : periodo de muestreo. k : variable entera

Tabla II. Correspondencia entre canales del ADC en el PIC18F2550 y las señales muestreadas en los acelerómetros de usuario y pantalla del computador

Canal ADC microcontrolador	Número de pin microcontrolador	Señal	Mnemónico
RA0/AN0	2	XOUT acelerómetro sensor usuario	x_{su}
RA1/AN1	3	YOUT acelerómetro sensor usuario	y_{su}
RA2/AN2	4	ZOUT acelerómetro sensor usuario	z_{su}
RA5/AN4	7	XOUT acelerómetro sensor pantalla computador	x_{sc}
RB2/AN8	23	YOUT acelerómetro sensor pantalla computador	y_{sc}
RB3/AN9	24	ZOUT acelerómetro sensor pantalla computador	z_{sc}

3.1. Proyección del movimiento de la cabeza del usuario sobre el plano de la pantalla del computador

El algoritmo de la proyección del movimiento de la cabeza sobre el plano de la pantalla del computador se basa en el hecho que el acelerómetro MMA7260QT puede registrar aceleración estática, esto es: la aceleración debida a la gravedad de la Tierra, proyectada sobre cada eje de aceleración en los acelerómetros, se verá como un voltaje proporcional a la correspondiente componente de la aceleración.

De acuerdo con la descripción del funcionamiento del acelerómetro MMA7260QT [15], en un modelo simplificado, el voltaje en una de sus salidas a causa de la aceleración estática puede calcularse por medio de la ecuación:

$$\frac{VDD}{2} - S \sin(\theta) \tag{1}$$

donde $VDD = 3,3 \text{ V}$, $S = 0,8 \text{ V}$ (sensibilidad del acelerómetro) y θ es el ángulo de inclinación del eje del acelerómetro respecto a la horizontal (Figura 4).

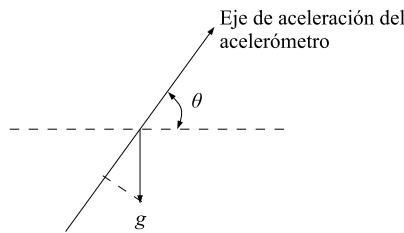


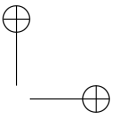
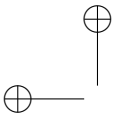
Figura 4. Modelo simplificado de la salida de voltaje en las salidas del acelerómetro MMA7260QT a causa de la aceleración estática. g : aceleración de la gravedad

Por la disposición del acelerómetro en el sensor de la pantalla del computador (Figura 11(b)), idealmente el plano $x_{sc}-y_{sc}$ es paralelo al plano de la pantalla. Por esto mismo, el eje z_{sc} será perpendicular. Debido a que cualquier movimiento del cursor en pantalla consiste de dos movimientos básicos: izquierda-derecha y arriba-abajo, el algoritmo de proyección está dividido en dos partes que se explican a continuación. También es necesario considerar el hecho de que un usuario de un computador en ocasiones no realiza algún movimiento del cursor en la pantalla, por ejemplo, cuando está leyendo un documento electrónico. Por esto mismo se considera un *no-movimiento* o *posición de descanso* en los algoritmos.

3.1.1. Movimiento izquierda-derecha

Las Figura 5(a)–Figura 5(e) muestran la vista frontal de un usuario ubicado frente a la pantalla de un computador. Se muestran las direcciones de incremento en los ejes de las aceleraciones para los acelerómetros ubicados en los sensores del usuario y el computador.

1. Durante la posición de descanso (Figura 5(a)), los ejes de los acelerómetros en los sensores del usuario y pantalla serán casi paralelos. Por imperfecciones en la ubicación



de ambos sensores no se puede suponer un paralelismo perfecto. La aceleración de la gravedad se proyectará casi de la misma forma sobre ambos sistemas de ejes.

2. Si el usuario inclina la cabeza a su derecha (Figura 5(b)), lo cual debería generar un movimiento a la derecha del cursor, la aceleración de la gravedad se proyectará de forma diferente sobre los dos sistemas de ejes.
3. Si el usuario inclina la cabeza a su izquierda (Figura 5(c)), lo cual debería generar un movimiento a la izquierda del cursor, la aceleración de la gravedad se proyectará de forma diferente sobre los dos sistemas de ejes.

Las Figuras 5(d) y 5(e) muestran el detalle de las proyecciones de la aceleración de la gravedad sobre los dos sistemas de ejes en los sensores de usuario y pantalla para ambos tipos de inclinaciones (izquierda y derecha). Como se observa en ambas figuras, la proyección de la gravedad sobre los ejes x_{sc} y x_{su} no proporciona información útil del movimiento a izquierda o derecha del cursor en la pantalla, dado que esta proyección siempre es hacia $-x_{sc}$ y $-x_{su}$ en todos los casos. Por el contrario, la proyección de la gravedad sobre los ejes y_{sc} y y_{su} sí proporciona información sobre el movimiento a izquierda o derecha del cursor en la pantalla:

1. Si el usuario inclina la cabeza a su derecha, la gravedad se proyecta hacia $+y_{su}$.
2. Si el usuario inclina la cabeza a su izquierda, la gravedad se proyecta hacia $-y_{su}$.

Si se define la cantidad

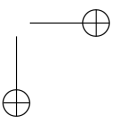
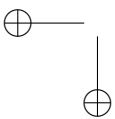
$$\alpha[k] = y_{su}[k] - y_{sc}[k], \quad (2)$$

donde k es el instante k -ésimo de muestreo, entonces el signo de $\alpha[k]$ puede usarse para determinar si el usuario desea mover el cursor del ratón a izquierda o derecha de la pantalla. En condiciones ideales, cuando el sensor de la pantalla del computador esté perfectamente ubicado, la proyección de la gravedad sobre y_{sc} debería ser nula. En $\alpha[k]$ se toma como referencia $y_{sc}[k]$ para tener en cuenta la componente de la aceleración de la gravedad sobre y_{sc} . Para establecer una posición de descanso se debe umbralizar $\alpha[k]$ de la siguiente forma:

1. Si $\alpha[k] > UMID$, entonces el movimiento del cursor es a la derecha de la pantalla,
2. Si $\alpha[k] < -UMID$, entonces el movimiento del cursor es a la izquierda de la pantalla,
3. Si $-UMID \leq \alpha[k] \leq UMID$, entonces no hay movimiento,

donde $UMID$ es un valor positivo denominado *Umbral de Movimiento Izquierda-Derecha*.

Basado en lo anterior, el algoritmo propuesto para realizar el movimiento izquierda-derecha (incluido el no-movimiento) del cursor en la pantalla del computador se muestra en la Figura 6(a).



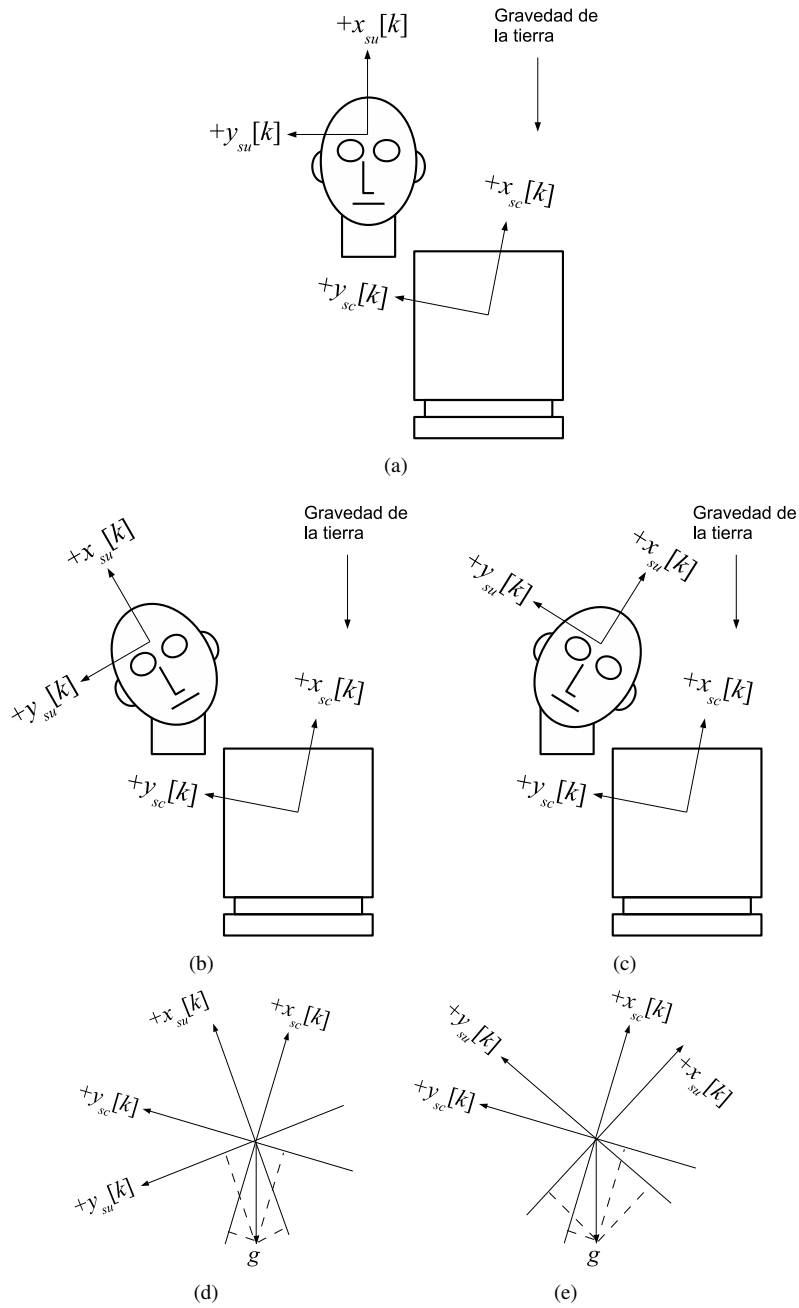


Figura 5. Vista frontal de la posición de la cabeza de un usuario frente a la pantalla de un computador. Los ejes $+z_{su}$ y $+z_{sc}$ no se muestran pero están saliendo de la hoja. g : aceleración de la gravedad. (a) Posición de descanso. (b) Inclinación a derecha de la cabeza. (c) Inclinación a izquierda de la cabeza. (d) Detalle de la proyección en la inclinación a derecha. (e) Detalle de la proyección en la inclinación a izquierda.

3.1.2. Movimiento arriba-abajo

El movimiento arriba-abajo es análogo al movimiento izquierda-derecha. Las Figuras 7(a)–7(e) muestran la vista lateral de un usuario ubicado frente a la pantalla de un computador. Se

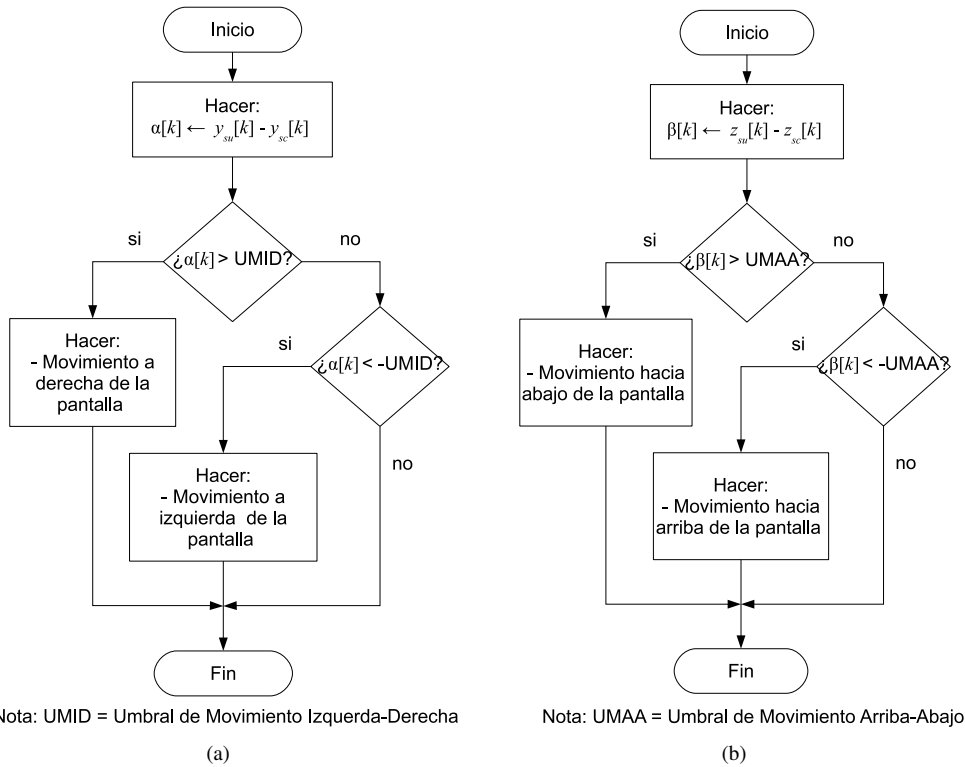


Figura 6. (a) Algoritmo propuesto para realizar el movimiento izquierda-derecha del cursor en la pantalla del computador. (b) Algoritmo propuesto para realizar el movimiento arriba-abajo del cursor en la pantalla del computador. Se contempla el no-movimiento.

muestran las direcciones de incremento en los ejes de las aceleraciones para los acelerómetros ubicados en los sensores del usuario y el computador.

1. Durante la posición de descanso (Figura 7(a)), los ejes de los acelerómetros en los sensores del usuario y pantalla serán casi paralelos. Por imperfecciones en la ubicación de ambos sensores no se puede suponer un paralelismo perfecto. La aceleración de la gravedad se proyectará casi de la misma forma sobre ambos sistemas de ejes.
2. Si el usuario inclina la cabeza hacia atrás (extensión) (Figura 7(b)), lo cual debería generar un movimiento hacia arriba del cursor, la aceleración de la gravedad se proyectará de forma diferente sobre los dos sistemas de ejes.
3. Si el usuario inclina la cabeza hacia abajo (flexión) (Figura 7(c)), lo cual debería generar un movimiento hacia abajo del cursor, la aceleración de la gravedad se proyectará de forma diferente sobre los dos sistemas de ejes.

Las Figuras 7(d) y 7(e) muestran el detalle de las proyecciones de la aceleración de la gravedad sobre los dos sistemas de ejes en los sensores de usuario y pantalla para ambos tipos de inclinaciones (extensión y flexión). Como se observa en ambas figuras, la proyección de la gravedad sobre los ejes x_{sc} y x_{su} no proporciona información útil del movimiento hacia

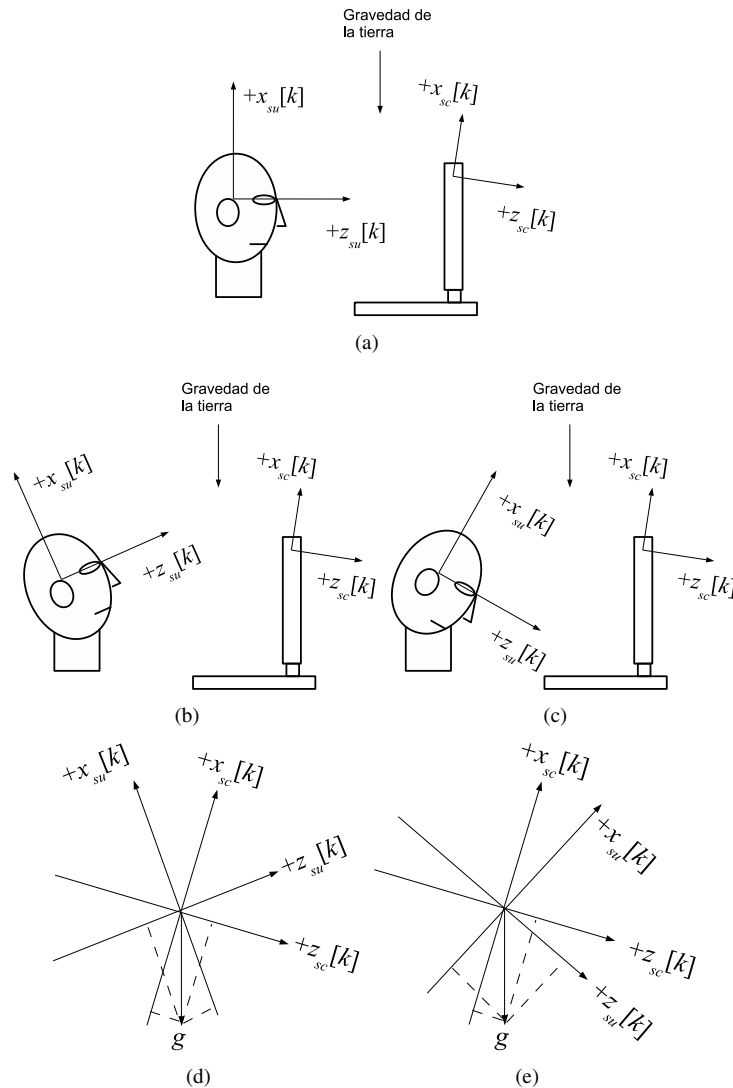
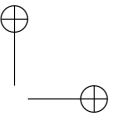
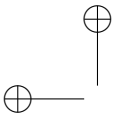


Figura 7. Vista lateral de la posición de la cabeza de un usuario frente a la pantalla de un computador. Los ejes $+y_{su}$ y $+y_{sc}$ no se muestran pero están saliendo de la hoja. g : aceleración de la gravedad. (a) Posición de descanso. (b) Extensión de la cabeza. (c) Flexión de la cabeza. (d) Detalle de la proyección en extensión de la cabeza. (e) Detalle de la proyección en flexión de la cabeza.

arriba o abajo del cursor en la pantalla, dado que esta proyección siempre es hacia $-x_{sc}$ y $-x_{su}$ en todos los casos. Por el contrario, la proyección de la gravedad sobre los ejes z_{sc} y z_{su} sí proporciona información sobre el movimiento hacia arriba o abajo del cursor en la pantalla:

1. Si el usuario inclina la cabeza hacia atrás, la gravedad se proyecta hacia $-z_{su}$.
2. Si el usuario inclina la cabeza hacia adelante, la gravedad se proyecta hacia $+z_{su}$.



Si se define la cantidad

$$\beta[k] = z_{su}[k] - z_{sc}[k], \quad (3)$$

entonces el signo de $\beta[k]$ puede usarse para determinar si el usuario desea mover el cursor del ratón hacia arriba o abajo de la pantalla. Para establecer una posición de descanso, se debe umbralizar $\beta[k]$ de la siguiente forma:

1. Si $\beta[k] > UMAA$, entonces el movimiento del cursor es hacia abajo de la pantalla,
2. Si $\beta[k] < -UMAA$, entonces el movimiento del cursor es hacia arriba de la pantalla,
3. Si $-UMAA \leq \beta[k] \leq UMAA$, entonces no hay movimiento,

donde $UMAA$ es un valor positivo denominado *Umbral de Movimiento Arriba-Abajo*.

Basado en lo anterior, el algoritmo propuesto para realizar el movimiento arriba-abajo (incluido el no-movimiento) del cursor en la pantalla se muestra en la Figura 6(b).

3.2. Clic izquierdo y clic derecho

Los algoritmos para los clics izquierdo y derecho se basan en el hecho de que el acelerómetro MMA7260QT puede registrar aceleración dinámica, esto es: la aceleración de la masa del acelerómetro proyectada sobre cada eje, se verá como un voltaje proporcional a la correspondiente componente de la aceleración dinámica.

3.2.1. Clic izquierdo

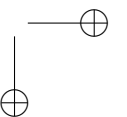
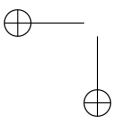
El *clic izquierdo* del ratón es implementado mediante el movimiento rápido arriba-abajo de la cabeza del usuario (Figura 8(a)). Debido a la disposición del acelerómetro en el sensor del usuario (Figura 12(b)), el movimiento ideal arriba-abajo de la cabeza del usuario se ve reflejado en una rotación del plano $x_{su}-z_{su}$ alrededor del eje y_{su} , como se muestra en las Figuras 8(b) y 8(c). Si se define la cantidad¹

$$\Delta z_{su} = z_{su}[k] - z_{su}[k-1] \quad (4)$$

como la primera diferencia entre dos muestras sucesivas de la señal z_{su} entregada por el acelerómetro del usuario en su salida ZOUT, entonces $|\Delta z_{su}|$ es una medida de la rapidez con que el usuario mueve su cabeza arriba-abajo. Se toma el valor absoluto debido a que no interesa el signo, sino la magnitud para detectar el movimiento rápido de la cabeza.

Debido a que cualquier movimiento arriba-abajo de la cabeza del usuario podría interpretarse como un clic izquierdo, es necesario umbralizar el valor de $|\Delta z_{su}|$ de la siguiente forma:

¹De forma análoga se podría haber definido la cantidad $\Delta x_{su} = x_{su}[k] - x_{su}[k-1]$. Sin embargo, por disposición del acelerómetro en el sensor del usuario, la señal x_{su} estaría siendo afectada por acción de la gravedad. Esto causa que el desbalance de voltaje en x_{su} no sea simétrico respecto al valor medio de la alimentación del acelerómetro. Ver el manual [15] para más detalles.



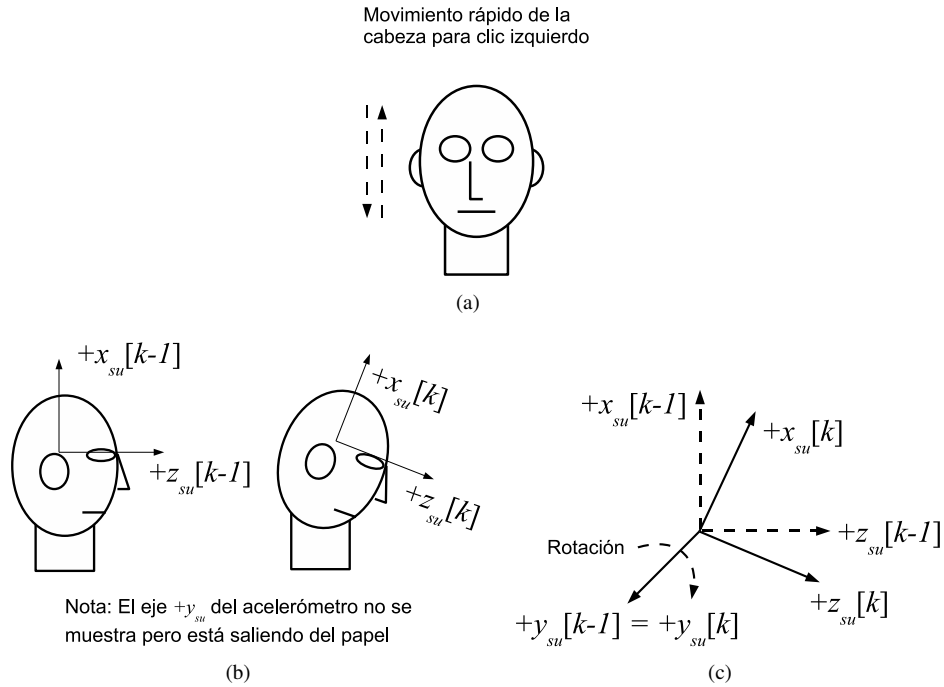


Figura 8. (a) Movimiento de la cabeza del usuario para clic izquierdo. (b) Movimiento ideal del sistema coordinado del acelerómetro entre dos muestras sucesivas en el sensor del usuario. (c) Detalle del movimiento ideal del sistema coordinado del acelerómetro entre dos muestras sucesivas en el sensor del usuario.

1. Si $|\Delta z_{su}| > UCI$, entonces existe clic izquierdo,
2. Si $|\Delta z_{su}| \leq UCI$, entonces no existe clic izquierdo,

donde UCI es un valor positivo denominado *Umbral de Clic Izquierdo*.

Basado en lo anterior, el algoritmo propuesto para hacer el clic izquierdo se muestra en la Figura 9(a).

3.2.2. Clic derecho

El *clic derecho* del ratón es análogo al clic izquierdo. Es implementado mediante el movimiento rápido izquierda-derecha de la cabeza del usuario (Figura 10(a)). Debido a la disposición del acelerómetro en el sensor del usuario (Figura 12(b)), el movimiento ideal izquierda-derecha de la cabeza del usuario se ve reflejado en una rotación del plano $y_{su}-z_{su}$ alrededor del eje x_{su} como se muestra en la Figura 10(b) y Figura 10(c). Por tal motivo, si se define la cantidad²

$$\Delta y_{su} = y_{su}[k] - y_{su}[k - 1], \tag{5}$$

como la primera diferencia entre dos muestras sucesivas de la señal y_{su} entregada por el acelerómetro del usuario en su salida YOUT, entonces $|\Delta y_{su}|$ es una medida de la rapidez con que el usuario mueve su cabeza izquierda-derecha.

²De forma análoga se podría definir la cantidad $\Delta z_{su} = z_{su}[k] - z_{su}[k - 1]$. Sin embargo esta cantidad ya es utilizada para el clic izquierdo.

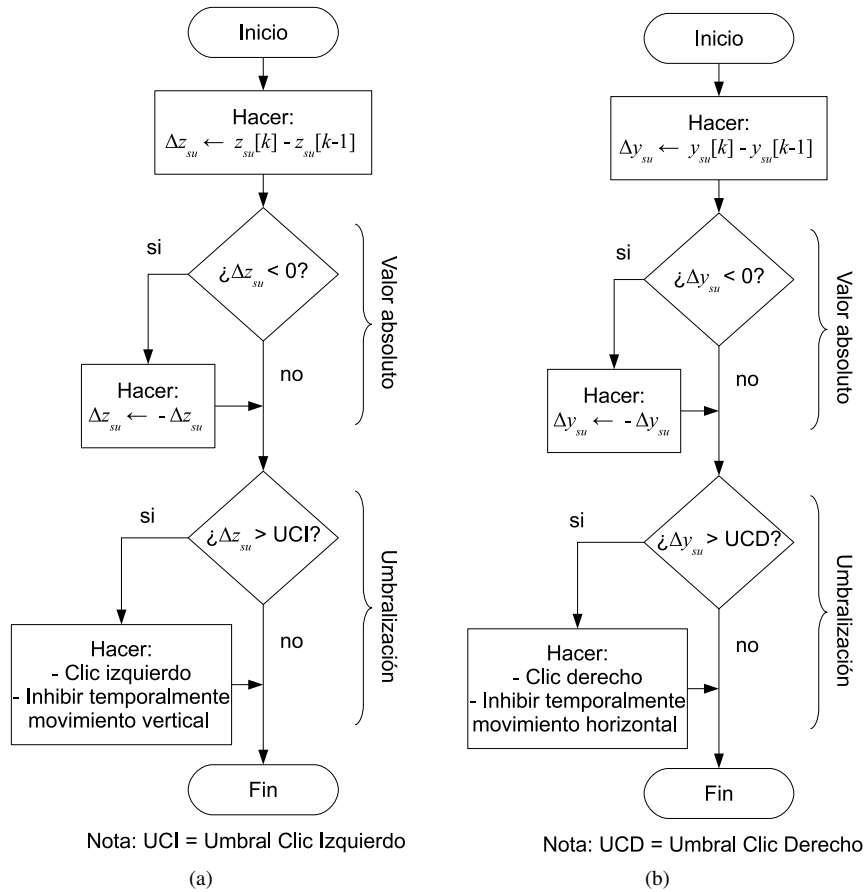


Figura 9. (a) Algoritmo propuesto para clic izquierdo. (b) Algoritmo propuesto para clic derecho.

Debido a que cualquier movimiento izquierda-derecha de la cabeza del usuario podría interpretarse como un clic derecho, es necesario umbralizar el valor de $|\Delta y_{su}|$ de la siguiente forma:

1. Si $|\Delta y_{su}| > UCD$, entonces existe clic derecho,
2. Si $|\Delta y_{su}| \leq UCD$, entonces no existe clic derecho,

donde UCD es un valor positivo denominado *Umbral de Clic Derecho*.

Basado en lo anterior, el algoritmo propuesto para hacer el clic derecho se muestra en la Figura 9(b).

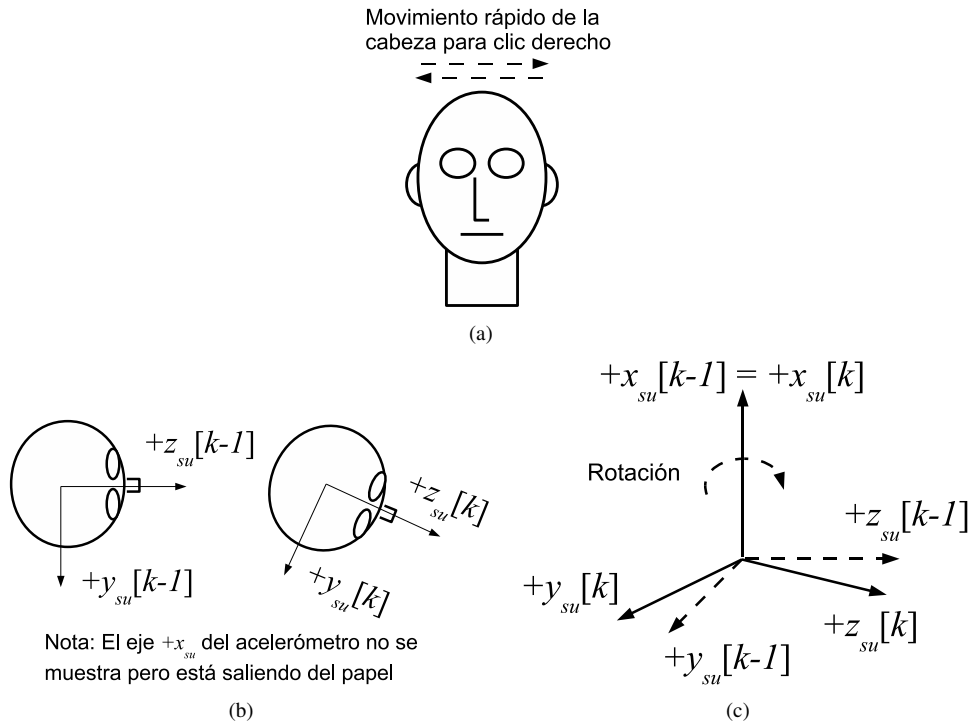


Figura 10. (a) Movimiento de la cabeza del usuario para clic derecho. (b) Movimiento ideal del sistema coordenado del acelerómetro entre dos muestras sucesivas en el sensor del usuario. (c) Detalle del movimiento ideal del sistema coordenado del acelerómetro entre dos muestras sucesivas en el sensor del usuario.

3.3. Estimación de los umbrales para los algoritmos

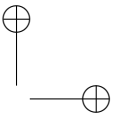
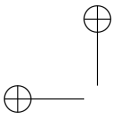
Los algoritmos propuestos en las Figuras 6(a), 6(b), 9(a) y 9(b) tienen definidos umbrales, a saber, *Umbral de Movimiento Izquierda-Derecha* (UMID), *Umbral de Movimiento Arriba-Abajo* (UMAA), *Umbral de Clic Izquierdo* (UCI) y *Umbral de Clic Derecho* (UCD). A continuación se realiza una estimación de estos parámetros.

3.3.1. Umbrales de movimiento izquierda-derecha y arriba-abajo

De acuerdo con el manual de ergonomía [17], los ángulos máximos recomendados (sin realizarlos en forma prolongada) para el movimiento lateral de la cabeza son de 15°, y para el movimiento de flexión (bajar la cabeza) y extensión (levantar la cabeza), son de 30° y 15°, respectivamente. Todos estos ángulos son medidos respecto a la vertical. Si bien estos ángulos son solamente una guía, el valor de 15° se toma en todos los casos para realizar una estimación de los umbrales UMID y UMAA.

Bajo condiciones ideales, cuando y_{sc} y z_{sc} son paralelos a la horizontal, y cuando y_{su} y z_{su} toman un ángulo de 15° respecto a la horizontal (Figuras 5(a)–5(e) y Figuras 7(a)–7(e)), un ángulo de 15° en el movimiento de la cabeza se ve reflejado en $\alpha[k]$ y $\beta[k]$ en un voltaje de 207 mV usando (1). Este valor se obtiene en la forma

$$\left| \left(\frac{VDD}{2} - S \sin 15^\circ \right) - \left(\frac{VDD}{2} - S \sin 0^\circ \right) \right| = 0,8 \sin 15^\circ \approx 207 \text{ mV.}$$



Debido a la resolución de 10 bit del ADC, con una ventana de conversión entre 0 V y 3,3 V, el número entero que representa los 207 mV es de $2^{10}(0,207/3,3) \approx 64$. Por lo tanto, la representación digital de los umbrales UMID y UMAA, para $\alpha[k]$ y $\beta[k]$, es de 64 aproximadamente.

3.3.2. Umbrales de clic izquierdo y clic derecho

Una estimación para los umbrales UCI y UCD se obtiene de (1), al suponer que el acelerómetro gira a una velocidad angular constante ω , es decir, $\theta = \omega t = 2\pi ft$, donde t es el tiempo y f es la frecuencia de rotación. De la Tabla I, se observa que la menor frecuencia del movimiento de la cabeza en todos los casos es aproximadamente 0,6 Hz. Esta frecuencia se toma para la estimación de UCI y UCD.

De (4) y (5) se obtiene entonces que entre dos muestras sucesivas existe una diferencia de voltaje de

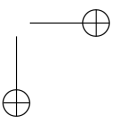
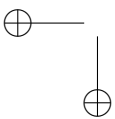
$$\left| \left(\frac{VDD}{2} - S \sin(2\pi f k T_m) \right) - \left(\frac{VDD}{2} - S \sin(2\pi f (k-1) T_m) \right) \right| \approx 150 \text{ mV},$$

donde $VDD = 3,3 \text{ V}$, $f = 0,6 \text{ Hz}$, $S = 0,8 \text{ V}$, $T_m = 50 \text{ ms}$ y k se ha tomado como 1 para maximizar la diferencia. El número entero que representa los 150 mV es $2^{10}(0,150/3,3) \approx 46$. Por lo tanto, la representación digital de los umbrales UCI y UCD, para Δz_{zu} y Δy_{zu} , es de 46 aproximadamente.

4. Uso del ratón

El ratón diseñado debe usarse de la siguiente forma:

1. Ubicar el sensor del computador a la pantalla por medio de una pinza plástica, como se muestra en las Figuras 11(a) y 11(b). El cable de 5 hilos desde la regleta del sensor se conecta a la regleta del circuito del microcontrolador para que éste pueda capturar la información del acelerómetro.
2. Poner las gafas plásticas al usuario como se muestra en las Figuras 12(a) y 12(b). El cable de 5 hilos desde la regleta del sensor se conecta a la regleta del circuito del microcontrolador para que éste pueda capturar la información del acelerómetro.
3. Conectar el cable USB desde el circuito del microcontrolador al computador. Esto permite el envío de los reportes USB del ratón al computador. Cuando esto se realice por primera vez, el computador enumerará el ratón USB como un dispositivo HID y luego de algunos segundos de configuración, el ratón estará listo para usarse.
4. Una vez el computador reconoce el ratón como un dispositivo USB, el usuario podrá mover el cursor en pantalla. Si el usuario inclina la cabeza a su derecha, el cursor se moverá a la derecha de la pantalla. Si inclina la cabeza a su izquierda, el cursor se moverá a



la izquierda de la pantalla. Si inclina la cabeza hacia atrás, el cursor se moverá hacia arriba de la pantalla. Si inclina la cabeza hacia abajo, el cursor se moverá hacia abajo de la pantalla. Existirá una posición de descanso (no-movimiento) cuando el usuario deje su sensor paralelo al sensor ubicado en la pantalla del computador.

- Los clic izquierdo y derecho se pueden hacer por movimientos rápidos arriba-abajo e izquierda-derecha de la cabeza respectivamente.



Figura 11. (a) Ubicación de la pinza del sensor del computador. (b) Sistema coordenado del acelerómetro ($+x_{sc}$: dirección incremento x aceleración sensor del computador, $+y_{sc}$: dirección incremento y aceleración sensor del computador, $+z_{sc}$: dirección incremento z aceleración sensor del computador).

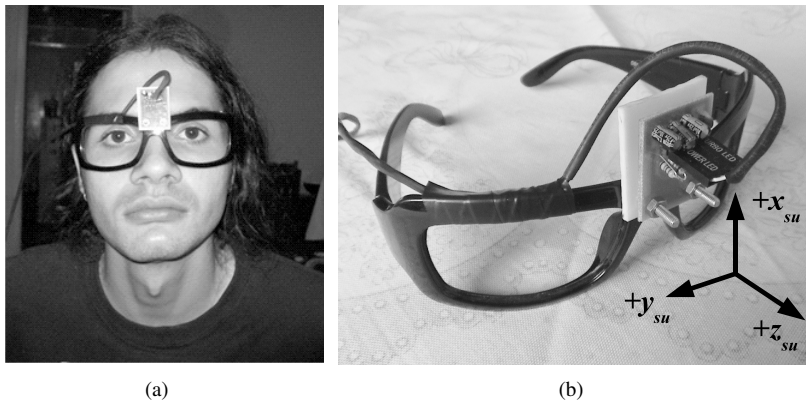


Figura 12. (a) ubicación de las gafas del usuario. (b) Sistema coordenado del acelerómetro ($+x_{su}$: dirección incremento x aceleración sensor usuario, $+y_{su}$: dirección incremento y aceleración sensor usuario, $+z_{su}$: dirección incremento z aceleración sensor usuario).

5. Pruebas realizadas y resultados

Se realizó una prueba con siete personas entre los 20 y 50 años de edad, de los cuales cinco eran hombres y dos eran mujeres, todos diestros, sobre el funcionamiento del ratón. Los sujetos no tenían entrenamiento previo. Todos fueron sentados frente a un computador

de escritorio con sistema operativo Windows® 7 de 64 bit, al cual previamente se había conectado el ratón. Aunque las personas que intervinieron en la prueba no tenían tretrapleja, se les indicó poner sus manos sobre las rodillas, mantener la espalda recta y no usar alguno de sus cuatro miembros para ayudarse en el manejo del ratón, simulando el comportamiento de una persona tetraplégica. Una segunda persona ponía las gafas plásticas a cada sujeto para iniciar la prueba.

La prueba consistió en ejecutar 20 veces cada una de las seis funciones del ratón, a saber, (1) desplazamiento a izquierda, (2) desplazamiento a derecha, (3) desplazamiento arriba, (4) desplazamiento abajo, (5) clic derecho y, (6) clic izquierdo. Se tomó nota de los errores involuntarios que se presentaban, por ejemplo, al hacer un clic izquierdo sin intención. Cada sujeto abrió y cerró ventanas, abrió y cerró documentos, o abrió y cerró programas desde el escritorio de Windows®. Se ha de resaltar que los sujetos adquirieron mayor destreza en el manejo del ratón después de algunos intentos de ejecutar cada una de sus funciones. En los primeros intentos, dos de los sujetos inconscientemente rotaban su cabeza, en lugar de inclinarla a izquierda o derecha, buscando el movimiento derecha-izquierda del cursor. El objetivo de la prueba era medir el porcentaje de desaciertos en la ejecución de cada una de las funciones del ratón y así validar los valores de los umbrales estimados en la sección 3.3. Los resultados obtenidos en la prueba con estas personas se resumen en la Tabla III.

Tabla III. Resumen de la prueba realizada con el ratón en un grupo de siete personas

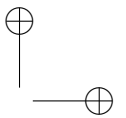
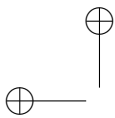
		Aciertos	Desaciertos	Porcentaje desaciertos	Valor umbral*
Movimiento cursor	Movimiento cabeza				
Arriba	Inclinación hacia atrás	136	4	2.86 %	64
Abajo	Inclinación hacia adelante	138	2	1.43 %	64
Izquierda	Inclinación hacia la izquierda	123	17	12.14 %	64
Derecha	Inclinación hacia la derecha	126	14	10.00 %	64
Clic					
Izquierdo	Movimiento rápido arriba-abajo	109	31	22.14 %	46
Derecho	Movimiento rápido izquierda-derecha	132	8	5.71 %	46

* Valor en decimal que corresponde al implementado en el firmware del microcontrolador

Independiente a la prueba anterior, sin medir porcentaje de desaciertos, también se verificó el funcionamiento de las seis funciones básicas del ratón en tres sistemas operativos en computadores diferentes:

1. En un computador portátil con Windows® XP SP3 de 32 bit.
2. En un computador de escritorio con Windows® 7 ultimate SP1 de 64 bit.
3. En un computador portátil con Ubuntu Linux 12.04 LTS de 32 bit.

En todos los casos, una vez el ratón era conectado al computador, y luego de algunos segundos de configuración, iniciaba su funcionamiento normal. En ningún caso se requirió la instalación de software adicional, ya que todos los sistemas operativos lo reconocieron como dispositivo compatible con HID, conexión en caliente (*hot plug-and-play*).



6. Conclusiones

Se diseñó e implementó un prototipo de ratón para personas que sufren algún tipo de discapacidad en sus cuatro miembros, con especial utilidad para aquellos usuarios que sufren de tetraplejía, de modo que puedan mover el cursor en la pantalla con solamente la proyección del movimiento de su cabeza.

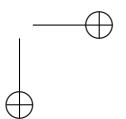
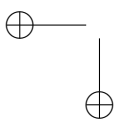
El ratón diseñado e implementado es completamente hardware con interfaz USB, ya que no necesita instalar software adicional para ser usado. Solamente son necesarios los controladores (*drivers*) que vienen por defecto en el sistema operativo bajo la clase HID. Se realizaron pruebas sobre Windows® XP (32 bit), Windows® 7 (64 bit) y Ubuntu Linux (32 bit) que verifican su funcionamiento sin necesidad de usar software adicional.

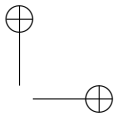
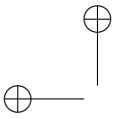
Se realizó una prueba sobre siete personas sin entrenamiento previo que muestra la necesidad de mayor ajuste en los umbrales de los algoritmos propuestos, principalmente para reducir el porcentaje de desaciertos en el clic izquierdo, de acuerdo con los resultados presentados en la Tabla III. Los porcentajes elevados en el clic izquierdo y movimientos izquierda-derecha del cursor podrían ser causados porque se supuso el mismo valor de umbral para ambos clics, y el mismo para todos los movimientos del cursor. Esta suposición podría no ser válida.

Otra posible causa de los valores elevados de desaciertos podría ser que en los primeros intentos de la prueba, dos de los sujetos inconscientemente rotaban su cabeza, en lugar de inclinarla a izquierda o derecha, buscando el movimiento izquierda-derecha del cursor. Aunque en principio la rotación parece más natural e intuitiva, no se implementó debido a que las proyecciones de la aceleración de la gravedad sobre los ejes de aceleración del acelerómetro no dan alguna información de este movimiento (Figuras 5(a)–5(b)).

El prototipo hace uso de dos sensores basados en acelerómetro ubicados en la cabeza del usuario y la pantalla del computador. La información es procesada por un microcontrolador que tiene interfaz hacia el computador mediante puerto USB. El sensor de usuario es ubicado sobre sus gafas, lo cual lo hace un método no-invasivo. Este sensor puede ser ubicado con una pinza plástica, pensando en personas que usan gafas permanentemente. El sensor de la pantalla se ubica con una pinza plástica, lo cual permite portar el ratón a computador sin dañar su pantalla.

Se propusieron cuatro algoritmos: los dos primeros para realizar el movimiento arriba-abajo del cursor, y los segundos para hacer el clic izquierdo y derecho. En cada algoritmo se introdujeron umbrales para determinar las zonas de descanso en el movimiento del cursor y para determinar cuándo hay un clic o no lo hay. Los valores de estos umbrales fueron estimados bajo consideraciones aproximadas, pero es necesario realizar un mejor ajuste, posiblemente estadístico, tomando una muestra representativa de la población objetivo.





7. Recomendaciones

Se recomienda el uso de los algoritmos para los movimientos arriba-abajo e izquierda-derecha, dado que se observó su utilidad para sacar el cursor de las esquinas y fronteras de la pantalla. En ocasiones el cursor queda ubicado en estos lugares, y es deseable poder ubicarlo en otra posición, por ejemplo, la mitad de la pantalla.

Aunque en los bytes 1 y 2 transmitidos al computador, a través del reporte HID para indicar el desplazamiento relativo en x y y sobre la pantalla, se pueden enviar números enteros entre -127 y $+127$, se recomienda el envío de los enteros -1 , $+1$ y 0 con los algoritmos propuestos. Esto debido a que se observó que otros valores enteros generaban “saltos” del cursor en la pantalla y era difícil mantenerle un seguimiento visual. También se recomienda el uso de estos valores dado que generan la menor velocidad posible de desplazamiento del cursor, y, por esto mismo, es cómodo para el usuario ubicar con precisión objetos en pantalla, como los botones para cerrar o abrir ventanas.

8. Trabajo futuro

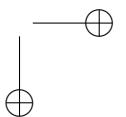
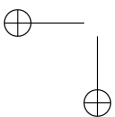
La estimación de los parámetros UCI y UCD necesita de mayor análisis. Aunque en la práctica los clics izquierdo y derecho funcionan, se observó que los valores propuestos ofrecen sensibilidad al movimiento. Se observó en la práctica que algunos movimientos, que se podrían considerar no-rápidos, fueron interpretados como clics. Por esto mismo se incurría en clics involuntarios. Se deben realizar pruebas con una muestra representativa de la población objetivo para sintonizar estos umbrales y mejorar el desempeño del ratón en la práctica.

Se puede realizar el rediseño del presente ratón usando solamente un acelerómetro. El desarrollo del trabajo sugirió que todo el diseño podría hacerse solamente con el sensor ubicado en la cabeza del usuario. Para esto se deben reformular los algoritmos para el movimiento izquierda-derecha y arriba-abajo del cursor en la pantalla presentados en la sección 3.1. Los algoritmos de clic izquierdo y clic derecho presentados en la sección 3.2 pueden ser los mismos, dados que solamente se basan en la información suministrada por el sensor del usuario.

Otro posible trabajo consiste en la conexión inalámbrica del sensor en las gafas del usuario con el microcontrolador que realiza la interfaz al computador. Al respecto se debe tener en cuenta que agregar un transmisor-receptor inalámbrico incrementa los costos del desarrollo comparados con el uso de un solo cable.

Se deben realizar propuestas para el manejo del *scroll* (normalmente una pequeña rueda ubicada en la parte superior de los ratones convencionales) y *doble-clic* del ratón, dado que la presente propuesta solamente se enfocó en el clic izquierdo y clic derecho.

Por recomendación de algunas de las personas que fueron sometidas a la prueba del ratón, como trabajo futuro se podría desarrollar un algoritmo que permita mover el cursor a diferentes velocidades, como un mouse convencional, dependiendo del grado de inclinación o rapidez del movimiento de la cabeza.

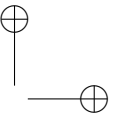
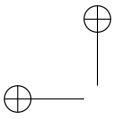


Referencias

- [1] J. C. Gómez Beltrán, *Identificación de las personas con discapacidad en los territorios desde el rediseño del Registro*, Departamento Administrativo Nacional de Estadística, abril de 2008.
- [2] T. Pallejà, E. Rubión, M. Teixidó, M. Tresanchez, A. Fernández del Viso, C. Rebate, & J. Palacín, “Ratón virtual relativo controlado con los movimientos de la cabeza,” en *Memorias del IX Congreso Internacional Interacción*, Albacete, España, Junio 2008, pp. 305–314.
- [3] F. A. Justo T. & I. n. Aguirre G., “Creación de una herramienta que permita mover el cursor de un computador a partir del movimiento ocular, utilizando técnicas de visión artificial,” en *Proceedings of the Seventh LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI 2009)*, San cristóbal, Venezuela, June 2009, pp. WE1–1–WE1–10.
- [4] E. L. González & J. C. García García, Juan Carlos Tulli, “Estudio de factibilidad de un mouse controlado por señales electrooculográficas,” en *Memorias del XV congreso argentino de bioingeniería*, 2008, pp. 1–4.
- [5] C. Arboleda Clavijo, E. García Cossio, & M. Palacio, “Control de mouse para computador mediante potenciales eléctricos oculares,” *Revista Ingeniería Biomédica*, no. 1, pp. 47–51, Mayo 2007, escuela de Ingeniería de Antioquia-Universidad CES, Medellín, Colombia.
- [6] D. Mahecha, F. Lozano, & E. García, “Control de mouse através de señales EOG y algoritmos de boosting,” en *Memorias del XIII simposio de Tratamiento de Señales, Imágenes y Visión Artificial (STSIVA 2008)*, vol. 2, 2008, pp. 57–60.
- [7] A. Torres, S. Gamboa, O. Hernández, A. Martínez, A. Pérez, W. Torres, J. Camas, M. Pérez, & H. Castañón, “Diseño de un mouse óptico facial para pacientes que presentan discapacidad parapléjica,” *Revista Cubana de física*, vol. 27, no. 1, pp. 23–27, 2010.
- [8] C. Gerdtmán & M. Lindén, “Development of a gyro sensor based computer mouse with usb interface as technical aid for disabled persons,” en *3rd European Medical & Biological Engineering Conference (EMBE’05)*, Prague, Czech Republic, November 2005.
- [9] S.-H. Lee & S.-H. Oh, “Kinect sensor based pc control interface for handicapped users,” en *Proceedings of the 1st International Conference on Convergence and its Application (ICCA 2013)*, Seoul, Korea, Jul. 2013, pp. 49–52.
- [10] —, “A kinect sensor based windows control interface,” *International Journal of Control and Automation*, vol. 7, no. 3, pp. 113–124, 2014.
- [11] D. A. Riaño Gómez, “Diseño e implementación de un prototipo de ratón hardware USB basado en proyección planar del movimiento de la cabeza,” Trabajo de grado en Ingeniería Electrónica, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Facultad de Ingeniería, Bogotá D.C., Colombia, May 2014.
- [12] C. A. Avizzano, P. Sorace, D. Checcacci, & M. Bergamasco, “Head tracking based on accelerometer sensors,” 2004, PERCRO, Scuola Superiore Sant’Anna. Unpublished manuscript.
- [13] J. Axelson, *USB complete. Everything you need to develop custom USB peripherals*, 3rd ed. Madison WI 53704: Lakeview Research LLC, 2005.
- [14] *PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet. 28/40/44-Pin, High Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nanoWatt Technology*, Microchip Technology Inc., 2007, document Number: DS39632D.
- [15] *MMA7260QT: XYZ axis accelerometer $\pm 1.5g/2g/4g/6g$* , Freescale Semiconductor, Mar. 2008, document Number: MMA7260QT. Rev. 5.
- [16] G. E. Grossman, R. J. Leigh, L. A. Abel, D. J. Lanska, & S. E. Thurston, “Frequency and velocity of rotational head perturbations during locomotion,” *Experimental Brain Research*, no. 70, pp. 470–476, 1988.
- [17] J. L. Melo, *Ergonomía práctica. Guía para la evaluación ergonómica de un puesto de trabajo*. Argentina: Fundación MAPFRE, 2009, ISBN 978-987-97960-6-1.

Danny Alexander Riaño Gómez

Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Especialista de atención a fallas en Colvatel-ETB. Correo electrónico: dlrianog@correo.udistrital.edu.co

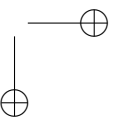
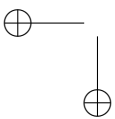


Omar Salazar Morales

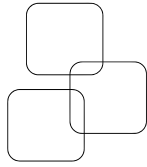
Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: osalazarm@correo.udistrital.edu.co

José Jairo Soriano Méndez

Ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Ingeniero químico de la Universidad Nacional de Colombia. Magíster en Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Docente de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Correo electrónico: jairosoriano@udistrital.edu.co



Artículo de Reflexión



Milton Mauricio Herrera Ramírez
Universidad Piloto de Colombia
Facultad de Ingeniería
Bogotá- Colombia
milton-herrera@ upc.edu.co

Javier Arturo Orjuela Castro
Universidad Distrital Francisco José de
Caldas
Facultad de Ingeniería
Bogotá- Colombia
jorjuela@ udistrital.edu.co



Perspectiva de trazabilidad en la cadena de suministros de frutas: un enfoque desde la dinámica de sistemas

Perspective of traceability in the food supply chain: An Approach from System Dynamics

Resumen

El presente artículo muestra un modelo causal desarrollado en dos niveles, uno general basado en el comportamiento dinámico de la cadena de suministro de frutas, y otro específico para la implementación de tecnologías de trazabilidad en la cadena. Surge de la necesidad de identificar la dinámica de la implementación de tecnologías de trazabilidad en la cadena de frutas. La hipótesis dinámica establecida fue: “El comportamiento dinámico de planeación e implementación de tecnología genera un efecto en la transformación, calidad, asignación de recursos, inventarios y trazabilidad del sistema (cadena de suministros frutícola)”.

El modelo causal fue obtenido a partir de una detallada y rigurosa revisión de la literatura y de estudios específicos del sector de frutas en Colombia sobre el tema de la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos a partir de las perspectivas de dinámica de sistemas, integración, optimización y tecnologías de trazabilidad. Existen pocos trabajos en trazabilidad con un enfoque como el abordado en este trabajo. El desarrollo permitió incluir, en los diagramas causales, una serie de factores no tenidos en cuenta en trabajos previos. Los resultados obtenidos a través del análisis causal propuesto, bajo la metodología de dinámica de sistemas, implican la inclusión del efecto de la implementación de tecnología de trazabilidad en la cadena de suministro de frutas y sus relaciones con la capacidad de inversión y la calidad de un producto.

Palabras claves: Trazabilidad, gestión e implementación de tecnología, cadenas de suministro, dinámica de sistemas, optimización, integración, frutas, alimentos.

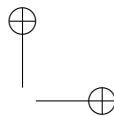
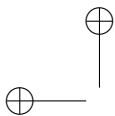
Abstract

This paper presents a causal model developed at two levels. The first one is based on the overall dynamic behavior of the fruit supply chain. The second one is a specific technologies model for implementing traceability in the chain. This model arises from the need to identify the dynamics in implementing traceability technologies for the fruit chain. The study was conducted under the following premise: “The dynamic behavior of planning and implementation of technology generates an effect on transformation, quality, resource allocation, inventory and a traceability system (fruit supply chain)”.

The causal model was obtained from a detailed and rigorous review of the literature and studies related to the fruit sector in Colombia, on the issue of traceability in the supply chain of food from the perspective of system dynamics, integration, optimization and tracking technologies. There are few studies with a focus on traceability as discussed in this paper. We remark that the developed causal diagrams include a number of factors not considered in previous works. The results obtained through the proposed causal analysis, under the methodology of system dynamics, implied the inclusion of the effect of the implementation of traceability technology in the supply chain of fruits and their relationships with investment capacity and quality of a product.

Palabras claves: Traceability, managing and implementing technology, supply chain, system dynamics, optimization, integration, fruits, food.

Recibido: 09-04-2014
Modificado: 21-07-2014
Aceptado: 11-10-2014



1. Introducción

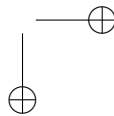
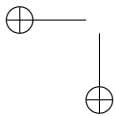
El origen de la visión de cadena de abastecimiento podría remontarse a Forrester [1] en su trabajo *Dinámica Industrial* (1958), complementado con Sterman [2] al proponer el juego de la cerveza estudiando el efecto látigo (*bullwhip*), lo que condujo a una visión sistémica [3]. De acuerdo con Oliver & Webber [4], la expresión *gestión de la cadena de abastecimiento* (SCM en inglés) aparece en la década de los ochenta y evoluciona rápidamente [5]. A partir de entonces muchos enfoques han aparecido, según Melnyk et al. [3].

En el sector frutícola, a pesar de las ventajas con las que el país cuenta frente a otros en términos de oferta de clima, suelo y de posición geográfica para el cultivo de frutas, se presentan problemas a lo largo de los eslabones de la cadena de abastecimiento por problemas relativos a las técnicas de cultivo, sobreoferta de producto, tecnología utilizada, estándares de calidad, sistemas de almacenamiento, transporte, costos logísticos y sistemas de seguimiento y control, que dejan rezagada la cadena frutícola colombiana frente a las de otros países latinoamericanos [6]. Durante el segundo trimestre de 2010, el sector de las frutas creció 10,4 %, exceptuando el banano, el cual presentó decrecimientos en 9,5 %. Según el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, el crecimiento en frutas está justificado por el incremento en las áreas sembradas y de los rendimientos [7].

La falta de trazabilidad en los procesos de la cadena de suministro genera pérdidas en calidad y producción. El seguimiento y control en los procesos de almacenamiento, distribución y transformación de la cadena de suministro es primordial para garantizar la calidad de los alimentos, especialmente en procesos con alta variabilidad. En este sentido, las tecnologías de trazabilidad permiten el control y seguimiento en los procesos de la cadena de suministro de alimentos. La implementación de tecnologías de trazabilidad necesita de una planeación adecuada, para ello es necesario abordar la complejidad del sistema. En este contexto, comprender la relación de variables que influyen en la implementación de tecnologías de trazabilidad en la cadena de suministros de alimentos requiere de un análisis sistémico que permita identificar relaciones que regulan su comportamiento.

El presente artículo desarrolla un modelo causal, obtenido a partir de una detallada y rigurosa revisión de la literatura y de estudios específicos del sector de frutas en Colombia. Este estudio surge de la necesidad de encontrar la dinámica de la cadena de frutas en lo que respecta a la trazabilidad. De los aportes generados por diversos autores que han abordado el tema de la trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos bajo la perspectiva dinámica de sistemas, integración, optimización y tecnologías de trazabilidad, se plantea una hipótesis dinámica que permite desarrollar el diagrama causal general para la cadena y específico para trazabilidad.

El capítulo dos presenta la metodología, tanto para la elaboración del estado del arte, como de la construcción del diagrama causal. El tercer capítulo desarrolla el estado del arte organizado en tres secciones, el desarrollo del concepto de trazabilidad, los enfoques desarrollados por investigadores, lo que permite acercarse a una taxonomía y concluye con las tecnologías usadas en trazabilidad. En el capítulo cuarto se presenta el modelado, el cual comprende un diagrama causal general de los factores de la cadena incidentes en la trazabilidad y el diagrama causal específico para la implementación.



2. Metodología

2.1. Revisión sistemática de literatura

La revisión sistemática de la literatura en la temática de *traceability* y *supply chain* se llevó a cabo a través de la construcción de un algoritmo de búsqueda y selección de descriptores de búsqueda en las siguientes bases de datos: *Science Direct*, *Scopus*, *Proquest* y *Emerald*. Las fórmulas de búsqueda fueron *Traceability Supply Chain*, *Optimization Traceability*, *Traceability technology Supply Chain*, *Traceability picking operation*, *Traceability food Supply Chain*, *Traceability Supply Chain fruit*.

La revisión bibliográfica permitió identificar la dinámica de la literatura relacionada (Figura 1). Desde el año 2004 hasta el 2008 se produce un incremento del número de publicaciones (70 %) en la temática de trazabilidad en las cadenas de suministro, y se estanca hasta el 2012.

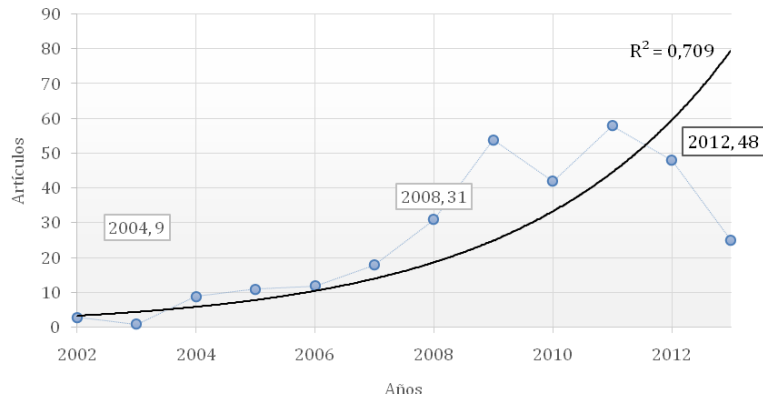


Figura 1. Tendencia histórica de publicaciones en la temática *traceability* y *supply chain*.

Fuente: elaboración propia a partir de *Scopus*.

En la Figura 2 se evidencia un incremento sostenido, desde 1992, de publicaciones sobre trazabilidad en cadenas de suministro. De la dinámica de publicaciones, destaca el aumento entre los años 2007 y 2011, con un 64,94 % con respecto al período inmediatamente anterior.

Se puede observar la importancia que genera la trazabilidad en la cadena de suministro. En esta vía, también son relevantes las publicaciones enfocadas en tecnologías de trazabilidad y optimización de procedimientos de trazabilidad (Figura 3). El uso de métodos de optimización que garanticen la trazabilidad en los procesos de la cadena de suministro es un tema que ha crecido de manera sostenible en las bases de datos.

Cada uno de los aspectos seleccionados (trazabilidad en la cadena de suministro, cadena de suministro de alimentos, tecnología, operaciones de alistamiento([*picking*] y optimización) es fundamental en la determinación y caracterización de procesos logísticos. En la Figura 4 se puede observar la trascendencia a nivel de publicaciones para los temas seleccionados con respecto a la trazabilidad de las cadenas de suministro.

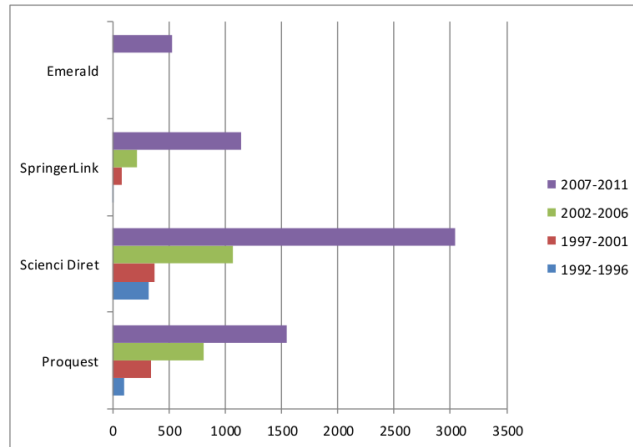


Figura 2. Dinámica de publicaciones en trazabilidad y cadena de suministro.

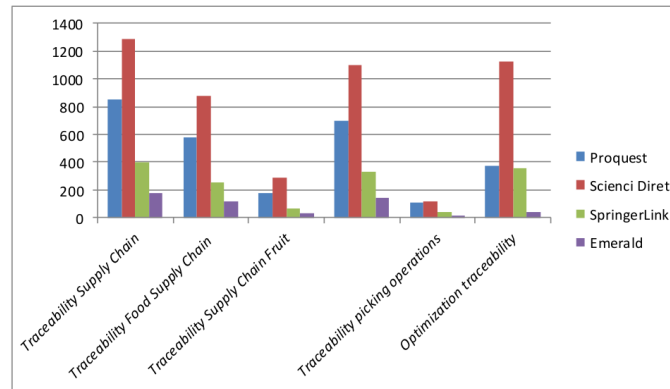


Figura 3. Dinámica de publicaciones por descriptores asociados a las bases de datos consultadas.

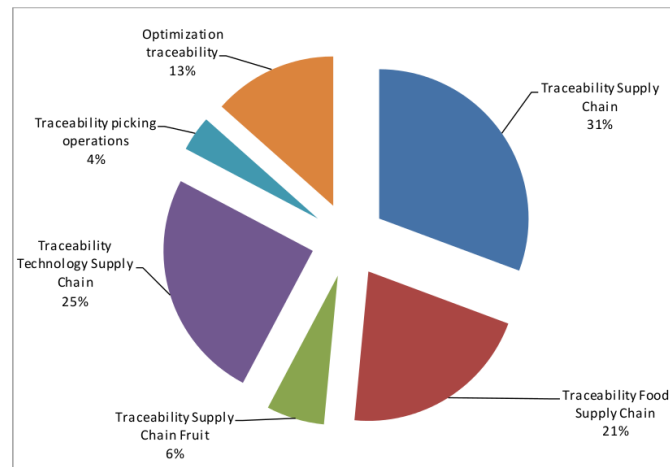


Figura 4. Participación porcentual de temas relacionados con la trazabilidad en las bases de datos consultadas.

La temática relacionada con trazabilidad y la cadena de suministro ocupa el primer lugar de importancia con el 31 % de artículos en esta categoría, seguido de la tecnología de trazabilidad en la cadena de suministro con el 25 % de artículos. Este último, favorecido en gran medida por el avance tecnológico en sistemas de trazabilidad de productos. Como lo señalan Herrera & Becerra [8], la perspectiva de la gestión de la tecnología en la cadena de suministros produce un efecto sistémico en cada uno de los elementos o empresas que intervienen. En cuarto lugar, se encuentra el tema relacionado con la optimización en la trazabilidad con un 13 % de publicaciones que contemplan la trazabilidad interna y externa de la cadena de suministros. En esta vía, las publicaciones relacionadas con las operaciones de picking y trazabilidad emplean métodos de optimización, y contribuyen con el 4 % de publicaciones.

2.2. Modelamiento causal

A partir de la revisión de la literatura y de estudios de la cadena de frutas, así como de la observación en tres empresas procesadoras de frutas, se estableció el diagrama causal, con la metodología propuesta por Sterman [9], en la que se determinan los siguientes aspectos para el modelado:

- a) Definición del problema
- b) Identificación de variables claves
- c) Desarrollo del diagrama causal a través del modelo de referencia (revisión literaria y observaciones y datos de compañías procesadoras de frutas).
- d) Especificación del alcance del diagrama.

Igualmente, se tuvieron en cuenta los aspectos propuestos por Argyris et al. [10], Morecroft & Sterman [11] y Kleiner & Roth [12].

3. Revisión de la literatura

3.1. Evolución del concepto

Existe una amplia variedad de definiciones sobre trazabilidad. La de mayor difusión es la propuesta por la *International Organization for Standardization* [13], que se relaciona con la capacidad para seguir históricamente una aplicación o localización de algo que esté bajo consideración u observación. Esta definición, de enfoque norteamericano, se ubica en el contexto del rastreo de un producto o servicio en un horizonte o línea de tiempo, sin tener en cuenta el sistema de trazabilidad particular. El reglamento de la Comunidad Europea (178/2002), por su parte, define la trazabilidad como la posibilidad de realizar un seguimiento en cada una de las etapas de transformación y distribución de un alimento o materia prima utilizada en la producción de alimentos con el fin de identificar el rastro generado en este proceso [14].

La definición propuesta por Golan et al. (citado por [15]) precisa la trazabilidad como un sistema de registro diseñado para rastrear el flujo de productos de una cadena de suministro. Adicionalmente, el sistema de trazabilidad fuera de ser un requisito mínimo de seguridad y control en los alimentos, también va más allá de los estatutos o normas que lo regulan en los diferentes países y genera valor en las compañías [16]. Los autores concuerdan en que la trazabilidad comprende el conjunto de procedimientos que permiten realizar el seguimiento y control de un producto en la cadena de suministro por medio de una herramienta tecnológica, aspecto importante en la cadena de suministro de alimentos.

Moe T. [17] plantea la primera perspectiva conceptual e importancia del tema de trazabilidad en las industrias alimenticias. Propone dos vertientes orientadas hacia el desarrollo conceptual y hacia las aplicaciones e implicaciones que se generan con trazabilidad. Andersen & Gutman [18] relacionan los conceptos de trazabilidad y seguimiento a través de herramientas y programas informáticos. Mousavi et al. [19] abordan la importancia del rastreo y trazabilidad y muestran las diferencias conceptuales de estos términos a través de un caso en las industrias procesadoras de alimentos cárnicos. Posteriormente, Skoglund & Dejmek [20] acuñan el término “trazabilidad difusa” para los productos procesados en la cadena de suministro frutícola, que presentan una dificultad de rastreo o seguimiento debido a la naturaleza del proceso.

Por otra parte, Alfaro et al. [21] analizan la implementación de procedimientos de trazabilidad en las materias primas del sector agroalimentario. En esta vía, la evolución cronológica en el tema de la trazabilidad para cadenas de suministro empieza a tomar importancia y trascendencia en las aplicaciones particulares en industrias alimenticias y en normatividad de los países desde el año 2005 con los trabajos de Langredo & Benito [14] y Lupie [22]. Estos trabajos son orientados a la implementación y normatividad de trazabilidad. En este sentido, Dessureault [15] realiza una evaluación de costos y beneficios de la implementación de un sistema de tecnología de trazabilidad. La evolución cronológica del concepto de trazabilidad se presenta en la Figura 5. Allí se muestra cómo se han gestado las diversas aplicaciones en la cadena de suministros y el enfoque planteado por algunos autores.

Tras la revisión de la literatura se evidencia la importancia del concepto de trazabilidad, los procedimientos de trazabilidad en la planeación de sistemas de seguimiento y rastreo, la implementación de tecnologías y su ámbito estratégico.

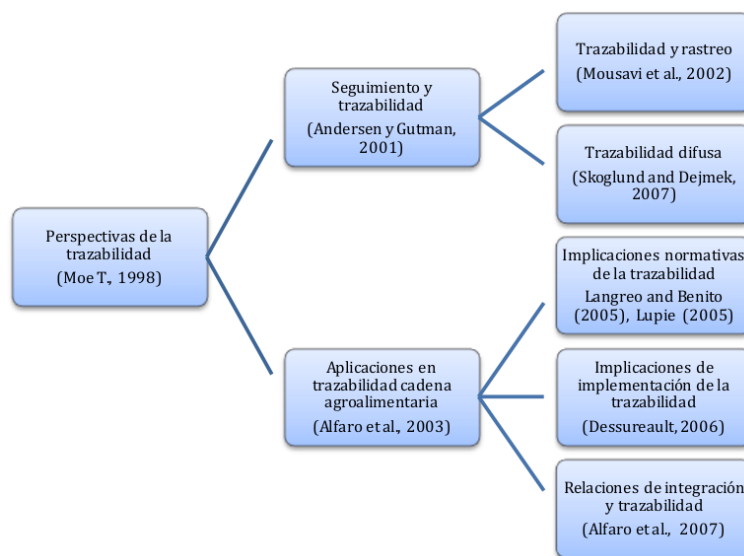


Figura 5. Enfoques o génesis cronológicos del concepto trazabilidad.

3.2. Enfoques en trazabilidad

Con base en el número de citas en la base de datos de *Scopus* se identificaron los artículos de mayor relevancia en los últimos cinco años, los cuales se presentan en la Tabla I. Esto podría considerarse una taxonomía de la temática. Se destaca el número de artículos orientados a la gestión de tecnología y a la estrategia de gestión de operaciones en trazabilidad.

Tabla I. Autores con mayor número de citas en los temas *traceability* y *supply chain*

Autor	Enfoque	Año / No de Citación
Barchetti, U., Bucciero, A., De Blasi, M., Mainetti, L., Patrono, L. [23]	Gestión de diversas tecnologías de trazabilidad	(2010) / 13
Wang, X., Li, D., Li, L. [24]	Estrategia de gestión de operaciones de trazabilidad	(2009) / 7
Zhao, L., Shengnan, S., Wang, X. [25]	Desarrollo de tecnología de rastreo y seguimiento	(2011) / 5
Hu, Z., Jian, Z., Shen, P., Xiaohuan, Z., Weisong, M. [26]	Modelamiento matemático a través de programación dinámica	(2009) / 4
Zhang, K., Chai, Y., Yang, S.X., Weng, D. [27]	Modelamiento matemático a través de redes neuronales, control difuso y análisis estadístico	(2011) / 3
Zhang, K., Chai, Y., Weng, D., Zhai, R. [28]	Desarrollo de tecnología de rastreo y seguimiento	(2010) / 3
Fenu, G., Garau, P. [29]	Estructura del sistema de trazabilidad	(2009) / 3
Hermosillo, G., Ellart, J., Seinturier, L., Duchien, L. [30]	Estrategia de gestión de operaciones de trazabilidad	(2009) / 3
Campos, J.G., Míguez, L.R. [31]	Estructura del sistema de trazabilidad	(2009) / 3

3.2.1. Enfoque con dinámica de sistemas

En la Tabla II se pueden identificar los estudios en la capacidad productiva (almacenes e inventarios), capacidad de innovación (tiempo de desarrollo e innovación), capacidad laboral y políticas públicas en seguridad alimentaria, en los cuales han sido contempladas estructuras causales. Estos estudios difieren de los modelos clásicos de optimización en la medida en que se agregan variables que hacen que el modelo tenga un enfoque o visión integral. Tal es el caso de la capacidad de innovación, no contemplado por los modelos económicos (indicadores financieros) ni de optimización clásica (programación dinámica).

Tabla II. Análisis de estructuras causales según dinámica de sistemas

Autor	Enfoque	Año	Loop declarados	Descripción
De Marco A., Cagliano A., Nervo M. y Rafele C. [32]	Gestión organizacional	2006	3	Efecto del flujo de órdenes sobre el inventario del almacén
				Efecto de las ventas sobre el inventario del almacén
				Efecto del staff Efecto del personal de Staff y el inventario
				Efecto del tiempo de etiquetado y el inventario en el almacén
Álvarez Y [33]	Políticas de innovación y desarrollo	2006	4	Efecto de precedencia de las actividades de un proyecto I+D
				Efecto del equipo de desarrollo del proyecto I+D
				Efecto del tiempo en la ejecución del proyecto I+D
				Efecto del tiempo de ejecución y factores financieros sobre la calidad del proyecto I+D
Mora A. y Davidsen P. [34]	Políticas de innovación y desarrollo	2006	9	Efecto de desarrollo de nuevos productos
				Efecto calidad del producto
				Efecto de la productividad laboral
				Efecto de la inversión de la capacidad productiva
				Efecto de inversión en investigación y desarrollo
				Efecto de las políticas de gobierno y diseño de capacidades
				Efecto de la capacidad de investigación
				Efecto de la interacción de la academia y la industria en la investigación
Efecto de acumulación de la capacidad de innovación				
Torres M. y Fernández R. [35]	Políticas de innovación y desarrollo	2011	2	Efecto de acumulación del capital físico
				Efecto de acumulación del capital humano y la tecnología

Continúa

Giraldo D., Betancur M. y Arango S. [36]	Seguridad alimentaria	2011	7	Efecto de nacimientos (poblacional)
				Efecto de muertes (poblacional)
				Efecto del precio y la producción de alimentos
				Efecto de adecuación de la tierra y suficiencia de alimentos
				Efecto de infraestructura
				Efecto de área de irrigación
				Efecto de degradación de la tierra (fertilizantes)
Posada J. y Franco C. [37]	Seguridad alimentaria	2011	6	Efecto de pobreza
				Efecto de intervención estatal
				Efecto de tributación
				Efecto de superación de políticas públicas
				Efecto de superación por políticas económicas
Orjuela J., Huertas I., Figueroa J., Kalenatic D. y Cadena K. [38]	Seguridad alimentaria	2011	18	Efectos de seguridad alimentaria
				Efecto políticas agropecuarias
				Efecto políticas energéticas

3.2.2. Enfoque de integración

Se ha desarrollado la integración en la cadena de suministro y sus implicaciones en la seguridad alimentaria y la inocuidad de los productos alimenticios. En este sentido, Alfaro et al. [21] realizan un trabajo en la cadena agroindustrial donde analiza la implementación de un sistema de trazabilidad. Posteriormente se desarrollan en el campo de la integración de la cadena de suministro y la trazabilidad una serie de trabajos ligados particularmente a la gestión de datos como instrumento de integración entre los actores de la cadena de suministro (Figura 6).

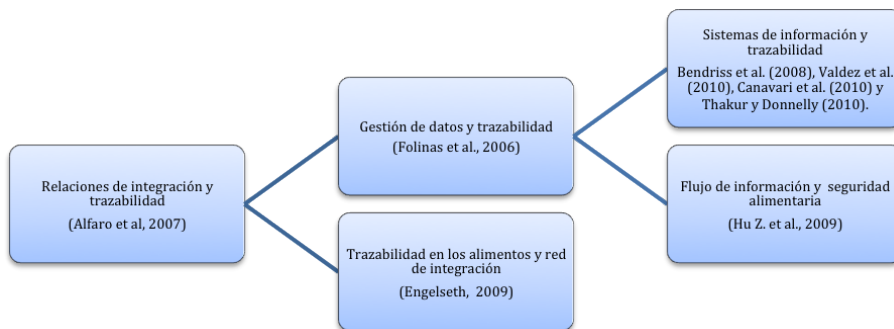


Figura 6. Evolución y enfoques en la relación de integración de la cadena de suministro y la trazabilidad.

La gestión de datos como instrumento de integración en la cadena de suministro es abordada por Folinas et al. [39], mientras el desarrollo y análisis de sistemas de información y trazabilidad en la cadena de suministros es estudiada por Bendriss et al. [40], Valdez et al. [41], Canavari et al. [16] y Takur & Donnelly [42]. Adicionalmente, se encuentra un modelo conceptual de integración de la cadena de suministros de productos alimenticios expuesto por Engelseth [43], Orjuela et al. [44] que aplica el enfoque integral en empresas de servicios y Kalenatic [45] y Herrera [46] que lo aplican en manufactura y gestión de tecnología, respectivamente.

3.2.3. Enfoque optimización

Si bien las investigaciones en trazabilidad conducen a la seguridad en los alimentos y a su calidad en la cadena de suministros, sólo algunos estudios han centrado sus esfuerzos en explorar la optimización o el uso de la investigación de operaciones para los procedimientos de trazabilidad de los alimentos en la cadena de suministros.

Trabajos como el de Dupuy et al. [47] en la industria de alimentos en Francia en un estudio de caso aplican técnicas de programación lineal entera mixta (MILP, su sigla en inglés), como propuesta de solución al problema de dispersión causada por el uso de la materia prima en diferentes productos en cada uno de los lotes de producción. El modelo planteado es demasiado extenso para la aplicación diaria y el seguimiento de cada uno de los parámetros y su alcance se encuentra limitado al análisis de la trazabilidad interna en una compañía. Thakur [48] realiza un modelo MILP que resuelve el problema de optimización de la trazabilidad de los productos y las materias primas utilizadas. El problema contempla múltiples materias primas mezcladas en el proceso de transformación de las pulpas de fruta. El propósito del modelo es mejorar la trazabilidad y minimizar el riesgo que pueden llegar a tener los productos obtenidos de una mezcla de diversas materias primas.

La diferencia entre los modelos planteados por Dupuy y Thakur consiste en que mientras el primero se enfoca en la trazabilidad interna (una compañía), el segundo aborda la trazabilidad externa (un conjunto de compañías) de la cadena de suministro.

Wang et al. [49] exponen un modelo de optimización para la trazabilidad y la planeación de operaciones en productos perecederos, a partir de un modelo de programación lineal entera mixta. Es importante resaltar que en este trabajo se presenta en la función objetivo el análisis del costo de un producto perecedero asociado a un riesgo de seguridad alimentaria en la materia prima. En esta misma vía, Hu et al. [50] estudian la transmisión del riesgo en los alimentos y proponen un modelo basado en la programación dinámica y programación entera en la industria china, donde destaca la trazabilidad en el flujo de información. Algunas de las técnicas utilizadas por los autores consultados para la optimización de los procedimientos de trazabilidad en la cadena de suministros se puede observar en la Tabla III.

Tabla III. Métodos en optimización empleados en trazabilidad en la cadena de suministro

Estudios	Año	Enfoques de Solución
Dupuy C., Botta-Genoulaz V., Guinet A.	2005	MILP
Hu Z., Jian Z., Ping S., Xiaoshuan Z. y Weisong M.	2009	Programación dinámica
Wang X., Li D. y O'Brien C.	2009	MILP
Hu Z., Jian Z., Ping S., Xiaoshuan Z. y Weisong M.	2009	Programación dinámica
Dabbene Fo y Gay Po	2010	MILP
Thakur M., Wang L. y Hurburgh C.	2010	MILP
Wang X., Li D. and O'Brien C.	2010	MILP
Tamayo S., Monteiro T. y Sauer N.	2011	Algoritmos genéticos

Los trabajos realizados en el campo de la trazabilidad de la cadena de suministro se encuentran orientados hacia la seguridad y la calidad de los alimentos. Rijswijk y Frewer [51] presentan un estudio sobre la perspectiva del consumidor en Europa relacionado con la calidad de los alimentos y la trazabilidad percibida. Los resultados del estudio permiten concluir que el consumidor sugiere que el aspecto de trazabilidad es importante y que genera un valor agregado en los productos que la poseen. El trabajo realizado por Kher et al. [52] muestra las ventajas y desventajas de la trazabilidad para alimentos en Europa, los efectos de mitigación del riesgo alimentario y la importancia de las tecnologías de trazabilidad en la cadena de suministro de alimentos. En este sentido, otros autores desarrollan modelos conceptuales que presentan variables que relacionan la trazabilidad y la cadena de suministro de alimentos [53] [54].

En la Figura 7 se presenta una taxonomía de los métodos empleados para el mejoramiento de los procedimientos de trazabilidad a partir de diferentes autores. Se identifica que el método de mayor uso es la MILP. Igualmente se puede observar el uso de los modelos conceptuales o estructuras que permiten un mejoramiento en los procesos de trazabilidad en la cadena de suministro.

Del total de métodos o técnicas utilizadas en el estudio y mejoramiento de la trazabilidad en la cadena de suministros (Figura 8), el método de mayor uso en optimización es la MILP, que representa 31 % y se evidencia una tendencia hacia el uso de modelos conceptuales encaminados a fortalecer los procesos de trazabilidad en la cadena de suministros.

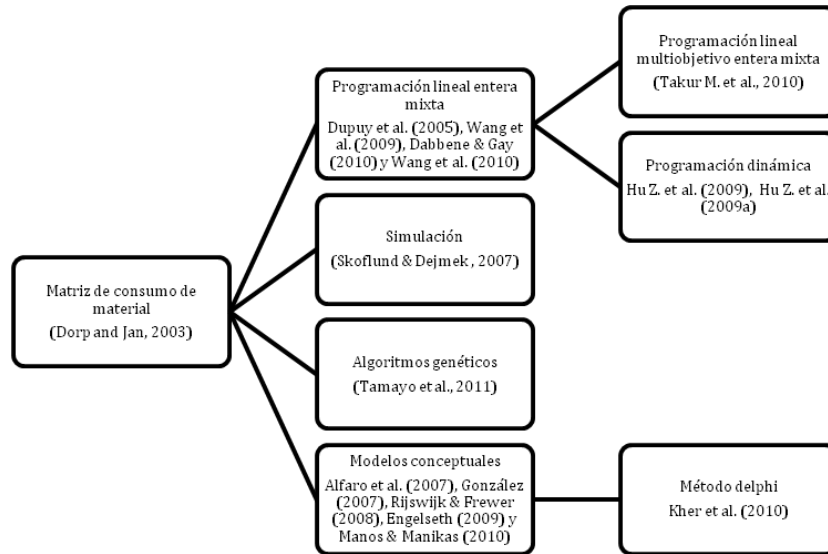


Figura 7. Evolución de los métodos de mejoramiento empleados en trazabilidad de la cadena de suministro.

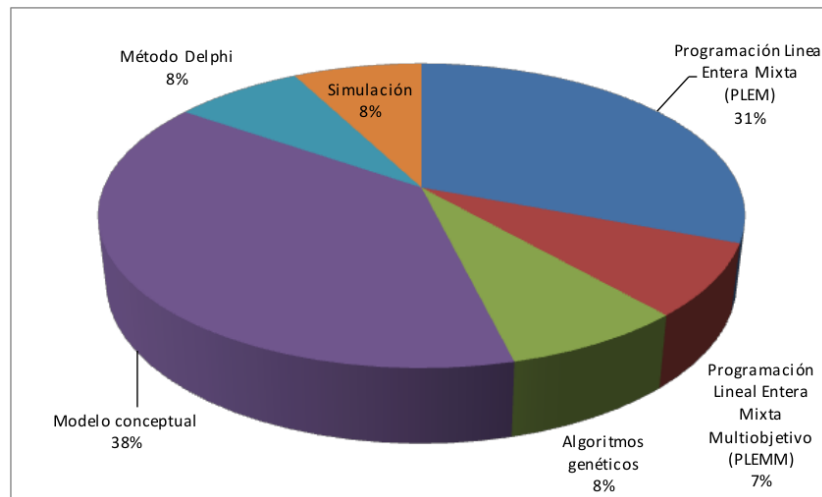


Figura 8. Porcentajes de métodos de mejoramiento utilizados en la trazabilidad de la cadena de suministro.

Se destaca el modelo planteado por Takur M. [48], basado en programación multiobjetivo entera mixta, debido a que brinda una alternativa para la toma de decisiones en los casos en donde el producto se encuentra a granel y la trazabilidad difusa del proceso cobra un nivel de importancia en la cadena de suministros frutícola. Otra es la tendencia enfocada al uso de la simulación, algoritmos genéticos y métodos Delphi, como herramienta para el análisis y toma de decisiones para procedimientos de trazabilidad. Esto debido al auge en estas técnicas y a su creciente desarrollo en varios campos de aplicación.

La aplicación de modelos de optimización de trazabilidad orientados hacia la cadena de suministro se basa en tres claves, como lo expone Karwowski y Evans (citado por [54]). La primera es la imprecisión y vaguedad en los problemas de toma de decisiones que no con-

templán la experiencia. La segunda se relaciona con los valores (constantes) utilizados en los modelos de programación lineal que pueden ser vagos e imprecisos. Finalmente, las opiniones subjetivas en los modelos de optimización pueden moderar el valor de la información en calidad y cantidad.

Hasta este momento, las aplicaciones de los modelos clásicos de optimización del sistema de trazabilidad en la cadena de suministros, aunque ha sido una buena alternativa de solución en los aspectos de trazabilidad, no contemplan la complejidad de la implementación de la gestión de tecnología de trazabilidad. A continuación se desarrolla una propuesta de un modelo que contempla varios aspectos (efectos) que se pueden generar en la implementación de tecnología de trazabilidad.

3.3. Tecnologías de trazabilidad en la cadena de suministro

Las tecnologías que apoyan las cadenas de suministro han sido una de las herramientas clave en el proceso de toma de decisiones de las compañías. Entre las tecnologías de trazabilidad y automatización de mayor uso se encuentran: los códigos de barra, lectores de caracteres ópticos, intercambio electrónico de datos (EDI, sus siglas en inglés) y la identificación de datos por radiofrecuencia (RFID, sus siglas en inglés).

Los códigos de barras tienen como propósito controlar y realizar un seguimiento en los productos que fluyen al interior de una organización a través de la estandarización de la información. Con la codificación binaria que contiene una serie de información define el producto y lo caracteriza. Otra de las herramientas tecnológicas utilizada en la trazabilidad de los productos en una cadena de suministro está relacionada con los lectores de caracteres ópticos. Esta herramienta tecnológica captura o distingue los datos por medio de un haz de luz sobre la ubicación determinada de un documento o producto.

Por otra parte, existe la tecnología RFID, la cual se caracteriza por tener un sinnúmero de aplicaciones [55] [56]. Se encuentran investigaciones en donde se identifica la efectividad y eficiencia de las aplicaciones de la tecnología de trazabilidad RFID en la cadena de suministro. Según Bendavid [57], el impacto causado por RFID en la cadena de suministro ha permitido el rastreo, identificación y gestión de cada producto en tiempo real con mayor flexibilidad y confiabilidad.

Las aplicaciones con RFID en los procesos de gestión de la cadena de suministros, según Sabbaghi y Vaidyanathan [58], se han dado en la gestión de la demanda, órdenes de pedidos, gestión del flujo en manufactura y gestión del retorno (logística reversa). La implementación de un sistema RFID en determinada cadena de suministro requiere la integración con otros sistemas tecnológicos que soporten las operaciones productivas. La importancia de los sistemas RFID en la cadena de suministro marca diferencias estratégicas al proporcionar valor a lo largo del flujo del producto según Canavari [16], Sabbaghi y Vaidyanathan [58] y Bendavid [57].

Según Jones [59], el incremento en el uso de RFID ha sido significativo en países como Estados Unidos, Italia, Francia, Portugal y Noruega, donde se ha aplicado al control nuclear,

inventarios, trazabilidad de vuelos manufactura, entre otros. Debido a su crecimiento, se ha presentado una disminución en el precio de adquisición de esta tecnología en el mercado. Por tanto, ha servido como herramienta de trazabilidad en la cadena de suministro a un bajo costo.

El trabajo propuesto por De Marco et al. [32] desarrolla un modelo de dinámica de sistemas que evalúa la implementación de sistemas de trazabilidad RFID aplicados a operaciones de ventas al por menor (*retail*). En contraste, Chen [60] realiza un modelo bajo la perspectiva de dinámica de sistemas para comprender la adopción de tecnologías RFID.

En comparación con el modelo propuesto por De Marco y Chen, los autores de este artículo muestran la dinámica del sistema de una forma integral como aporte de conocimiento, que tiene en cuenta tres niveles dentro de la cadena de suministro frutícola: recepción de materia prima, transformación y despacho de productos procesados. El modelo también se apoya en los estudios de Kalenatic et al, [61] donde se muestra la relación sistémica entre el sistema logístico y el sistema de gestión de tecnología de las compañías a través de subsistemas de apoyo en las actividades logísticas.

4. Modelado: dinámica del sistema

Con base en la revisión del estado del arte, y en estudios del sector alimentario, desde la perspectiva de dinámica de sistemas se desarrolló un modelo causal que permite revisar la dinámica de tecnología de trazabilidad en la cadena de suministro frutícola y su análisis para la implementación. En él se incluyen los elementos conceptuales de las observaciones realizadas en tres organizaciones procesadoras de frutas, así como los enfoques teóricos que han abordado el tema con diferentes estructuras causales (Tabla II).

De los capítulos anteriormente presentados se identifican como aspectos asociados a las dinámicas y problemas en la cadena de suministro frutícola los desplegados en la Figura 9.



Figura 9. Aspectos destacados en la dinámica de la trazabilidad en la cadena de suministro frutícola.

4.1. Diagrama causal general

Con el análisis de las estructuras y del sector de frutas procesadas en Colombia se propone una estructura del diagrama causal como se observa en la Tabla IV [62]. En ella se incluyen efectos de retroalimentación no contemplados en investigaciones anteriores, en complemento con lo desarrollado por los enfoques presentados en la revisión de la literatura.

Tabla IV. Estructura diagrama causal propuesto

Nivel	Efectos de realimentación	Variables	Característica de medida
Nivel 1 (recepción de materia prima)	Efecto de implementación de tecnología de trazabilidad	Implementación tecnológica	Tiempo de implementación, recurso humano, técnico.
		Ciclo de vida del producto	Fecha de vencimiento de materia prima
		Índice de trazabilidad	Tiempo, posición geográfica del proveedor
		Índice de riesgo de contaminación	Evaluación del riesgo (porcentajes)
		Proveedor	Número de proveedores, tipología de proveedor.
		Alistamiento	Tiempo de <i>picking</i>
	Efecto de inventarios materia prima y calidad	Capacidad de inversión tecnológica	Recurso financiero utilizado en implementar tecnología
		Infraestructura (almacenamiento)	Espacio de almacenamiento (m^3)
		Cantidad de M.P.	Cantidad de componentes o materia prima utilizada
		Especificaciones producto	Características técnicas del producto
Tamaño del lote		Cantidad de unidades consolidadas	
	Cientes	Número de clientes	
Nivel 2 (transformación)	Efecto de implementación de tecnología de trazabilidad	Índice de trazabilidad	Tiempo, posición geográfica del proveedor
		Implementación tecnológica	Tiempo de implementación, recurso humano, técnico.
		Proveedor	Número de proveedores, tipología de proveedor.
		Alistamiento	Tiempo de <i>picking</i>
	Efecto de flujo de producción y recurso humano	Índice de trazabilidad	Tiempo, posición geográfica del proveedor
		Demanda	Número de unidades demandadas de producto procesado
		Ventas	Número real de productos procesados finales vendidos
		Ordenes de producción	Flujo de ordenes de producción
		Productividad laboral	Indicador de recurso humano utilizado
		Capacidad productiva (infraestructura)	Recurso productivo (tecnología empleada)
	Implementación tecnológica	Tiempo de implementación, recurso humano, técnico.	

Continúa

		Especificaciones producto	Características técnicas del producto
		Procesamiento de frutas	Tiempo empleado en el procesamiento
		Clientes	Número de clientes
		Capacidad de aprendizaje (<i>Know Why</i>)	Curva de aprendizaje adoptada para el recurso humano empleado
		Capacidad de conocimiento (<i>Know How</i>)	Curva de conocimiento adquirida para el recurso humano empleado
		Efecto de almacenamiento	Almacenamiento en proceso
Procesamiento de frutas	Tiempo empleado en el procesamiento		
Alistamiento	Tiempo de <i>picking</i>		
Nivel 3 (despacho de productos procesados)	Efecto de implementación de tecnología de trazabilidad	Implementación tecnológica	Tiempo de implementación, recurso humano, técnico.
		Ciclo de vida del producto	Fecha de vencimiento de producto terminado
		Índice de trazabilidad	Tiempo, posición geográfica del cliente
		Índice de riesgo de contaminación	Evaluación del riesgo (porcentajes)
		Clientes	Número de clientes
		Alistamiento	Tiempo de <i>picking</i>
		Capacidad de inversión tecnológica	Recurso financiero utilizado en implementar tecnología

La pregunta para abordar el modelo es ésta: ¿Cómo son las relaciones y la causalidad de la cadena frutícola colombiana en la gestión e implementación de tecnologías de trazabilidad en su cadena de suministro?

La hipótesis dinámica para la cual se plantea el modelo causal es la siguiente: el comportamiento dinámico de planeación de tecnología genera un efecto implícito en la implementación de tecnología y éste, a su vez, en la transformación, calidad, asignación de recursos, inventarios y trazabilidad del sistema (cadena de suministros frutícola).

El diagrama causal propuesto para el análisis del comportamiento dinámico de implementación de tecnología de trazabilidad en la cadena de suministro frutícola se expone en la Figura 10. Este diagrama contempla el enfoque integral de los modelos para la trazabilidad en la cadena de suministros de alimentos (véase Figura 6) y es una nueva alternativa para entender el comportamiento y tomar decisiones en contraste con los métodos estudiados en la Figura 7, de optimización clásica. El diagrama causal incluye los factores y elementos encontrados en las tablas II y IV.

Se plantea en los tres niveles un enfoque transversal relacionado con la implementación de tecnología identificada en cuatro efectos principales que determinan el comportamiento dinámico del sistema de la Figura 10.

El diagrama causal propone tres niveles de la cadena de suministro frutícola (recepción de materia prima, transformación y despacho de producto procesado o terminado). Cada uno de los cinco efectos propuestos se encuentra inmerso en el comportamiento dinámico de las etapas de la cadena de suministro frutícola propuesto en la Tabla IV. Los efectos son:

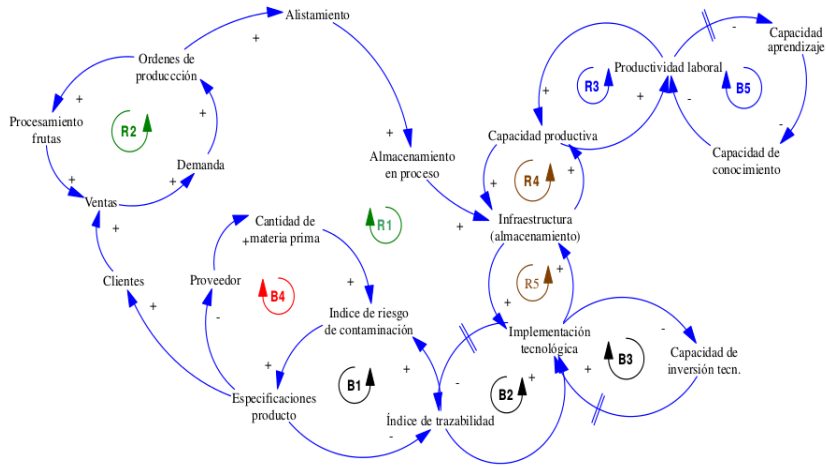


Figura 10. Diagrama causal de evaluación de tecnología de trazabilidad en la cadena de suministro frutícola.

1. Efecto de implementación de tecnología de trazabilidad, identificados con un flujo de realimentación (*loop* o *feedback*) B1, B2 y B3.
2. Efecto de inventarios de materia prima y calidad, identificados con un flujo de realimentación (*loop*) B4.
3. Efecto de flujo de producción, almacenamiento y demanda, identificados con un flujo de realimentación (*loop*) R1 y R2.
4. Efecto de recurso humano, identificado en el flujo de realimentación (*loop*) R3 y B5.
5. Efecto de capacidad productiva, identificado por el flujo de realimentación (*loop*) R5 y R4.

A continuación se analiza el efecto de implementación de tecnología de trazabilidad desde una perspectiva de la realimentación del sistema propuesto desde el enfoque sistémico.

4.2. Diagrama causal: efecto de implementación de tecnología de trazabilidad

Específicamente, la composición del sistema dinámico que representa el efecto de la implementación de tecnología de trazabilidad se puede observar en la Figura 11. Cada uno de los loops (flujos de realimentación) de este comportamiento se puede identificar y caracterizar de la siguiente forma:

B1: Presenta el ciclo de control o balance de los índices de trazabilidad. Los índices de trazabilidad están enmarcados en el ámbito geográfico (ubicación) y tiempo de control o seguimiento. Por tanto, estos índices determinan la disminución en los índices de riesgo de contaminación de los alimentos, y generan un efecto que incrementa el ciclo de vida del producto (especificaciones) reflejado en la fecha de vencimiento de un alimento. Este efecto de incremento en el ciclo de vida favorece positivamente el índice de trazabilidad.

- B2: Presenta el ciclo de balance de los índices de trazabilidad e implementación de tecnología. Los indicadores de trazabilidad en las compañías de procesamiento frutícola se encuentran limitados por la implementación de tecnología de trazabilidad. Lo anterior, debido al tiempo (demora) que transcurre entre la implementación tecnológica y los efectos de mejoramiento en el proceso.
- B3: Presenta el ciclo de balance del efecto de implementación de tecnología. La implementación de tecnologías de trazabilidad depende de la capacidad de inversión con la cual dispone una compañía. Por tanto, la inversión de tecnología es demorada, lo cual influye en el incremento de la cantidad de tecnologías de trazabilidad implementadas.

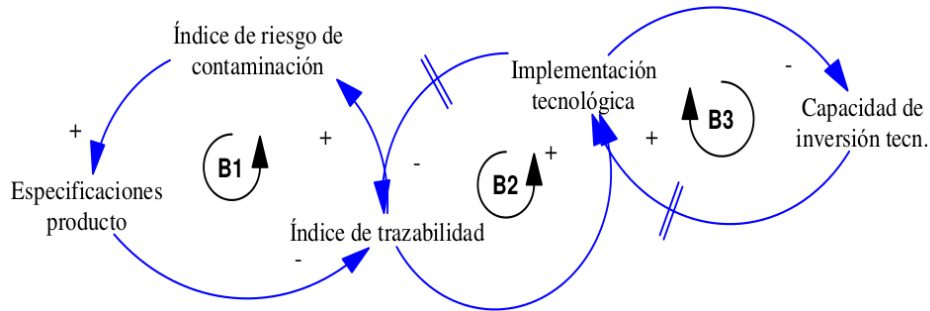


Figura 11. Diagrama causal de implementación de tecnología de trazabilidad.

El diagrama causal de la Figura 11 en complemento con el general Figura 10, como punto de partida, permitirá en un trabajo futuro establecer la simulación mediante dinámica industrial.

5. Conclusiones

La evolución del concepto de trazabilidad ha generado el desarrollo de técnicas que han adoptado modelos conceptuales y modelos matemáticos para la toma de decisiones, entre los que se destacan modelos abordados a través de la metodología de dinámica de sistemas, ya que desarrollan composiciones entre las variables de forma sistémica para la toma de decisiones integrales a nivel empresarial.

En efecto, el concepto de trazabilidad ha permeado los sistemas logísticos de las compañías que se involucran en procesos de mejora continua y control de calidad en los productos. La concepción del término trazabilidad para la cadena de suministro se ha enfocado en un carácter de integralidad y seguridad alimentaria que genera un impacto en las normatividades que se elaboran en este sentido. Igualmente, términos asociados con la integración han permeado los modelos de optimización elaborados, lo que ha conllevado la aplicación de programación lineal multiobjetivo para analizar los problemas de trazabilidad difusa en la mezcla de materias primas en los productos procesados de frutas. La tendencia encontrada en la revisión bibliográfica muestra la relevancia del tema de trazabilidad, en la integración y seguridad alimentaria de la cadena de suministros de alimentos.

La Importancia de los modelos conceptuales de trazabilidad y su evolución, abordada a través de los modelos de optimización y con dinámica de sistemas, evidencian la trascendencia que las compañías le están otorgando al tema, como un elemento de competitividad ante los diferentes retos mundiales de economías globalizadas.

En consecuencia, se hace necesaria la planeación de tecnología con un enfoque sistémico, que proporciona estrategias adecuadas en la toma de decisiones, a la hora de realizar un proceso de sustitución tecnológica en las operaciones de trazabilidad interna de la cadena de suministro frutícola. Por tanto, el análisis causal de la capacidad de inversión de tecnología como bucle dominante del sistema de implementación de tecnología es un aspecto importante que regula el comportamiento de la inclusión de tecnología de trazabilidad y por ende el mejoramiento de las características de rastreo y seguimiento, enmarcadas en la calidad del producto de la cadena de suministros de alimentos.

Por su parte, en el diagrama causal propuesto se incluyen elementos no contemplados por estudios anteriores, la inclusión de tres niveles y cinco enfoques, en el problema de la trazabilidad en la cadena de frutas, lo cual permite identificar la dinámica del comportamiento de la cadena. De la misma manera, la inclusión de los tres ciclos *loop* en el problema de implementación de tecnología para trazabilidad es una propuesta novedosa.

La relación de los actores de la cadena de suministro frutícola se enmarca en diferentes dinámicas que regulan su comportamiento. Por consiguiente, la decisión de cambios e implementación de tecnologías de trazabilidad en la cadena de suministro alimentaria requiere de modelos orientados al análisis integral de las relaciones y flujos entre los actores de la cadena. En este sentido, la dinámica del mercado de tecnologías para la trazabilidad en la cadena de suministro presenta un crecimiento que genera impactos en la mejora de los flujos de material, información, capital, recurso humano y dinero.

6. Trabajos futuros de investigación

La propuesta en este artículo puede derivar en el futuro el desarrollo de modelos de simulación con dinámica de sistemas o industrial, que permitan analizar el comportamiento de implementación de tecnología de trazabilidad que contemplen los diferentes flujos propuestos por Forrester en 1965. Adicionalmente, el desarrollo de simulaciones de diferentes tecnologías de trazabilidad que permitan, bajo ciertas variables, realizar el análisis del comportamiento de implementación tecnológica en una organización y se puedan medir las políticas de gestión de tecnología.

Así mismo, se requiere de modelos innovadores abordados a través de técnicas de optimización clásica y dinámica de sistemas para resolver problemas que contemplen la gestión de tecnologías de trazabilidad difusa, en donde la mezcla de materias primas sea determinante

en la calidad y trazabilidad de un producto en la cadena de suministros alimentaria, a fin de generar políticas de gestión de tecnología y calidad alimentaria.

Referencias

- [1] Forrester, J. W. Industrial Dynamics: A Major Breakthrough for Decision Makers. *Harvard Business Review*, 36 (4), 37-66, 1958.
- [2] Sterman, John D. Modeling Managerial Behavior: Misperceptions of Feedback in a Dynamic Decision Making Experiment. *Management Science*, Vol. 35, N° 3, pp. 321-339. 1989.
- [3] Melnyk, S., Lummus, R., Vokurka, R., & Burns, L. Mapping the future of supply chain management: a Delphi study. *International Journal of Production Research*, 47 (16), 4629-4653. 2009.
- [4] Oliver, R. K., & Webber, M. D. Supply chain management: logistics catches up with strategy. *Logistics: the strategic issues*, 63-75. 1982.
- [5] Lummus, R. R., & Vakurka, R. J. Defining supply chain management: a historical perspective and practical guidelines. *Industrial Management & Data Systems*, 99 (1), 11-17. 1999.
- [6] Orjuela C, J. A., Calderón, M. E., & Buitrago, S. Cadena Agroindustrial de Frutas en Colombia. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital de Colombia. 2006.
- [7] Castañeda M, I., Canal R, J. L., & Orjuela C, J. A. Caracterización de la logística de la cadena de abastecimiento agroindustrial frutícola en Colombia. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá: Facultad de Ingeniería. 2012.
- [8] Herrera R., M. y Becerra F., M. Perspectiva de gestión de tecnología en redes logísticas. 8º Encuentro Colombiano de Dinámica de Sistemas, 2010.
- [9] Sterman, John D. *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a complex world*. McGraw Hill. 2000.
- [10] Argyris, C., R. Putnam, and D. Smith. *Action Science: Concepts, Methods, and Skills for Research and Intervention*. San Francisco: Jossey-Bass. 1985.
- [11] Morecroft, J. and J. Sterman, *Modeling for Learning*. Portland, OR: Productivity Press. 1994.
- [12] Kleiner, A. and G. Roth. How to make experience your company's best teacher, *Harvard Business Review* 75(5), 172-177. 1997.
- [13] International Organization for Standardization-ISO. Norma Internacional ISO 9000, Sistema de gestión de la calidad Fundamentos y vocabulario. Ginebra, 2005.
- [14] Langreo Navarro, A. and I. Benito García. Efectos de la aplicación de la trazabilidad y la normativa de higiene en la cadena de producción de alimentos. *Distribución y consumo*, 79, 2005.
- [15] Dessureault, S. An assessment of the business value of traceability in the Canadian dairy processing industry. University of Guelph, 2006.
- [16] Canavari, M., et al. Traceability as part of competitive strategy in the fruit supply chain. *British Food Journal*, 112(2): p. 171-186, 2010.
- [17] Moe, T. Perspectives on traceability in food manufacture. *Trends in Food Science & Technology*, 1998.
- [18] Andersen, K. and Gutman, J. Seguimiento y trazabilidad base de las cadenas de suministro. *Revista ABB*, 2001.
- [19] Mousavi A., Sarhadi M., Lenk A. and Fawcett S. Trunking and traceability in the meat processing industry a solution. *British Food Journal*, 2002.
- [20] Skoglund T. and Dejmeck P. Fuzzy Traceability: A process simulation derived extension of the traceability concept in continuous food processing. *Food and Bioproducts Processing*, 2007.
- [21] Alfaro, J., L. Rabade, and J. Alvarez. Relaciones de integración empresa-proveedor: influencia de la trazabilidad. *Universia Business Review*, 2007.
- [22] Lupie John. Food Quality and Safety: traceability and Labeling. *Critical Review in Food Science and Nutrition*, 2005.
- [23] Barchetti, U., Bucciero, A., De Blasi, M., Mainetti, L., Patrono, L. RFID, EPC and B2B convergence towards an item-level traceability in the pharmaceutical supply chain. *Proceedings of 2010 IEEE International Conference on RFID-Technology and Applications, RFID-TA 2010*, art.no. 5529939, pp. 194-199, 2010.
- [24] Wang, X., D. Li, and C. O'Brien. Optimisation of traceability and operations planning: an integrated model for perishable food production. *International Journal of Production Research*, 47(11): p. 2865-2886, 2009.

- [25] Zhao, L., Shengnan, S., Wang, X. Tracking and traceability system using livestock Iris code in meat supply chain. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 7 (5 A), pp. 2201-2212, 2011
- [26] Hu, Z., et al. Modeling Traceability Information Flow for Meat Food Quality Safety. in *International Conference on Automatic Control, Modelling and Simulation*, 2009.
- [27] Zhang, K., Chai, Y., Yang, S.X., Weng, D. Pre-warning analysis and application in traceability systems for food production supply chains. *Expert Systems with Applications*, 38 (3), pp. 2500-2507, 2011
- [28] Zhang, K., Chai, Y., Weng, D., Zhai, R. Analysis and design of information traceability system for pork production supply chain. *NongyeGongchengXuebao/Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 26 (4), pp. 332-339, 2010.
- [29] Fenu, G., Garau, P. RFID- based supply chain traceability system. *IECON Proceedings (Industrial Electronics-Conference)*, art. no. 5415251, pp. 2672-2677, 2009.
- [30] Hermosillo, G., Ellart, J., Seinturier, L., Duchien, L. A traceability service to facilitate RFID adoption in the retail supply chain. *RFID Technology Concepts, Applications, Challenges - Proceedings of the 3rd International Workshop on RFID Technology - Concepts, Applications, Challenges IWRT 2009 In Conjunction with ICEIS 2009*, pp. 49-58, 2009.
- [31] Campos, J.G., Míguez, L.R. Manufacturing traceability data management in the supply chain. *International Journal of Information Technology and Management*, 8 (3), pp. 321-339, 2009.
- [32] De Marco, A. et al. "Using system dynamics to assess the impact of RFID technology on retail operations." *International Production Economics*, 135(9): p: 333-344, 2012.
- [33] Álvarez, Y. Análisis dinámico de un proyecto de investigación y desarrollo. *Revista de Dinámica de Sistemas*. 2006.
- [34] Mora, A. and Davidsen, P. An investigation of the innovation performance in the capital goods sector in Colombian: using the system dynamic approach. *Revista de Dinámica de Sistemas*. 2006.
- [35] Torres, M. and Fernández, R. Un enfoque sistémico sobre el proceso de crecimiento: la convergencia en el largo plazo. *Revista de Dinámica de Sistemas*. 2006.
- [36] Giraldo, D., Betancur, M. and Arango, S. Effects of food availability policies on national food security: Colombian case. *The 29th International Conference of the System Dynamics Society*. 2011.
- [37] Posada J. Y Franco C., *Acercamiento desde el enfoque sistémico a la problemática de seguridad alimentaria en la ciudad de Medellín: políticas para la superación*, VIII Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas, 2010.
- [38] Orjuela, Javier. Huertas, Isaac. Figueroa, Juan. Kalenatic, Dusko. Cadena, Katerine. Potencial de producción de bioethanol a partir de caña panelera: Dinámica entre contaminación, seguridad alimentaria y uso del suelo. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Revista de Ingeniería Vol 16, N° 1. Bogotá*. 2011.
- [39] Folinas D., Manikas I. y Manos B. Traceability data management for food chains. *British Food Journal*, 2006.
- [40] Bendriss S., Benabdelhafid A. y Boukachour J. Management traceability information system for the food supply chain. *Intelligent Systems and Automation, 1ª Mediterranean Conference*, 2008.
- [41] Valdez G., Torrescano G., et al. Acortando la brecha digital para la trazabilidad sanitaria: el problema de la transferencia tecnológica en la ganadería sonorense, caso SITAGAN. *Revista Estudios Sociales*, 2010.
- [42] Thakur Maitri y Donnelly Kathryn. Modeling Traceability information in soybean value chains. *Journal of Food Engineering*, 2010.
- [43] Engelseh, P. Food product traceability and supply network integration. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 24(5/6): p. 421-430, 2009.
- [44] Orjuela J., Kalenatic D. y Huertas I., *Modelo Integral y dinámico para la gestión de empresas de servicios*, Bogotá D.C.: Universidad Católica de Colombia, 2010.
- [45] Kalenatic D., *Modelo integral y dinámico para el análisis, planeación, programación y control de las capacidades productivas en empresas manufactureras*, Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas., 2001.
- [46] Herrera M. *Modelo para la implementación de tecnología de trazabilidad RFID en la cadena de suministro frutícola en las operaciones de picking bajo un enfoque integral y dinámico difuso*. Tesis Maestría Ingeniería Industrial. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2014.
- [47] Dupuy, C., V. Botta-Genoulaz, and A. Guinet. Batch dispersion model to optimise traceability in food industry. *Journal of Food Engineering*, 70: p. 333-339, 2005.

- [48] Thakur, M. Operational techniques for implementing traceability in bulk product supply chains, in *Industrial Engineering*. Iowa State University: Ames, Iowa, 2010.
- [49] Wang, X., Li, D., Li, L. Adding value of food traceability to the business: A supply chain management approach. *International Journal of Services Operations and Informatics*, 4 (3), pp. 232-257, 2009.
- [50] Hu, Z., Jian, Z., Shen, P., Xiaoshuan, Z., Weisong, M. Modeling method of traceability system based on information flow in meat food supply chain. *WSEAS Transactions on Information Science and Applications*, 6 (7), pp. 1094-1103, 2009.
- [51] Rijswijk, W. and L. Frewer. Consumer perceptions of food quality and safety and their relation. *British Food Journal*, 110 (10): p. 1034-1046, 2008.
- [52] Kher, S., et al. Experts' perspectives on the implementation of traceability in Europe. *British Food Journal*, 112(3): p. 261-274, 2010.
- [53] Engelseth, P. Food product traceability and supply network integration. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 24(5/6): p. 421-430, 2009.
- [54] Guilffrida, A.L. and R. Nagi. Fuzzy set theory applicatons in production management research: a literature survey. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 9: p. 39-56, 1998.
- [55] Landt, J. The history of RFID. *IEEE Potentials*, 2005.
- [56] Chen, K.-Y., Y.-F. Hwang, y M.-C. Chen. Applying RFID to Picking Operation in Warehouses, *Economy and Ecology*. Springer London. p. 531-540, 2009.
- [57] Bendavid, Y., et al. Explorando los impactos de la RFID en los procesos negocios de una cadena de suministro. *Journal of Technology Management & Innovation*, 1(4), 2006.
- [58] Sabbaghi, A. and G. Vaidyanathan. Effectiveness and efficiency of RFID technology in Supply Chain Management Strategic values and Challenges. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 3(2): p. 71-81, 2008.
- [59] Jones, P., et al. Radio frequency identification and food retailing in the UK. *British Food Journal*, 107(6): p. 356-360, 2005.
- [60] Chen, Y. Understanding technology adoption through system dynamics approach: A case study of RFID technology. *Proceedings - 2011 IFIP 9th International Conference on Embedded and Ubiquitous Computing, EUC 2011*, art. no. 6104551, pp. 366-371, 2011.
- [61] Kalenatic, D., González L., López C. y Arias L. El sistema de gestión de tecnología como parte del sistema logístico en la era del conocimiento. *Cuadernos de Administración*, Vol. 22, N° 39: pp. 257-286, 2009.
- [62] Herrera R., M. y Orjuela C. J. Evaluación de tecnología de trazabilidad en la cadena de suministro frutícola: un enfoque bajo dinámica de sistemas. *Conference Proceeding of X Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas*, 2012.

Milton Mauricio Herrera Ramírez

Nació en Bogotá, Colombia. Es ingeniero de producción de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá. Obtuvo su título de maestría en Ingeniería Industrial en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Se desempeñó como docente investigador durante cuatro años en la Universidad Minuto de Dios. Posteriormente, ejerció el cargo de director de Programa en la Universidad Minuto de Dios, donde desarrolló el proyecto de creación de programas de Tecnología en Logística.

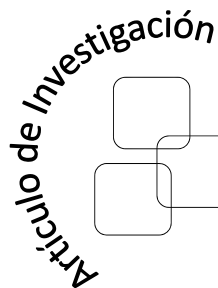
Actualmente se desempeña como profesor en el área de producción y simulación en la Universidad Piloto de Colombia y es el líder del grupo de investigación Innovación y Gestión –IG, en el que realiza estudios sobre gestión de tecnología en la cadena de suministro; es integrante del Grupo de Investigación de Cadenas de Abastecimiento, Logística y Trazabilidad GICALyT.

e-mail: milton-herrera@upc.edu.co

Javier Arturo Orjuela Castro

Nació en Bogotá, Colombia. Es ingeniero de alimentos e ingeniero industrial y especialista en Ingeniería de Producción, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá. Obtuvo su título de Maestría en Investigación de Operaciones y Estadística en la Universidad Tecnológica de Pereira Colombia. Realiza estudios de doctorado en Ingeniería, Industria y Organizaciones en la Universidad Nacional de Colombia. Se ha desempeñado como docente de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en pregrado y posgrado. Es investigador y líder del Grupo de Investigación de Cadenas de Abastecimiento, Logística y Trazabilidad GICALyT.

e-mail: jorjuela@udistrital.edu.co



Realce de candidatos a nódulo pulmonar en radiografías de tórax por medio de filtros de convergencia

Highlight of lung nodule candidates in chest radiographs by convergence filters

Julián Mauricio Aguillón Pérez
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
jmaguillonp@correo.udistrital.edu.co

Sergio Alejandro Duarte Pacheco
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
saduartep@correo.udistrital.edu.co

Rodrigo Javier Herrera García
Universidad Distrital
Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
rherreira@udistrital.edu.co

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de un método para el realce de áreas sospechosas de nódulos pulmonares en radiografías de tórax. Los nódulos pulmonares son lesiones que se encuentran dentro de la región pulmonar y son los primeros indicadores de la presencia de un tumor cancerígeno en este órgano. En primera instancia, se implementa un método de segmentación automático. Luego, para el realce de los candidatos, se usan filtros de convergencia que evalúan el grado en el que converge el área circundante al píxel de interés, asumiendo que los posibles candidatos a nódulos presentan forma circular. En este trabajo se implementan cuatro filtros de convergencia: Moneda, Iris, Anillo Adaptativo y Banda Deslizante. Los filtros de moneda y de anillo adaptativo obtuvieron mejores resultados en cuanto a detección y número de candidatos por imagen, imágenes pertenecientes a la base de datos de la JSRT (Japanese Society of Radiological Technology). Al aplicar la técnica de resta contralateral junto con los filtros basados en características geométricas tales como área, redondez y excentricidad, se logró disminuir el número de candidatos.

Palabras claves: Radiografía de tórax, nódulos pulmonares, segmentación, filtros de convergencia.



Abstract

This paper describes the development of a method that highlights suspicious areas of lung nodules on chest radiographs. Lung nodules are lesions found in the lung region, which are the first indicators of the presence of cancerous tumors. First, an automatic segmentation method is implemented. Next, to highlight the candidates, convergence filters were used in order to evaluate the degree in which the surrounding area converged to the pixel of interest, assuming a circular shape for potential nodule candidates. Four convergence filters were implemented: Coin filter, Iris filter, Adaptive Ring filter and Sliding Band filter. Coin and adaptive ring filters obtained better results in terms of detection and number of candidates per image, images from the database of the JSRT (Japanese Society of Radiological Technology). Applying the contralateral subtraction technique together with filters based on geometric features such as areas, roundness and eccentricity, it was possible to reduce the number of candidates.

Key words: Chest radiographs, lung nodules, segmentation, convergence index filters.

Recibido: 19-06-2014
Modificado: 28-11-2014
Aceptado: 02-12-2014

1. Introducción

El cáncer de pulmón es la causa más frecuente de mortalidad por cáncer en el mundo. Es, además, uno de los cánceres con peor pronóstico ya que su detección suele darse en etapa avanzada. Para seleccionar el tratamiento es fundamental hacer una estadificación adecuada, ya que una detección en estado de nódulo pulmonar permitirá una intervención terapéutica que traerá consigo un mejor pronóstico. El diagnóstico de los nódulos pulmonares es además importante para la detección de metástasis pulmonares en tumores extratorácicos. Por lo tanto, aún continúa siendo un problema clínico de primera magnitud [18], siendo la radiografía de tórax la herramienta básica de detección [1] [5]. Una ayuda que con el paso del tiempo se ha hecho cada vez más relevante en el diagnóstico médico es el CAD (Computer Aided Diagnosis) [21].

En la búsqueda de regiones pulmonares, la segmentación de los pulmones y la detección de nódulos son las tareas principales. Los nódulos aparecen en las radiografías como objetos relativamente circulares, iluminados y de bajo contraste dentro de la región pulmonar. La dificultad para los CAD es distinguir nódulos verdaderos de objetos superpuestos como vasos y costillas. La primera etapa de la detección de nódulos es encontrar candidatos. Luego se hace necesario eliminar el mayor número de candidatos que son nódulos, evitando sacrificar verdaderos positivos [21].

La segmentación pulmonar es la primera etapa para desarrollar un algoritmo de detección de nódulos. La razón principal es restringir la región de interés para así solo trabajar en zonas con mayor probabilidad de encontrar estas anomalías. Usualmente se emplean sistemas basados en reglas, como por ejemplo el uso del histograma para encontrar un valor de umbralización, el uso del gradiente de Sobel para remover el ruido adjunto a los pulmones [13]. Otro enfoque de segmentación es el que usa aprendizaje supervisado, como por ejemplo el uso del modelo de forma activa ASM (Active Shape Model), la apariencia activa AAM (Active Appearance Model) y la clasificación de píxeles PC [20].

En la detección de nódulos existen distintos enfoques como el modelo de contorno activo, llamado serpiente (*snake*), basado en Wavelets [24] [23]. La resta contralateral C-Sub (Contralateral Substraction) es una técnica que mejora la visibilidad de los nódulos por la sustracción de la imagen espejo invertida de la imagen original, usando métodos de registro global y local [8] [7]. El uso de redes neuronales es otro enfoque en la detección de nódulos; por ejemplo el uso de las redes de tipo realimentado permite un uso eficiente del conocimiento *a priori* de la forma de los nódulos y las estructuras del segundo plano [2]. Una ayuda adicional es la implementación de algoritmos genéticos si se usa ajuste de plantilla (*Template Matching*), al identificar las posiciones adecuadas y la forma de las imágenes de referencia [6].

Para el realce de nódulos pulmonares se usan distintos tipos de filtros. Por ejemplo, los filtros LoG (Laplacian of Gaussian) se usan con una adecuada selección de la desviación estándar del núcleo [15].

En la tarea de reducir falsos positivos se han estudiado herramientas como SVM (Máquinas de Soporte Vectorial) que permite el reconocimiento entrenado de nódulos verdaderos. Las SVM están basadas en la teoría de aprendizaje estadístico y en la minimización de riesgo

estructural, obteniendo la mayor habilidad de generalización mediante la consecución de un balance óptimo entre la complejidad del modelo y la capacidad de aprendizaje [10][25].

En este artículo se describe un método de realce de nódulos pulmonares en radiografía de tórax. En la sección de metodología, se describirán los algoritmos de segmentación pulmonar y de realce de candidatos a nódulo. Luego se presentarán y discutirán los respectivos obtenidos y por último se harán las conclusiones correspondientes.

2. Metodología

En esta sección, se describe la herramienta de software desarrollada para el realce de candidatos a nódulo pulmonar en radiografías de tórax. La primera etapa describe la segmentación pulmonar precedida de una etapa de preprocesamiento. En seguida, se explica la técnica para la detección de los nódulos pulmonares, por medio de los filtros de convergencia. Al final se incluye un método de clasificación basado en características geométricas. En la Figura 1, se muestra la metodología general usada en este documento.

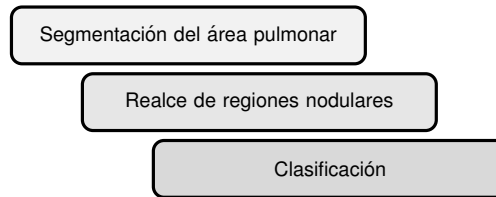


Figura 1. Metodología general para la detección de candidatos a nódulo

2.1. Segmentación pulmonar

La segmentación pulmonar se realiza para restringir la detección de los nódulos a la región pulmonar. En este trabajo, se aplicó el algoritmo presentado en la Figura 2. El preprocesamiento es la primera etapa del método. La aproximación al área pulmonar basada en la mejora de *contraste local 2*, la binarización por Otsu y la eliminación de regiones que no pertenecen a la región de interés forman parte de la segunda etapa. Con la mejora de *contrastés locales 1* y 2; la aplicación del filtro de Gabor, que son filtros direccionales aplicados a cada pulmón y la binarización por Otsu corresponden a la aproximación de los bordes externos de los pulmones, siendo esta la tercera etapa. Por último, se realiza la unión de los resultados de la segunda y tercera etapa y se realiza un postprocesamiento.

2.1.1. Preprocesamiento

La primera etapa consiste en hacer preprocesamiento sobre las imágenes. En primer lugar, se redimensionan las imágenes de 2048×2048 píxeles a 512×512 píxeles con el fin re-

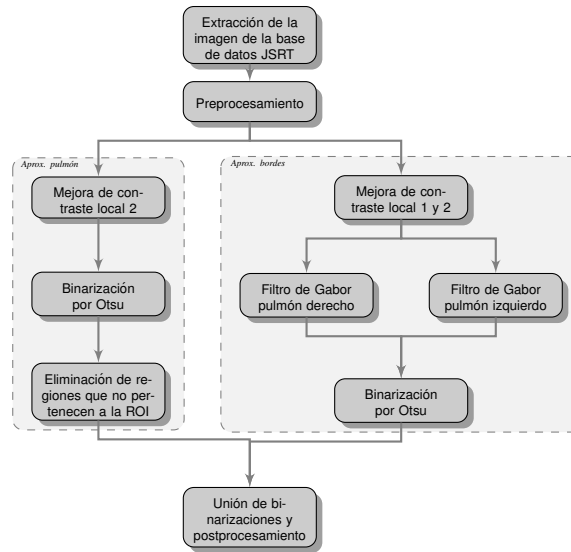


Figura 2. Diagrama de la segmentación del área pulmonar propuesta

ducir el tiempo de procesamiento. Como las imágenes de radiografías de tórax presentan un amplio rango de iluminación pero a la vez bajo contraste, se hace necesario normalizar los histogramas. Para lograr esto, se usó la Ecuilización Adaptativa del Histograma por Contraste Limitado CLAHE (*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*) [11]. El método CLAHE permite la reducción de ruido típica de la ecualización del histograma adaptativa, ya que limita la pendiente de los niveles de gris recortando el histograma a un determinado valor. Los píxeles que son recortados se redistribuyen igualmente para mantener la totalidad del histograma intacto.

2.1.2. Contrastes locales

Pretenden mejorar el contraste local de las imágenes (entendido como la diferencia relativa en intensidad entre un punto de una imagen y sus alrededores), se busca que el área pulmonar presente una uniformidad en su contraste. Se define la mejora del *contraste local 1* por medio de la siguiente ecuación:

$$Y(x, y, k) = \frac{I(x, y) - \mu_l(k)}{\sigma_g} \quad (1)$$

donde $I(x, y)$ es la imagen de entrada, $Y(x, y, k)$ es la imagen de salida $\mu_l(k)$ es la media local y σ_g es la desviación estándar global. Aquí $k = 1 \dots N$, donde N es el número de regiones locales. La mejora del *contraste local 2* usa la desviación estándar local $\sigma_l(k)$ en lugar de la global [17], como se observa en la siguiente ecuación:

$$Y(x, y, k) = \frac{I(x, y) - \mu_l(k)}{\sigma_l(k)} \quad (2)$$

Al aplicar la mejora del *contraste local 2* y binarizando, se obtiene una aproximación inicial al área pulmonar. Igualmente, como se observó en la Figura 2, al aplicar secuencialmente la mejora del *contraste local 1* con la mejora del *contraste local 2* se asegura un mejor realce en los bordes externos de los pulmones.

2.1.3. Binarización por Otsu

Como se ha mencionado antes, una primera aproximación al área pulmonar se obtiene luego de binarizar la imagen. El método de binarización usado es el de Otsu que básicamente realiza una búsqueda exhaustiva del umbral óptimo al maximizar la varianza entre las clases que forman la imagen (fondo y objeto) [9], teniendo en cuenta que una imagen se puede asumir como una función bidimensional en intensidad de niveles de grises que contiene el número total de píxeles y considerando el rango en el que están los niveles de grises.

2.1.4. Eliminación de regiones que no pertenecen a la región de interés

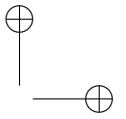
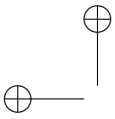
Cuando se tiene la aproximación inicial a la región pulmonar y al binarizar por medio del método de Otsu, por lo general quedan regiones adicionales a los dos pulmones que se hace necesario eliminar. Al observar una imagen de radiografía, hay regiones que en los bordes de la imagen se destacan del fondo. La eliminación de las regiones que tocan los bordes se hace por medio de un algoritmo de crecimiento. Luego de que se tienen los bordes limpios de regiones indeseadas, se etiquetan las regiones restantes donde las dos con mayor área harán referencia a los pulmones.

Esta segmentación presenta los pulmones separados de ellos mismos y de otras estructuras de la imagen como la tráquea o las partes externas del tórax presentes en la radiografía, pero que hacen parte del fondo de la imagen. Sin embargo, en la mayoría de las imágenes, el área segmentada es menor que el área real de los pulmones y hay una pérdida generalizada en los bordes externos debido al bajo contraste con el fondo de la imagen.

2.1.5. Filtros de Gabor

Para resaltar las costillas y los bordes externos se requiere el uso de filtros direccionales como los filtros de Gabor. Un filtro de Gabor en 2-D, se describe por medio de la siguiente ecuación [14]:

$$g(x, y) = \exp\left(-\frac{1}{2} \left[\frac{x_\theta^2}{\sigma_x^2} + \frac{y_\theta^2}{\sigma_y^2} \right]\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot x_\theta}{T}\right) \quad (3)$$



donde las variables (x_θ, y_θ) proceden de efectuar un giro sobre las coordenadas iniciales (x, y) :

$$\begin{pmatrix} x_\theta \\ y_\theta \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (4)$$

Puede verse el filtro como el producto de una gaussiana modulada por una componente sinusoidal, donde θ es la orientación y T es el período. Al verse el filtro en frecuencia va a ser pasabajo en una dirección y pasabanda en la perpendicular. Por lo tanto la salida tenderá a conservar solo las líneas orientadas en dirección θ y que estén separadas una distancia T .

Un replanteo de parámetros de los filtros de Gabor, se destaca a continuación [12]:

$$g_{\lambda, \sigma, \theta, \varphi} = \exp\left(-\frac{x_\theta + (\gamma \cdot y_\theta)^2}{2\sigma^2}\right) \cos\left(2\pi \frac{x_\theta}{\lambda} + \varphi\right) \quad (5)$$

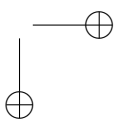
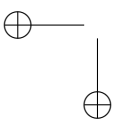
Donde γ es la relación de aspecto espacial, que determina la elipticidad de la respuesta al impulso. La desviación estándar σ del factor gaussiano determina el tamaño de la ventana. El parámetro λ es la longitud de onda, siendo $1/\lambda$ la frecuencia espacial del factor coseno. La relación σ/λ determina el ancho de banda (b) de la frecuencia espacial. El parámetro φ es el desplazamiento de fase que determina la simetría de la función de Gabor con respecto al origen: para $\varphi = 0$ y $\varphi = \pi$ es simétrica o par, y para $\varphi = \pi/2$ y $\varphi = -\pi/2$ es antisimétrica o impar; para los otros casos son mezclas asimétricas.

Este filtro de Gabor es aplicado sobre las imágenes luego de ser mejoradas por medio de los *contrastos locales 1 y 2*. Seguido de esto se binariza por medio de Otsu, y se procede a realizar la intersección con la aproximación del área pulmonar. Dicha área se unirá con la aproximación del área pulmonar obtenida anteriormente y así se obtendrá la segmentación final, como se observa en la Figura 3. Usando como base la plantilla proporcionada por la base de datos SCR se puede observar la intersección de la segmentación con el método realizado con la referencia estándar.

2.2. Realce de regiones candidatas a nódulo

A causa de la baja intensidad de los rayos X, las radiografías torácicas presentan bajo contraste y alto ruido, por lo que los nódulos pulmonares relativamente no se evidencian en la imagen.

Para realzar dichos nódulos, se implementaron filtros de convergencia, a causa de que se asume que los nódulos pulmonares tienen forma circular y estos filtros son efectivos para el realce de este tipo de regiones. Debido a que el número de candidatos a nódulo aún es elevado, la técnica de resta contralateral elimina un número mayor de estos candidatos.



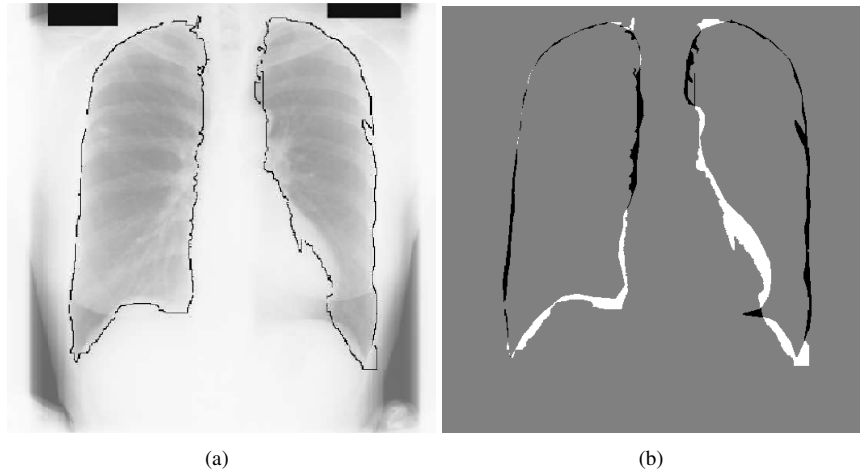


Figura 3. Resultado de la segmentación aplicada al archivo JPCLN034: (a) muestra el área pulmonar segmentada superpuesta sobre la imagen original y (b) muestra la comparación con la referencia estándar de la base de datos SCR.

Por último, filtrando las regiones por ciertas características geométricas como área, redondez y excentricidad, se logra aún más reducir el número de candidatos sin sacrificar nódulos verdaderos. En la Figura 4 se muestra el diagrama del procedimiento efectuado.

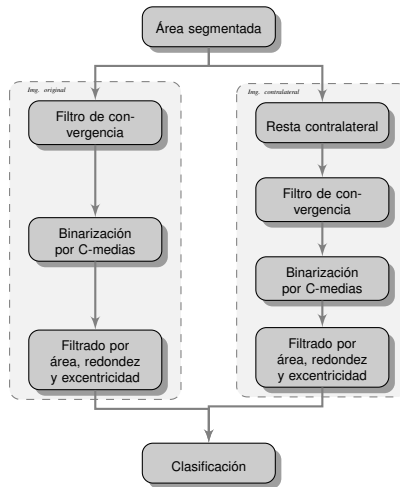


Figura 4. Diagrama del método de realce y clasificación de candidatos a nódulo pulmonar

2.2.1. Filtros de convergencia

Como se ha mencionado, los nódulos pulmonares presentan forma aproximadamente circular, destacándose del fondo de una imagen digital como montañas cónicas. Sus líneas de intensidad se pueden modelar como círculos concéntricos, llamados regiones convexas. Los vectores gradientes de la región convexa apuntan hacia su cima. De esta forma es que las

regiones convexas se pueden detectar, ya que son las regiones donde los vectores gradientes convergen a un mismo centro dentro de un área local o región de apoyo. Un método para evaluar el grado de convergencia consiste en N semirrectas radiando desde el píxel de interés P . La orientación de los vectores gradientes de la imagen en relación a las columnas G_c y las filas G_f para cada píxel en la imagen original se definen así [4]:

$$\alpha(x, y) = \arctan \frac{G_c(x, y)}{G_f(x, y)} \quad (6)$$

El ángulo de cada semirrecta con respecto al píxel de interés θ_i se define por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta_i = \frac{2\pi}{N}(i - 1) \quad (7)$$

donde N es el número de semirrectas donde se ha evaluado la convergencia, de acuerdo a sus direcciones radiales. En este caso se usaron 8 rectas debido a que permiten garantizar los puntos necesarios para detectar la mayor convergencia posible dentro de la región de apoyo del filtro, además que el costo computacional es razonablemente bajo.

El grado de convergencia de los vectores gradientes sobre una semirrecta se puede expresar por medio de la siguiente ecuación [22]:

$$c_i = \frac{1}{R} \sum_{j=1}^R \cos(\theta_j) \quad (8)$$

donde R es el número de píxeles sobre la i -ésima semirrecta y $\cos(\theta_j)$ es la orientación del j -ésimo vector gradiente de P con respecto a la orientación de la i -ésima semirrecta. El $\cos(\theta)$ es equivalente a la convergencia de cada píxel en la imagen a tratar y se define como Índice de Convergencia (IC) como se muestra a continuación:

$$IC(x, y, i) = \cos(\theta_i - \alpha(x, y)) \quad (9)$$

La convergencia global se obtiene mediante la suma de todas las convergencias individuales, dada por la ecuación 9, dentro de la zona de soporte específica de cada filtro. Se implementaron cuatro filtros de convergencia que varían de acuerdo a la región de apoyo: Filtro de Moneda (FM), Filtro de Iris (FI), Filtro de Anillo Adaptativo (FAA) y Filtro de Banda Deslizante (FBD).

El Filtro de Moneda (FM) es el filtro de convergencia más elemental de todos, al tener una región de apoyo fija circular (Figura 5a). Se define por medio de la siguiente ecuación:

$$FM(x, y) = \max_{0 \leq r \leq R_{\text{máx}}} \frac{1}{N \cdot r} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{m=1}^r IC(x, y, i) \quad (10)$$

donde IC es el índice de convergencia y N es el número de semirrectas a evaluar que conforman la región de apoyo y $R_{\text{máx}}$ es el radio máximo para la región de apoyo.

El Filtro de Iris (FI) es un filtro de moneda pero adaptativo, lo que significa que no tiene una región de apoyo estrictamente circular (Figura 5b). El FI maximiza la convergencia de cada radio independientemente adaptando el radio de la región de apoyo para cada semirrecta. El filtro se puede modelar por medio de la siguiente ecuación:

$$FI(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left[\max_{0 \leq r \leq R_{\text{máx}}} \frac{1}{r} \sum_{m=1}^r IC(x, y, i) \right] \quad (11)$$

El Filtro de Anillo Adaptativo (FAA) tiene una región de apoyo en forma de anillo y cambia el radio adaptativamente (Figura 5c). La salida del filtro se puede calcular por medio de la siguiente ecuación:

$$FAA(x, y) = \max_{0 \leq r \leq R_{\text{máx}}} \frac{1}{N \cdot d} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{m=r-d/2}^{r+d/2} IC(x, y, i) \quad (12)$$

donde d es una constante que corresponde al ancho o grosor del anillo en número de píxeles.

El Filtro de Banda Deslizante (FBD) básicamente une las características del FI con las del FAA, al definir una región de apoyo con una banda de ancho fijo y un radio adaptable a cada dirección (Figura 5d). De esta forma, se permite maximizar el grado de convergencia en cada punto. El FBD se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$FBD(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \max_{R_{\text{mín}} \leq r \leq R_{\text{máx}}} \left[\frac{1}{d} \sum_{m=r-d/2}^{r+d/2} IC(x, y, i) \right] \quad (13)$$

Como se ha mencionado, el FBD se deriva de la estimación del FI y del FAA. De acuerdo a la ecuación, el ancho d se mueve entre un radio mínimo y uno máximo ($R_{\text{mín}}$ y $R_{\text{máx}}$).

En la Figura 6 se puede apreciar el comportamiento de los filtros de convergencia aplicados en las imágenes de radiografía de tórax con los pulmones segmentados con la base de datos SCR y usando un radio de 15 píxeles (Figura 6a). Con el FM se puede apreciar el realce de algunas áreas dentro de los pulmones y el realce del borde de los mismos (Figura 6b). Esto es debido a que el filtro busca el mayor índice de convergencia para cada uno de los radios y

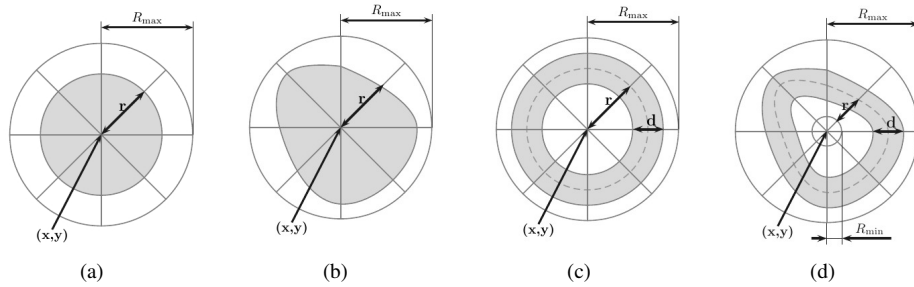


Figura 5. Filtros de convergencia: (a) Filtro de Moneda (FM), (b) Filtro de Iris (FI), (c) Filtro de Anillo Adaptativo (FAA) y (d) Filtro de Banda Deslizante (FBD)

es asignado al píxel de interés. Al comparar el resultado del FM con el FI, se puede observar que el FI genera una imagen más borrosa o difuminada, debido a que este filtro busca el mayor índice de convergencia para cada una de las direcciones y el mayor índice de todas es asignado al píxel de interés, presentando una forma irregular (Figura 6c). El FAA presenta un resultado parecido al FM, pero debido a la presencia del ancho d las áreas resaltadas son más gruesas (Figura 6d). Los resultados del FBD son los que presentan áreas más difuminadas o desvanecidas entre todos los filtros de convergencia, siendo el comportamiento más parecido al FI pero debido al ancho d hay áreas resaltadas más gruesas y borrosas (Figura 6e).

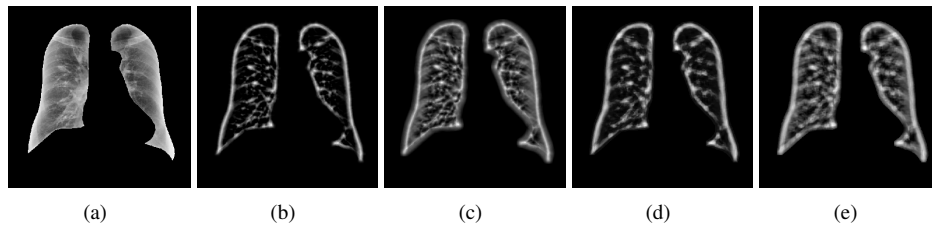


Figura 6. Aplicación de los filtros de convergencia: (a) Imagen a filtrar, (b) resultado del filtro de moneda, (c) resultado del filtro de iris, (d) resultado del filtro de anillo adaptativo y (e) resultado del filtro de banda deslizante

2.2.2. Segmentación por C-Medias

Al aplicar los filtros de convergencia para el realce de candidatos a nódulo, se segmentan dichos candidatos por medio de binarización, con el fin de aislarlos y luego sobreponerlos sobre la radiografía de tórax. Debido a que los resultados de los filtros de convergencia presentan estructuras dentro de la región pulmonar que están unidas al borde del pulmón y a otras regiones como costillas, se hace necesario buscar un método de segmentación que logre el mayor número de candidatos aislados dentro de la región pulmonar.

El método difuso de C-Medias FCM (*Fuzzy C-Means*) mostró ser eficiente en este aspecto. Básicamente la segmentación por FCM propone una pertenencia difusa que asigna un grado de pertenencia para cada clase. La formación de nuevos agrupamientos es posible con el monitoreo de los conjuntos de datos que tienen valores cercanos a las clases existentes. El método de FCM busca minimizar la siguiente ecuación [3]:

$$Q = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^C U_{ij}^m \|v_i - \mu_j\|^2; \quad 1 \leq m < \infty \quad (14)$$

Donde n es el número de muestras y C es el número de agrupamientos; μ_i es el centro d -dimensional del agrupamiento; $m \in [1, \infty]$ es un exponente de ponderación y cualquier número real mayor a 1; v_i es el i -ésimo del dato medido d -dimensional; y $\|\cdot\|$ es una norma que expresa la similitud entre algún dato medido y el centro del agrupamiento. La matriz de pertenencia \mathbf{u} satisface la siguiente condición:

$$\sum_{i=1}^C \mu_{ij} = 1, \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (15)$$

La pertenencia y los centros del agrupamiento son actualizados por medio de las siguientes relaciones respectivas:

$$\mu_{ij}^m = \frac{1}{\sum_{k=1}^C \left(\frac{\|v_i - \mu_i\|}{\|v_i - \mu_k\|} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad (16)$$

y

$$\mu_j = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_{ij} \cdot v_i}{\sum_{i=1}^n \mu_{ij}} \quad (17)$$

Los centroides son la media de las distancia de los datos ponderados por su pertenencia y normalizados a la pertenencia total. Se puede observar que el grado de pertenencia es inversamente proporcional a la distancia del centro del agrupamiento.

La Figura 7 muestra el resultado al aplicar el algoritmo FCM con dos agrupamientos (Figura 7a) y con tres agrupamientos (Figura 7b) a una imagen con FM de 15 píxeles y segmentada con la base de datos SCR. Con dos agrupamientos muchas de las regiones resaltadas se unen con las costillas y los bordes externos. Con tres agrupamientos se permite descartar regiones que no son consideradas ni como fondo de la imagen ni como posible nódulo, como las costillas, clavículas o vasos. Este procedimiento es realizado uniendo los dos agrupamientos que se descartan de la segmentación, generando una imagen binarizada solo con los posibles candidatos a nódulos (Figura 7c). La implementación de más de tres agrupamientos implica mayor costo computacional y una posible pérdida de nódulos verdaderos.

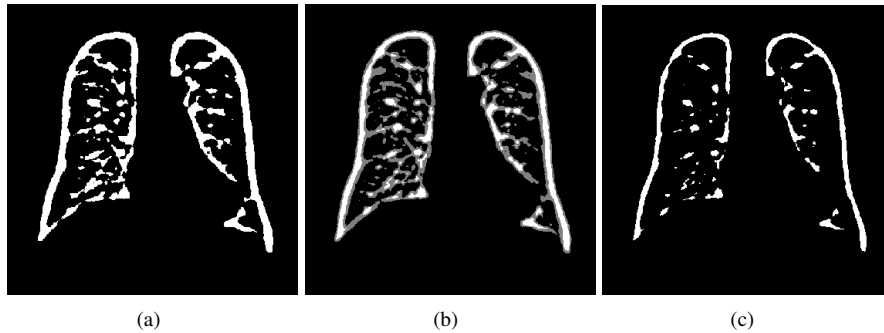


Figura 7. Aplicación de la segmentación FCM: (a) FCM con dos agrupamientos, (b) FCM con tres agrupamientos y (c) binarización de (b) uniendo dos agrupamientos.

2.2.3. Resta Contralateral

La técnica de resta contralateral ha sido usada para ayudar a radiólogos en la detección de anomalías asimétricas tales como nódulos pulmonares con una sola radiografía de tórax [19]. En este caso, su utilidad se validará en la reducción de candidatos a nódulos pulmonares, debido a que permite la eliminación de estructuras esqueléticas simétricas como las costillas dentro de la zona pulmonar. La imagen de resta contralateral se obtiene restando a la imagen original, su imagen invertida *espejo* y así se resaltan las anomalías o lesiones por dicha eliminación de estructuras.

Para realizar este método como primer paso se normalizaron los niveles de intensidad de la imagen de entrada en un rango de 0 a 1. En la Figura 8 se muestra un ejemplo del desarrollo sobre una imagen de esta técnica: la imagen original (Figura 8a) se invirtió obteniéndose la imagen espejo (Figura 8b), realizándose la resta de la imagen original y la espejo (Figura 8c) y a cuyo resultado se le aplicó el filtro de moneda con radio de 15 píxeles (Figura 8d).

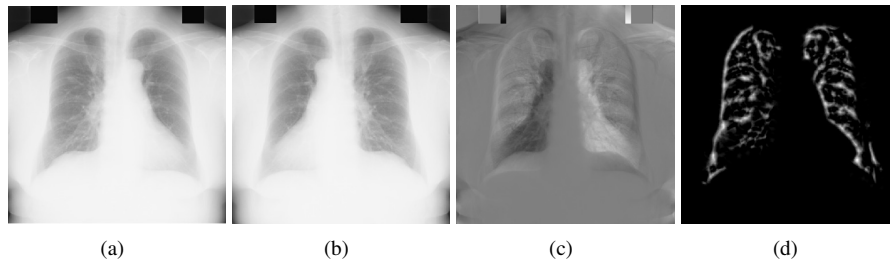


Figura 8. Desarrollo de la resta contralateral en el archivo JPCLN085: (a) Imagen original, (b) imagen invertida o espejo, (c) resultado de la aplicación de la resta contralateral y (d) aplicación a (c) del filtro de moneda.

2.2.4. Clasificación

De acuerdo con la Figura 4, luego de aplicar los filtros de convergencia y la segmentación por FCM tanto a la imagen original como a la de resta contralateral, el número de candidatos a nódulo en promedio por imagen aún es alto. Para reducir el número de candidatos y partiendo

de la idea de que los nódulos tienen forma circular u ovalada y de estar definidos por su tamaño, se desarrollaron unos filtros que miden tres características geométricas: área, redondez y excentricidad. Estas características fueron seleccionadas de acuerdo con un conocimiento previo de la forma de los nódulos tomando en consideración a la mitad de las imágenes para dicho estudio.

Al clasificar por área, redondez y excentricidad los resultados de la segmentación por FCM en la imagen original y en la de resta contralateral, se realiza la intersección de estas dos imágenes binarizadas. En esta intersección se eliminan las regiones que no coinciden en ambas imágenes, resultando finalmente una reducción considerable de candidatos a nódulo como se observa en la Figura 9, donde el asterisco rojo indica el nódulo verdadero.

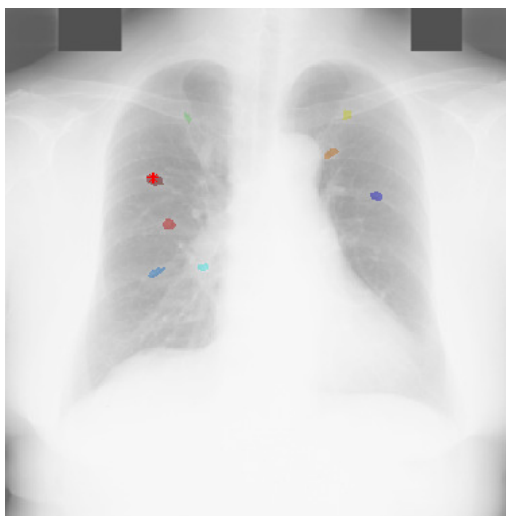


Figura 9. Resultado final del algoritmo de realce de candidatos a nódulo pulmonar

3. Resultados

Para el desarrollo de este trabajo se contó con la base de datos de la JSRT [16](Japanese Society of Radiological Technology) que cuenta con 154 imágenes de radiografía de tórax con presencia de un nódulo pulmonar solitario y 93 sin lesiones. Todas las imágenes tienen un tamaño de 2048×2048 píxeles, equivalente a 0,175 mm por píxel y 12 bits de profundidad. Las 154 imágenes con nódulo fueron clasificadas en cinco tipos de sutileza, iniciando del nivel 1 (el más sutil) hasta el 5 que significa que la presencia del nódulo es obvia en la imagen. Para efectos de este trabajo, la evaluación del método de realce se hizo con los niveles 3, 4 y 5 de sutileza y con nódulos que se encuentran dentro de la región pulmonar, lo que corresponde a 98 imágenes. Se debe destacar que la base de datos está completamente validada, lo que significa que se conoce la localización del nódulo, la edad del paciente, sexo y diagnóstico.

En esta sección se presentan los resultados experimentales obtenidos con el algoritmo desarrollado. En primer lugar se presentan los resultados al aplicar la segmentación propuesta a la

totalidad de imágenes de la base de datos JSRT. Para evaluar la efectividad de la segmentación pulmonar, se usó la base de datos libre SCR [20](Segmentation in Chest Radiographs) como referencia estándar que consta de imágenes binarias de los pulmones, segmentadas manualmente por expertos, a partir de la base de datos JSRT. Esta base de datos fue desarrollada por Bram Van Ginneken y su equipo de trabajo, del *Images Sciences Institute* localizado en el Centro Médico Universitario de Utrecht en los Países Bajos.

Luego se presentan los resultados de los candidatos a nódulo con la segmentación hecha con la base de datos SCR y con la segmentación propuesta para efectos de comparación.

3.1. Resultados de la segmentación del área pulmonar

Para evaluar la eficiencia del algoritmo de segmentación del área pulmonar propuesto, se usaron gráficas ROC empleando como *estándar de oro* la base de datos SCR. Se calcula el número de píxeles que coinciden con la región segmentada y la de referencia, denominados VP (Verdaderos Positivos); los píxeles que por segmentación no corresponden a la referencia pero que se detectan como tal, en este caso se consideran FP (Falsos Positivos); de igual manera los píxeles donde la segmentación no tomó partes que en realidad si pertenecen a la referencia se denominan FN (Falsos Negativos) y por último los VN (Verdaderos Negativos) hacen referencia a los píxeles correctamente clasificados como fondo. Para este efecto se definen las siguientes variables:

$$PPV = \frac{VP}{VP + FP} \quad (18)$$

$$SE = \frac{VP}{VP + FN} \quad (19)$$

$$D = \sqrt{(1 - SE)^2 + (1 - PPV)^2} \quad (20)$$

PPV¹ hace referencia al valor predictivo del resultado positivo o índice de precisión que puede definirse como la proporción de píxeles o elementos detectados correctamente con respecto a todos los elementos detectados. SE² hace referencia a la sensibilidad, la razón de los píxeles detectados correctamente con respecto a todos los píxeles que conforman la referencia (la región pulmonar).

En la gráfica ROC, SE y PPV son los ejes x e y respectivamente y representa la relación entre VP, FN y FP. En la Figura 10 se representa la gráfica ROC generada por las 154 imágenes de prueba con nódulos pulmonares. El mejor método posible de predicción se situaría en un punto en la esquina superior derecha o coordenada (1,1) (clasificación perfecta), representando

¹Predictive Positive Value

²Sensitivity

un 100 % de SE (ningún FN) y un 100 % de razón de éxitos (ningún FP). La variable D es la distancia euclidiana desde un punto ubicado sobre la curva hasta la coordenada (1,1).

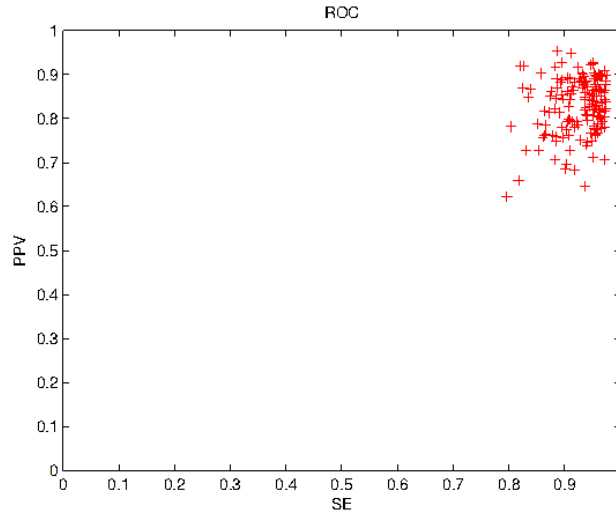


Figura 10. Gráfica ROC generada por las 154 imágenes con nódulo.

Otras medidas son la Especificidad y la Precisión que se miden por medio de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Precisión} = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN} \quad (21)$$

$$\text{Especificidad} = \frac{VN}{VN + FP} \quad (22)$$

La precisión es la razón entre los píxeles correctamente clasificados como pulmón y fondo con respecto a la imagen total. La especificidad hace referencia a la probabilidad de clasificar correctamente los píxeles que no corresponden a la región pulmonar.

En la Tabla I se muestran los resultados finales de la segmentación pulmonar de acuerdo a las variables mencionadas.

Tabla I. Valores de la gráfica ROC	
Variable	Valor promedio
D	0.2035
PPV	81.6 %
SE	92.52 %
Precisión	91.22 %
Especificidad	90.49 %

3.2. Resultados de los candidatos a nódulo

Todos los filtros de convergencia tienen como parámetro el valor del radio en píxeles de la región de apoyo que se aplica. Sin embargo, no es fácil deducir un solo valor de radio que resalte las regiones nodulares para cada uno de los cuatro filtros. Por tal motivo se hace necesario buscar el valor de radio que genere la mayor detección de las áreas nodulares en la totalidad de las imágenes con nódulo a tratar. Esto fue medido por medio del número de candidatos promedio de nódulos por imagen y la cantidad de nódulos verdaderos detectados, para cada uno de los filtros de convergencia.

Se utilizaron 98 imágenes de la base de datos que corresponden a los niveles 3, 4 y 5 de *sutileza* en detección, descartando las dos imágenes que tienen el nódulo fuera del área pulmonar.

Como el desarrollo del sistema utiliza los filtros de convergencia dos veces, para la imagen original y para la de la resta contralateral, entonces se debe buscar para cada filtro el radio de mayor detección y en las dos condiciones mencionadas. En la Tabla II se muestran los radios de mayor detección para cada filtro, con las dos condiciones y con el número de candidatos en promedio por imagen.

Tabla II. Valores de radio para los cuales se presentó la mayor detección

Filtro	Imagen original			Imagen contralateral		
	Radio	Candidatos	% de detección	Radio	Candidatos	% de detección
Filtro de moneda	15	27.88	73.43 %	19	36.56	73.47 %
Filtro de iris	8	49.79	68.37 %	11	59.75	71.43 %
Filtro de anillo adaptativo	12	30.52	73.47 %	12	43.84	84.69 %
Filtro de banda deslizante	8	42.33	79.59 %	16	44.08	88.78 %

Al aplicar el algoritmo de la Figura 4 con los radios indicados en la Tabla II se obtiene una reducción significativa de candidatos a nódulo como se observa en la Tabla III. Se puede observar que el filtro de moneda y el filtro de anillo presentaron una alta tasa de detección con un número bajo de candidatos. Cuando se usa la segmentación propuesta el filtro de moneda y el filtro de anillo adaptativo obtuvieron una tasa de detección de 68.37 % y 70.41 % respectivamente.

Tabla III. Resultado de los filtros de convergencia

Tipo de filtro	Candidatos	% de detección
Filtro de moneda	12.26	74.48 %
Filtro de iris	30.01	62.24 %
Filtro de anillo adaptativo	12.73	75.51 %
Filtro de banda deslizante	27.6	78.57 %

Como estos dos filtros fueron los más eficientes en términos cuantitativos, una comparación adicional se muestra en la Tabla IV, donde se muestra el número de candidatos promedio por imagen en las 98 imágenes y las 93 imágenes sin nódulo.

Tabla IV. Comparación del número de candidatos promedio en los filtros de moneda y anillo

Tipo de filtro	Segmentación manual (SCR)		Segmentación propuesta	
	Imágenes con nódulo	Imágenes sin nódulo	Imágenes con nódulo	Imágenes sin nódulo
Filtro de moneda	12.26	11.26	15.62	14.87
Filtro de anillo adaptativo	12.73	12.13	16.51	16.25

En la Figura 11 se aprecian los resultados de la aplicación de los filtros de convergencia en imágenes de la base de datos. Se observa como los filtros de moneda y anillo generan un realce más notorio comparado con los filtros restantes de los nódulos pulmonares. Dicha Figura puede ser comparada con los resultados obtenidos en [15] donde se usa el filtro LoG como método de realce de los nódulos. Los filtros de convergencia de anillo y moneda realzan los candidatos a nódulo con un mayor contraste con respecto a los filtros LoG.

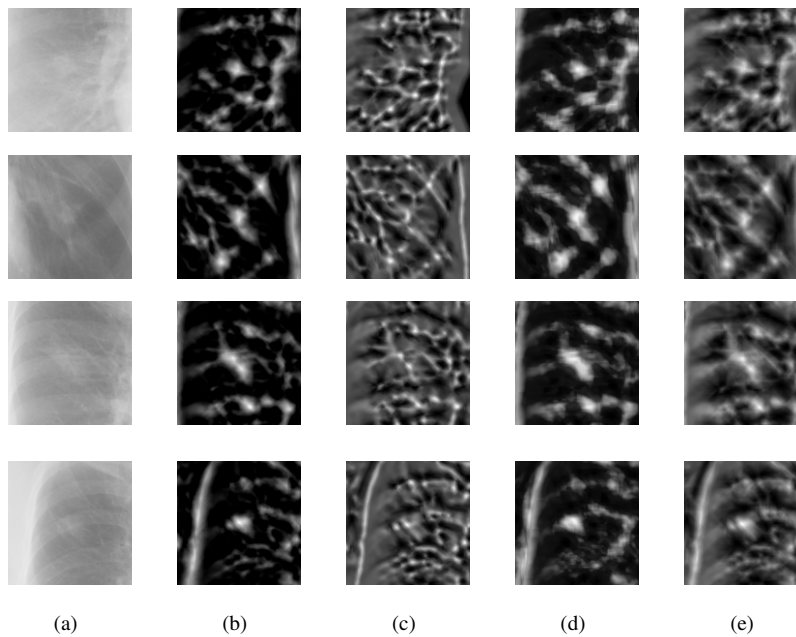
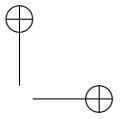
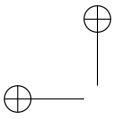


Figura 11. Comparación de imágenes con los filtros de convergencia: (a) Imagen original, (b) resultado del filtro de moneda, (c) resultado del filtro de iris, (d) resultado del filtro de anillo adaptativo y (e) resultado del filtro de banda deslizante

4. Discusión

La base de datos JSRT fue recolectada de diferentes instituciones médicas, de manera que incluye un amplio rango de características de las radiografías, como la distancia de toma, nivel de iluminación, sexo, edad del paciente, entre otras. A pesar de eso, la segmentación propuesta funciona para todas las imágenes propuestas, con una alta sensibilidad y precisión. Como el método desarrollado no necesita el conocimiento *a priori* de la forma de los pulmones y trabaja en forma automática, logrando segmentar el área pulmonar de las imágenes tratadas,



se considera valioso frente a otras técnicas expuestas en la introducción, ya que no requiere de etapas de entrenamiento como los enfoques más usados en este campo: redes neuronales o inteligencia artificial.

En el algoritmo de realce de los nódulos, el filtro de moneda y el filtro de anillo adaptativo, que son los que tienen claramente marcada una región de apoyo circular, fueron los más eficientes al presentar una tasa de detección alta con menor número de candidatos. Por el contrario, el filtro de iris, a pesar de que presenta una tasa de detección alta, el número de candidatos igualmente es alto. Sin embargo, como las tasas de detección se tomaron al final del proceso, claramente pueden ser sesgadas por el método de binarización. Usando el filtro de moneda y el filtro de anillo adaptativo en la segmentación propuesta se evidenció un mayor número de candidatos y una disminución leve en la tasa de detección.

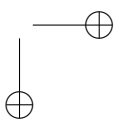
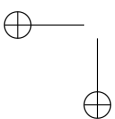
5. Conclusiones

Para el realce de los candidatos a nódulo pulmonar se implementaron los filtros de convergencia con el fin de que las regiones circulares se pudieran destacar con respecto al resto de la imagen. De la Tabla II, se puede concluir que para cada tipo de filtro hay un valor de radio diferente que genera la mayor tasa de detección. Esto aplica tanto para las imágenes originales como para las contralaterales.

Existen las técnicas de resta temporal, que se basa sólo en la diferencia temporal entre dos imágenes y resta de doble exposición basada en la diferencia de la toma de dos imágenes, variando la energía de los rayos X entre una y otra. Al contar con una radiografía por paciente, se empleó la resta contralateral la cual permite eliminar regiones óseas y resaltar nódulos pulmonares.

Los resultados comparados con los trabajos referenciados, en general fueron satisfactorios por cuanto se pudo evidenciar que al aplicar los filtros de convergencia los nódulos pulmonares se resaltan. Como estos filtros se adaptan a formas circulares, son una alternativa en la detección de nódulos. El método no requirió de conocimiento *a priori* lo cual denota una ventaja al adaptarse a los distintos tipos de radiografía de tórax, como lo realizado por varios autores y por otras técnicas [24] [23][2][6] [15] [10][19]. Estos métodos alcanzaron una tasa de detección del 70 % al 90 % y entre 2 y 14 falsos positivos por imagen, pero algunos usaron sus propias bases de datos.

La meta de obtener mayores tasas de detección con la disminución del mayor número de falsos positivos por imagen es un objetivo aún común en diferentes centros de investigación internacionales. Para un trabajo futuro se recomienda la implementación de otros criterios de clasificación adicionales que permitan disminuir el número de candidatos por imagen, ya que en este trabajo solo se utilizaron tres características geométricas como son la excentricidad, la redondez y el área. Se pueden utilizar otros criterios, variables o características como la entropía, centro de masas, desviación estándar, entre muchas otras. También se puede extender



el uso de las imágenes de la base de datos a los niveles 1 y 2 de sutileza, así como las que tienen nódulos que se encuentran en las regiones escondidas de la región pulmonar.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la JSRT por facilitar la base de datos de las radiografías de tórax. Igualmente al doctor Bram Van Ginneken y colaboradores por las segmentaciones manuales de los pulmones usadas en este artículo.

Referencias

- [1] P. Meza Conejo and K. Gutreiman Rubinstein. Nódulo pulmonar solitario: Revisión bibliográfica. *Revista Médica de Costa Rica y Centro América*, LXIV(580):155–159, 2007.
- [2] G. Coppini, S. Diciotti, M. Falchini, N. Villari, and G. Valli. Neural Networks for Computer-Aided Diagnosis: Detection of Lung Nodules in Chest Radiograms. *IEEE transactions on information technology in biomedicine: a publication of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 7(4):344–57, 2003.
- [3] O. Demirkaya, M. H. Asyali, and P. K. Sahoo. *Image Processing with Matlab: Applications in Medicine and Biology*, pages 260–261. CRC Press, 2009.
- [4] T. Esteves, P. Quelhas, A. M. Mendonça, and A. Campilho. Gradient convergence filters and phase congruency approach for in vivo cell nuclei detection. *Machine Vision and Applications*, 23:623–638, 2012.
- [5] M. Gabrielli. Nódulo pulmonar solitario: Desafío diagnóstico y terapéutico (Artículo de actualización). *Cuadernos de cirugía (Valdivia)*, 21:65–74, 2007.
- [6] T. Hara, H. Fujita, and Jing Xu. Development of automated detection system for lung nodules in chest radiograms. *Proceedings Intelligent Information Systems*, IIS:71–74, 1997.
- [7] T. Kawaguchi, Y. Harada, R. Nagata, and H. Miyake. Image registration methods for contralateral subtraction of chest radiographs. *2010 3rd International Conference on Biomedical Engineering and Informatics*, (Bmei):306–313, 2010.
- [8] T. Kawaguchi, R. Nagata, Y. Harada, and H. Miyake. Image registration using b-splines for contralateral subtraction of chest radiographs. *TENCON 2010 - 2010 IEEE Region 10 Conference*, pages 1589–1594, 2010.
- [9] N. Otsu. A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, SMC-9(1):62–66, 1979.
- [10] E. Casiraghi P. Campadelli and D. Artioli. A Fully Automated Method for Lung Nodule Detection From Postero-Anterior Chest Radiographs. *IEEE transactions on medical imaging*, 25(12):1588–1603, 2006.
- [11] C. J. Vicente Peña. AHE (Ecuación del Histograma Adaptativo), 1998.
- [12] N. Petkov and P. Kruizinga. Computational models of visual neurons specialised in the detection of periodic and aperiodic oriental simuli: bar and gratings cells. *Biological Cybernetics*, 76:83–96, 1997.
- [13] E. Pietka and O. Ratib. Segmentation of chest radiographs. *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, pages 1911–1912, 1992.
- [14] F. M. Rodríguez and F. J. Suárez López. Identificación dactilar basada en filtros Gabor. *Universidad de Vigo - URSI*, 2004.
- [15] Z. Shi, J. Bai, L. He, T. Nakamura, Q. Yao, and H. Itoh. A Method for Enhancing Lung Nodules in Chest Radiographs by Use of LoG Filter. *2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing*, pages 1–4, 2009.

- [16] J. Shiraishi, S. Katsuragawa, J. Ikezoe, T. Matsumoto, T. Kobayashi, K. Komatsu, M. Matsui, H. Fujita, Y. Kodaera, and K. Doi. Development of a Digital Image Database for Chest Radiographs With and Without a Lung Nodule: Receiver Operating Characteristic Analysis of Radiologists' Detection of Pulmonary Nodules. *American Journal of Roentgenology*, 174:71–74, 2000.
- [17] E. Soleymanpour, H. R. Pourreza, E. Ansaripour, and M. S. Yazdi. Fully Automatic Lung Segmentation and Rib Suppression Methods to Improve Nodule Detection in Chest Radiographs. *Journal of Medical Signals and Sensors*, 1(3):191–199, 2011.
- [18] M. Souto, P.G. Tahoces, J.J. Suárez, M.J. Lado, M. R. Jardim, J. Remy, and J.J. Vidal. Detección automática de nódulos pulmonares en tomografía computarizada. Un estudio preliminar. *Radiología*, 50(5):387–392, 2008.
- [19] S. Tsukuda, A. Heshiki, S. Katsugarawa, Q. Li, H. MacMahon, and K. Doi. Detection of Lung Nodules on Digital Chest Radiographs: Potential Usefulness of a New Contralateral Subtraction Technique. *Radiology*, 223:199–203, 2002.
- [20] B. van Ginneken, M. B. Stegmann, and M. Loog. Segmentation of anatomical structures in chest radiographs using supervised methods: a comparative study on a public database. *Medical Image Analysis*, 10(1):19–40, 2006.
- [21] B. van Ginneken, B. M. ter Haar Romeny, and M. Viergever. Computer-Aided Diagnosis in Chest Radiography: A Survey. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 20(12):1228–1241, 2001.
- [22] J. Wei, Y. Hagihara, and H. Kobatake. Detection of Cancerous Tumors on Chest X-ray Images Candidate Detection Filter and Its Evaluation. *Proceedings of International Conference on Image Analysis and Processing (ICIP)*, pages 397–401, 1999.
- [23] H. Yoshida, S. Katsuragawa, and K. Doi. Wavelet snake for classification of nodules and false positives in digital chest radiographs. *Proceedings 19th International Conference IEEE EMBS*, 509(C):1–3, 1997.
- [24] H. Yoshida, B. Keserci, K. Doi, and N. Chicago. Computer-aided diagnosis of pulmonary nodules in chest radiographs: A wavelet-based snake approach.
- [25] P. Yu, J. Zhao, H. Xu, C. Yang, X. Sun, S. Chen, and L. Mao. Computer Aided Detection for Pneumoconiosis Based on Histogram Analysis. *2009 First International Conference on Information Science and Engineering*, pages 3625–3628, 2009.

Julián Mauricio Aguillón Pérez

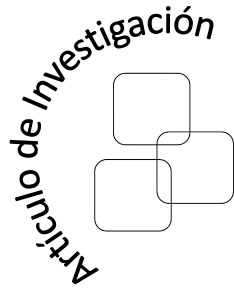
Nació en Duitama, Colombia. Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Sus áreas de interés son el Procesamiento Digital de Imágenes, las Telecomunicaciones y la Nanotecnología.

Sergio Alejandro Duarte Pacheco

Nació en Bucaramanga, Colombia. Ingeniero Electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Sus áreas de interés son el Procesamiento Digital de Señales, la Nanotecnología, la Telemática y las Telecomunicaciones.

Rodrigo Javier Herrera García

Nació en Bogotá, Colombia. Obtuvo su título como Ingeniero Electrónico en 1987 y como Magíster en Teleinformática en 1999 en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Se ha desempeñado como docente universitario desde 1988 en las Universidades Santo Tomás de Aquino y Distrital de Bogotá en las áreas de sistemas digitales y electrónica analógica. A partir de 1997 se vinculó como profesor de tiempo completo en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Actualmente, su área de interés es el procesamiento digital de imágenes y es director del grupo de Investigación, Desarrollo y Aplicaciones en Señales IDEAS-UD.



Camilo Alfonso Rodríguez Garzón
Universidad Distrital Francisco José de Caldas



Modelamiento de estaciones TransMilenio mediante Autómatas Celulares: lecciones aprendidas

Modeling TransMilenio's stations using Cellular Automata: lessons learned

Resumen

Partiendo de un modelo que permite simular el congestionamiento en una estación de TransMilenio, se presenta una reflexión acerca de las consecuencias del uso del paradigma utilizado (autómatas celulares), así como de aspectos idiosincráticos que repercuten en el modelo. Se discuten simultáneamente los desafíos técnicos e intelectuales que ello implica: simular las complejidades de un sistema en apariencia simple, pero que exhibe una enorme diversidad de comportamientos y variables plantea afrontar nuevos enfoques y técnicas. El Ingeniero, bajo su status quo en la sociedad, debe replantear sus esquemas y combinar disciplinas tradicionales y emergentes para enfrentar dichos retos. La experiencia que se recopila, da cuenta de ello.

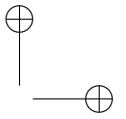
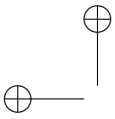
Palabras claves: Autómata Celular, cultura TransMilenio.

Abstract

A discussion is carried out on the basis of a model that simulates TransMilenio's stations overcrowding, about the consequences of the paradigm of choice (Cellular Automata) and the cultural aspects of the users. This is done taking into account the implications involved: the fact of analyzing complexities in real life open-up new perspectives, revealing that established schemes must be questioned in order to react and handle them. Any engineer committed to the society that educated him must be aware that modern challenges imply new skills, particularly, the ability to combine the old and the new, regarding systems engineering paradigms.

Keywords: Cellular Automata, TM idiosyncrasy, Engineering

Recibido: 10-08-2014
Modificado: 01-12-2014
Aceptado: 02-12-2014



1. Introducción

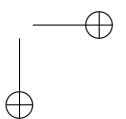
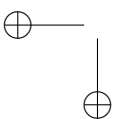
Es curioso observar cómo la complejidad de diferentes objetos y situaciones, como un ecosistema, la bolsa de valores o un tornado se encuentra regida por simples interacciones locales entre sus componentes. Esta característica, descrita por diferentes autores como pilar de los sistemas complejos [1, 2] es aprovechada en un reciente estudio [3], para simular la situación que se presenta dentro de una estación del sistema de buses rápidos de Bogotá - TransMilenio. Dicho estudio toma como base un modelo de Autómata Celular (AC), concebido para evolucionar mediante reglas simples, para así obtener la esencia del comportamiento de una multitud a lo largo de un día normal de operación del sistema. De ese trabajo se parte aquí para analizar las características, ventajas y limitaciones del uso de un AC. El artículo se divide en cuatro secciones: la primera de ellas como una recapitulación de hechos, la segunda cuenta lo relativo al uso de los AC, la tercera toca los aspectos idiosincráticos de la sociedad que consume TransMilenio y finalmente una conjugación de las partes a manera de conclusión.

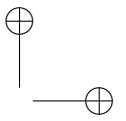
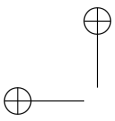
2. Recapitulación de hechos

Con el objetivo de permitir la comprensión de lo que se habla, se pone en contexto al lector: TransMilenio es el sistema de buses de tránsito rápido construido en la ciudad de Bogotá, Colombia, ideado como eje principal para la modernización y ampliación del sistema de transporte público bogotano cuyos componentes son principalmente estaciones, buses y carriles exclusivos que bajo un sistema de gestión permite la organización de los mismos en diferentes horas por medio de rutas con el objetivo de transportar personas. La principales ventajas de este sistema son la exclusividad de carriles vehiculares por donde se mueven los buses de manera preferente y su detención en puntos estratégicos. El asunto de interés es el congestionamiento que se ha venido presentando en las estaciones de abordaje, sin faltas, en las horas de mayor flujo de personas (horas pico) que es cuando estas van de sus hogares a lugares de trabajo por la mañana y viceversa en la tarde.

Esta situación, observada como una interacción entre pasajeros que toman buses genera comportamientos en la escala de multitud como congestiones, formación de líneas y oscilaciones que son el resultado básicamente de personas en movimiento que se dirigen hacia el frente (bidireccional) y de personas esperando la llegada del bus. De aquí a que sea factible la construcción de modelos que hagan uso de la computación celular para tomar todas las ventajas que esto implica [1, 2, 4]: determinar reglas locales de interacción entre los componentes que mediante la evolución del sistema muestren rasgos a escalas superiores que reproduzcan aquellos de la realidad.

De los modelos computacionales más simples para lograrlo se encuentran los AC, los cuales son un sistema cuyo espacio es un arreglo de celdas donde agentes y reglas evolucionan en el tiempo desde una configuración inicial [5]. Lo interesante y la motivación de los mismos nace desde la complejidad de la naturaleza: componentes que interactúan en un sitio mediante relaciones simples (un químico reaccionando con otro, una célula devorando/ayudando a otra, un planeta que atrae/repele a otro) pero que al presentarse en gran número muestran comportamientos que sobrepasan lo que podría esperarse (reacciones autocatalíticas, sistema inmunológico y mareas).





Entre los modelos desarrollados que utilizan AC para representar el movimiento peatonal se encuentran [6] y [7], lo que sumado a su sencillez (base para representar sistemas complejos) indican, uno su eficacia y dos su fácil implementación.

Este trabajo toma como objeto de reflexión un modelo de AC para simular la multitud dentro una estación de TM, que aborda diferentes aspectos que por su naturaleza no son abordados acá, más que por una mera descripción de los mismos: descripción del estado del arte, representación, diseño e implementación del modelo y algoritmia y tecnicidades de implementación y experimentación. Una descripción del diseño de la algoritmia y estructuras computacionales descritos se encuentra en [8]; mientras que la explicación detallada, junto con los experimentos y resultados del simulador se documentaron en [3].

Ya que se tiene el objeto de reflexión identificado, se continua con observar el trabajo llevado a cabo con los AC, que incluye una descripción de los mismos y del modelo revisado junto con una disertación de sus características ante la realidad de la situación. Para luego continuar con los aspectos idiosincráticos más relevantes que hacen parte de la realidad y no son tenidos en cuenta en el modelo del estudio desarrollado, pero que a manera de reflexión sobresalen.

3. Autómatas Celulares

Los AC son una herramienta computacional para representar sistemas complejos, basta con ver el gran número de trabajos realizados, por citar pocos de ellos [5, 9–11]. Se componen de un arreglo de celdas (generalmente rectangular) cuyos estados evolucionan acorde a un conjunto de reglas simples que consideran los estados de sus vecindades.

De aquí surgen comportamientos a escalas superiores, basta con ver uno de los ejemplos más sencillos de todos: El juego de la vida [11]. Este AC consta de cuatro reglas que asemejan la vida descritas a continuación, lo notable es ver cómo desde algunas configuraciones iniciales especiales se observan comportamientos a escalas superiores y en ningún momento configurados (ver Figura 1).

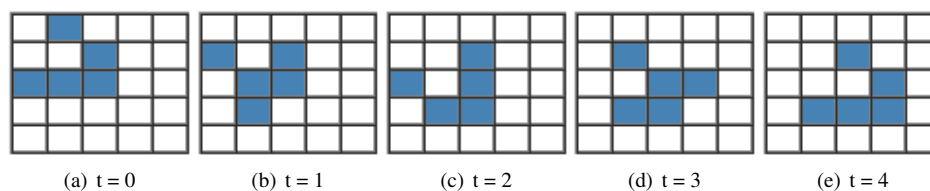


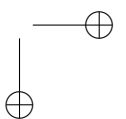
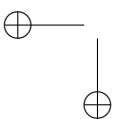
Figura 1: Ejemplo de evolución en deslizador en el juego de la vida. Desde la configuración de (a) y siguiendo las reglas es posible obtener una estructura que no se destruye y mueve por el arreglo de celdas. Fuente: elaboración propia.

Regla 1. Una celda ocupada con menos de dos vecinos muere por soledad.

Regla 2. Una celda ocupada con cuatro o más vecinos muere por sobrepoblación.

Regla 3. Una celda ocupada con dos o tres vecinos sobrevive.

Regla 4. Una celda vacía con tres vecinos revive.



Para el caso del modelo en cuestión, el fenómeno de interés es la ocupación, y en particular el congestionamiento de las estaciones de TM, que se considera un comportamiento global que emerge del comportamiento individual de los pasajeros, por lo cual las reglas deben estar asociadas a sus movimientos.

El modelo considera cinco posibles orientaciones: arriba, izquierda, derecha, abajo y quieto, que definen la tendencia hacia donde se mueven las personas. Ya con esto se forma un conjunto de reglas, replicadas por cada una de las orientaciones (la Figura 2 lo muestra para la derecha) que toman la esencia del movimiento de las personas dentro de una estación: si no tiene nadie al frente ¹ de un paso en esa dirección (regla 1), si solo puede moverse hacia su izquierda, derecha, izquierda-frente o derecha-frente (exclusivamente) realice ese movimiento (reglas 2, 3, 4 y 5), si se encuentra con alguien al frente y hay espacios, muévase hacia izquierda-frente o derecha-frente (regla 6) y dos reglas más que permiten el movimiento al inicio o dentro de un congestionamiento, que es cuando toda la parte delantera o delantera-lados se encuentra bloqueada (reglas 7 y 8) (ver Figura 2). Existen dos cuestiones a tener en cuenta: la aplicación de estas reglas es estocástica, lo que agrega ese componente humano de indecisión e incertidumbre y la determinación de estos parámetros aleatorios para llevar el modelo lo más cerca a la realidad.

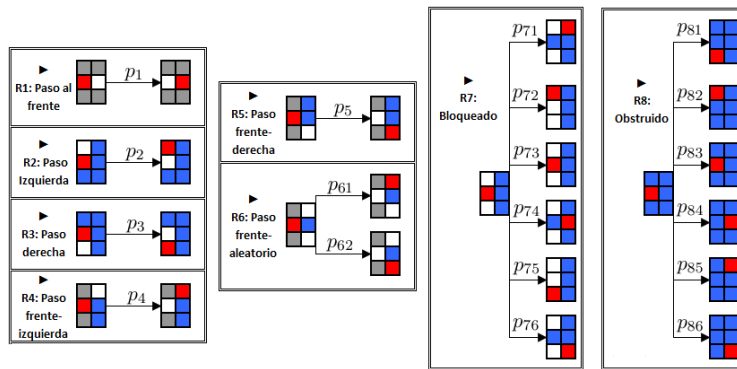


Figura 2: Reglas orientación derecha, un cuadro blanco significa que no está ocupada la celda, uno rojo indica la presencia del agente que actualmente se está moviendo, azul contiene otro agente y gris indica que no interesa si está o no ocupada la celda.

Un ejemplo de la evolución del AC mencionado a partir de una configuración inicial de una estación vacía en el $t=0$, se puede apreciar en la Figura 3(b) en el $t=4000$. Se tienen en cuenta parámetros como promedio de llegada de buses y personas en una hora, ocupación de los buses, tiempos de espera y otros configurados previamente y divididos por horas de mayores congestiones. Existe un recuadro (12:23,1:307) en el centro del AC que representa la estación donde los puntos y algunas conglomeraciones de los mismos muestran pasajeros y tumultos, en la parte derecha una concentración intentando ingresar a la estación y a los lados de arriba y abajo de este recuadro tres buses abordando pasajeros.

Una vez capturada la naturaleza del movimiento de personas, permanecen aún fuera de contexto temas como la llegada y partida de buses y de pasajeros, la resolución de conflictos, los cambios de orientaciones, la situación en torniquetes y la detención de pasajeros (tanto dentro de los buses como al momento de esperarlos) los cuales se detallan a continuación.

¹Frente, adelante, atrás y derecha son relativos a la orientación.

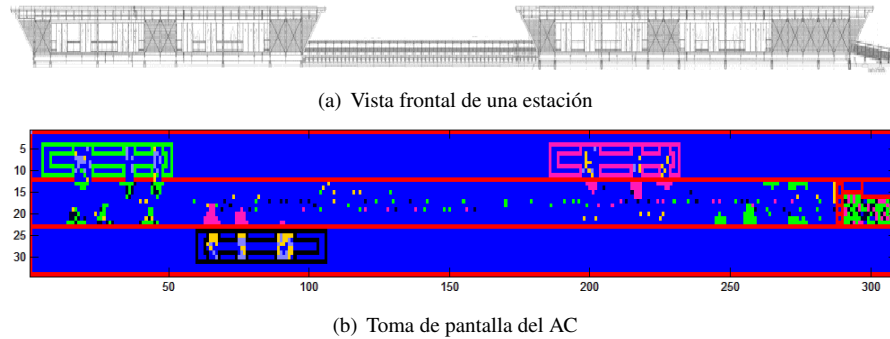


Figura 3: Vista frontal de una estación TM (a), la representación del AC (vista superior) se observa en (b), aquí se observan los componentes mencionados: buses, estación, torniquetes y pasajeros que interactúan mediante las reglas mencionadas anteriormente de acuerdo a la orientación. A pesar de no ser mostrado, en memoria se lleva a cabo control de movimientos, orientaciones, torniquetes, vecindades, conflictos, buses, horas, colas y reglas.

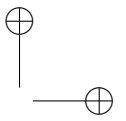
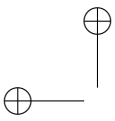
Para la entrada de pasajeros se selecciona aleatoriamente un pasajero (o bus) cuando su tiempo de llegada, calculado mediante una distribución de Poisson, llega a cero, momento en el cual es colocado en una cola FIFO² para luego determinar si existe espacio y ser puesto dentro de la cuadrícula del AC, mientras que la salida para los pasajeros es determinada por la posición del agente o cuando culminan el ciclo llegada-apertura de puertas-abordaje-salida para los buses. La resolución de conflictos se presenta cuando dos o más agentes desean ir hacia la misma celda vacía, para esto primero se determina quién quiere ir a dónde y con esto elegir aleatoriamente uno para su posterior movimiento real³. Los cambios de orientaciones se realizan mediante ciertas secciones designadas dentro de la cuadrícula del AC que re-orientan el agente de acuerdo a condiciones específicas e.g., un agente saliendo (orientación arriba o abajo) de un bus al llegar a determinada fila su orientación cambia para que pueda salir (orientación derecha) o un agente se detiene en cierta franja porque está esperando a su bus. En cuanto a los torniquetes son manejados como servidores que atienden a un único agente para moverlo de un lado para otro (interno-externo o viceversa) y ha de controlarse quién es atendido.

Durante el desarrollo del modelo, los autores evidenciaron desafíos académicos que tuvieron que ser solventados, y que implicaron combinar diversos enfoques y técnicas. A continuación se presentan las principales lecciones aprendidas durante dicho proceso, y se discuten a manera de reflexión para los interesados en abordar este tipo de estudios aplicados a situaciones complejas de nuestra realidad.

Sencillez. “El todo es más que la suma de las partes” reza una gran máxima que representa a los AC (y en general a todos los sistemas). De agentes moviéndose regidos por reglas dentro de una cuadrícula emergen dinámicas globales, para el caso, formación de líneas, congestionamientos y oscilaciones son observadas en la ejecución del AC.

²First in, first out. El primero en entrar es el primero en salir

³En este punto, un modelo extendido permitiría la configuración de parámetros de afán y agresividad, dando prioridad a ciertos agentes sobre otros.



Reglas. Dan las normas que definen los nuevos estados del AC, son a los sistemas lo que las relaciones entre los componentes determinan, quizás constituyen, junto con la definición de los estados de las celdas, el aspecto más álgido de su modelamiento. Junto a esto, las reglas son las que posibilitan la emergencia de comportamientos globales, característica que hace robustos los AC; asimismo es importante conocer los posibles casos de reglas factibles, ya que por ejemplo depende de la orientación de los agentes el conjunto de reglas aplicado.

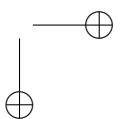
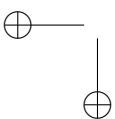
Vecindad. De acuerdo al estado de cada una de las celdas alrededor de una ocupada depende su transición al estado en el siguiente paso de tiempo (vale resaltar que la evolución ocurre precisamente en pasos discretos de tiempo celular). Aquí un aspecto a tener en cuenta, ya que depende del autor el número de vecinos y su distancia al origen para determinar el número de reglas y la forma de las mismas. Este componente se homologa con los sentidos, en especial la visión, ya que de acuerdo a esto las personas toman decisiones para cambiar diferentes comportamientos que determinan su rumbo, velocidad y aceleración. Para el caso se determina la vecindad como el conjunto de los ocho vecinos contiguos en cada posible dirección.

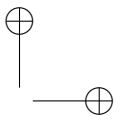
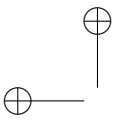
Espacios. De la cuadrícula discretizada se obtienen espacios de dimensiones fijas que representan las celdas del espacio del AC y solamente pueden estar ocupadas por uno y sólo un agente a la vez. Pero el hecho que una madre lleve a su pequeño hijo, una pareja camine tomada de la mano o un simple estudiante que carga una maleta estorbosa, lleva a la modificación dinámica del espacio ocupado por cada uno, lo que sin duda altera y modifica la configuración.

Compresión. Continuando con la idea del anterior item, pero observándola desde un punto de vista diferente: así como no es posible que un agente ocupe un espacio mayor, no lo es que ocupe un espacio menor. Y esto es lo que sucede a la hora de esperar un bus, a medida que pasa el tiempo y con la llegada de buses diferentes a los que espera la gran mayoría, el espacio personal se ve disminuido por dos razones: la llegada de nuevos pasajeros y la expectación de los pasajeros por subirse en un bus, lo que genera la disminución del espacio personal de cada uno. De hecho, un observador desprevenido, podría asegurar que en las horas pico en el sistema real, la aglomeración es tal que pareciera que mas de una persona ocupase el mismo espacio al mismo tiempo.

Conflictos. Aunque la suposición es que dos personas (agentes) no pueden ocupar la misma celda en el mismo instante de tiempo, la aplicación de las reglas de manera simultánea da origen a conflictos de personas intentando ocupar la misma posición. Las reglas no son aplicadas inmediatamente, ya que dependería del orden de la aplicación de las mismas que uno de dos agentes que desean ir al mismo lugar sea preferente. Lo que es realizado es la determinación de pretendientes hacia una celda para su posterior elección aleatoria de uno de ellos. Y aquí surge un dilema: ¿qué tanto la personalidad agresiva o pasiva de una persona hace que no sea aleatorio este movimiento hacia un espacio vacío?

Sincronización. La teoría dicta que la sincronización de cada una de las celdas dentro de un AC ha de realizarse armónicamente. Esta cuestión dicta profundos inconvenientes ya que a pesar de contar con procesadores que ejecutan millones de tareas por segundo y contar con unos cuantos procesadores, no logran una simultaneidad pura.





Es por esto que el AC se ejecuta con cierto orden: izquierda derecha, arriba abajo, combinado, realmente no interesa, la cuestión es bloquear de alguna manera las celdas que ya se han actualizado para evitar una posible inconsistencia con las leyes de la física, que el modelo debe respetar: una propagación incontrolable que no conserva la materia ⁴.

Adaptabilidad. Así como es posible utilizar el modelo para simular la situación de congestión, es factible su uso para simular situaciones de evacuación. El resultado obtenido: el tiempo que las personas se demoran en pasar por el torniquete influye así como la apertura de todas las puertas para un mejor tiempo de evacuación. Lo interesante de esto es la posibilidad de simular ese tipo de situaciones y producir estrategias que pudiesen ser implementados para disminuir el daño causado por las mismas.

4. Idiosincrasia

Aspectos como la sincronización, espacio y velocidad son propios de los AC y son el grueso del diseño del modelo. Sin embargo, a continuación se discuten aspectos del sistema real, de tipo idiosincrático, que escapan a las características estándar consideradas por los AC. Cabe aclarar que algunos de estos comportamientos son propios de la cultura bogotana, en otras ciudades o países pueden verse aumentadas o disminuidas, o incluso no verse, pero que escapan del ámbito del AC, y que constituye una de sus limitaciones y que originan los cuestionamientos acerca de cómo abordarlos desde una perspectiva ingenieril, sistémica, sociológica, en últimas, científica.

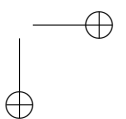
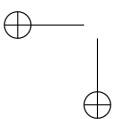
Colados. Son aquellas personas que por diversas razones entran a la estación por lugares no autorizados, como las puertas de embarque y desembarque hacia y desde los buses. Si bien son pocos comparados con todos los que entran por las puertas, la constante periodicidad en algunas estaciones puede llegar a convertirse en un aspecto de consideración.

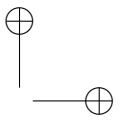
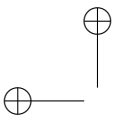
Transbordos. No siempre un usuario llega a su destino en un solo bus, de acuerdo a la distribución de rutas por todo el sistema, o por velocidad, se hace necesario tomar dos o más buses de diferentes rutas, en la estación donde se realiza este cambio se observa un agente ir de una puerta a otra.

Libre albedrío. Las diferentes acciones repentinas de las personas: no esperar frente a la puerta, detenerse repentinamente, devolverse, cambiar de carril, protestar, empujar y otras, adiciona en diferentes momentos y de distintas maneras aleatoriedad al comportamiento común que el conjunto de reglas establece. Son estas piezas las que precisamente producen el comportamiento complejo e inesperado en la situación real, por lo que si se desea reducir la brecha modelo-realidad es necesario abordarlas de alguna manera.

Infraestructura de las estaciones. Puertas abiertas, lentas en abrir, sin abrir, rotas, torniquetes dañados y en general cualquier daño físico que se presenta en la estación. Algunos

⁴Si es controlado adecuadamente permite su uso en modelos de propagación como incendios, pandemias, metástasis y otros similares.





afectando ligeramente (una puerta lenta en cerrar) y otros seriamente (un torniquete dañado). En la realidad se minimiza su frecuencia y tiempo en corrección, aun así y como todo, ha de tenerse en cuenta.

Situaciones de evacuación. En el modelo se simulan situaciones de pánico ideales donde no se tienen en cuenta factores emergentes como la agresividad, velocidad de reacción y angustia generada, lo que repercute en los resultados.

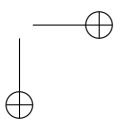
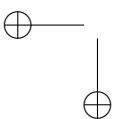
5. Conclusiones

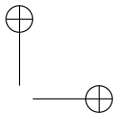
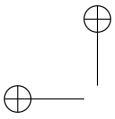
Cuando de investigar con sistemas complejos se trata es necesario realizar una aproximación desde dos puntos distintos: uno holístico determinando las reglas de comportamiento del sistema para emerger comportamientos globales, y uno determinístico que permita tratar temas puntuales de la realidad, por medio de diversos medios clásicos como estructuras de datos, probabilidades, álgebra y algoritmia con el fin de intentar abordar todos los aspectos del sistema que acerquen el modelo a la realidad. Se observa cómo es necesario un punto intermedio entre la ingeniería de sistemas complejos y la clásica, unir lo mejor de los mundos y encontrar oportunidades en falencias del otro agrega una riqueza exquisita en el tema.

En este artículo se han discutido las ventajas y limitaciones del modelo AC para simular la realidad de una estación TM. Estas reflexiones responden a características no tenidas en cuenta ni descritas en documentación alguna ya que surgen de la adaptación de un modelo teórico a una situación actual, así como de aspectos sociales de la cultura que no encuentran su representación en los conceptos teóricos. Su análisis profundo e implementación requiere del enfoque mencionado anteriormente para detallar y tratar cada uno de los aspectos mencionados.

Referencias

- [1] Hoekstra, A., Kroc, J., and Sloot, P. Introduction to modeling of complex systems using cellular automata. In *Simulating Complex Systems by Cellular Automata*, Understanding Complex Systems, pages 1–16. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [2] Mina, A., Braha, D., and Bar-Yam, Y. Complex engineered systems: A new paradigm. In Dan Braha, Ali A. Minai, and Yaneer Bar-Yam, editors, *Complex Engineered Systems*, Understanding Complex Systems, pages 1–21. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [3] Rodríguez-Garzón, C.A. *Dinámica de (des)congestionamiento de estaciones TransMilenio mediante Autómatas Celulares Discretos*. Trabajo de Grado (Ingeniero de Sistemas). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. 2014.
- [4] Rojas-Galeano, S.A. Paradigmas alternativos de computación: paralelismo y simplicidad inspirados en la biología. *Ingeniería*, 5(1), 1999.
- [5] Ilachinski, A. *Cellular Automata: A Discrete Universe*. World Scientific Pub Co Inc, reprint edition, July 2001.



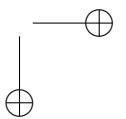
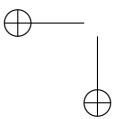


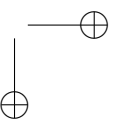
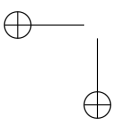
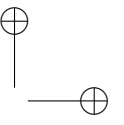
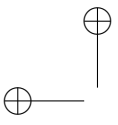
- [6] Burstedde, C., Klauck, K., Schadschneider, A., and J. Zittartz. Simulation of pedestrian dynamics using a two-dimensional cellular automaton. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 295(3-4):507–525, June 2001.
- [7] Kirchner, A. and Schadschneider, A. Simulation of evacuation processes using a bionics-inspired cellular automaton model for pedestrian dynamics. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 312(1-2):260–276, September 2002.
- [8] Rojas-Galeano, S.A. and Rodríguez-Garzón, C.A. A discrete model of transmilenio station occupation: Representation and algorithms. *Revista de Ingeniería Universidad de los Andes*, page 27–32, August 2014.
- [9] Neumann, J. and Burks, A.W. *Theory of Self-Reproducing Automata*. University of Illinois Press, 1966.
- [10] Hoekstra, A., Kroc, J., and Sloot, P. *Simulating Complex Systems by Cellular Automata*. Springer, 2010.
- [11] Gardner, M. The fantastic combinations of john conway’s new solitaire game of life. *Scientific American*, 223(4):120–123, 1970.

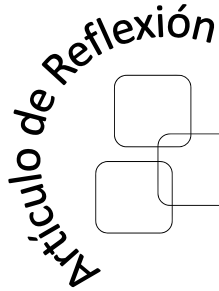
Camilo Alfonso Rodríguez Garzón

Ingeniero de sistemas de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, interesado en autómatas celulares, lógica difusa, redes neuronales, virtualización y seguridad de la información, actualmente cursando una maestría en Seguridad de la Información, correo electrónico: camilo.18.20@gmail.com

Systems Engineer from the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, interested in cellular automata, fuzzy logic, neural networks, virtualization and information security. He is currently enrolled in a MSc. degree in information security. e-mail: camilo.18.20@gmail.com







Germán A. Méndez Giraldo
Director e investigador del grupo de
investigación Simulación y Sistemas
Expertos.
Profesor del Doctorado en Ingeniería
Universidad Distrital Francisco Jose de
Caldas
gmendez@udistrital.edu.co



Consideraciones sobre la línea de investigación en Inteligencia Organizacional en el Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas

On research aspects of Organizational Intelligence at the Engineering Doctoral Program of Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Resumen

Este documento presenta los aspectos más relevantes de la línea de investigación de Inteligencia Organizacional en el contexto del Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital, cuyo principal énfasis es en Ciencia y Tecnología de la Información y del Conocimiento. Desde esta óptica, la inteligencia organizacional permite estudiar y entender las formas en que las organizaciones generan, socializan y utilizan el conocimiento individual y colectivo para su beneficio. Esta línea propende por contextualizar estos procesos en el caso colombiano, a su vez se pretende estudiar las organizaciones sociales desde los enfoques fundamentados en los modelos de inteligencia. Todo esto se encamina a difundir estas temáticas a fin de motivar en el doctorado un mayor interés y entendimiento y así potencializar las investigaciones en el ámbito de las empresas y de la sociedad en general, apoyadas por el grupo de investigación de Sistemas Expertos y Simulación.

Palabras claves: inteligencia organizacional, conocimiento individual, conocimiento colectivo, representación del conocimiento, socialización del conocimiento.

Abstract

This paper describes the most relevant aspects of the research field of Organizational Intelligence in the context of the Doctoral Program in Engineering from the District University of Bogota, whose main focus is the branch of Science and Technology of Information and Knowledge. From this perspective, Organizational Intelligence may help in understanding the means by which organizations create, socialize and use individual and collective knowledge to their benefit. This research field aims to characterize these processes within the Colombian studying social organizations from intelligence model approaches. All of the above is intended to increase the interest in this field and to motivate the proposal of research projects involving the industry and the society as a whole, with the support of Expert Systems and Simulation research group of the doctoral program.

Palabras claves: organizational intelligence, individual knowledge, collective knowledge, knowledge representation, knowledge socialization.

Recibido: 06-11-2013
Modificado: 05-09-2014
Aceptado: 12-10-2014

1. Introducción

La inteligencia organizacional (IO) se ha constituido en una abundante fuente de investigación debido a los múltiples enfoques con que se pueden abordar los trabajos científicos relacionados; por ejemplo, los enfoques de la psicología, la sociología, la gestión y, desde luego, desde la perspectiva de la ingeniería del conocimiento y las ciencias de la información. Desde la percepción de esta temática se distinguen dentro de las áreas de investigación aspectos tales como la inteligencia individual y su proceso de colectivización; por otro lado, se dispone de un espacio de trabajo para la organización empresarial, que con sus características y propiedades son propensas a aprender y compartir conocimiento y, por lo tanto, pueden derivar ventajas competitivas en el mercado. Finalmente, se genera otro espacio investigativo que concierne a las organizaciones no empresariales, que también pueden y quieren aprender para mejorar su desempeño y obtener beneficios no necesariamente de carácter económico; entre ellas están las redes y subredes sociales, grupos de interés, entre otros.

Se puede definir la inteligencia organizacional como la capacidad que una organización (por lo general de carácter empresarial) tiene para adquirir nuevos conocimientos y para poderlos utilizar con miras a generar un beneficio integral a todos los actores que hacen presencia en dicha organización. Si bien este enfoque orienta la mayoría de trabajos académicos, no representa todo el espectro de los posibles temas de investigación, ya que no contempla todo el potencial de la generación, transformación y representación en torno al conocimiento individual y sus procesos de colectivización.

Es por ello que en la literatura de gestión estratégica de los negocios se explican las variaciones en el desempeño entre compañías a partir de la mirada que den a sus propios recursos [1], [2] y en general al proceso de innovación [3]. Así mismo se confirman los efectos del modelo gerencial basado más en los ejemplos de los gerentes, como en el caso de la práctica ética [4], de las relaciones con los empleados, aun sin distinciones de género [5]; y se realza el efecto de una buena inteligencia emocional y de la congruencia en las relaciones y buen trato con los supervisores [6]. Se considera que aquellas empresas que poseen recursos únicos e ilimitados sobreviven o tienen mejor desempeño en el mercado competitivo [7].

La base de conocimiento de una organización son sus recursos, noción que ha estado en el centro de la mayor parte de discusiones recientes en torno a los conceptos de gestión de conocimiento [8], creación de conocimiento [5] e inteligencia organizacional [9], [10]. En [11] se propone que la inteligencia organizacional conduce a la innovación organizacional. Y es que tanto la inteligencia individual como la colectiva han sido asociadas a la creatividad, a la vez que a mejorar las ventajas que estas organizaciones pueden generar en el mercado involucrando en su quehacer la experiencia propia y de terceros [12], [13], [3] y especialmente la adquirida por la relación contractual con sus clientes, aunque esto en la mayoría de casos requiera de un mediador o facilitador para ello [14], [15].

La inteligencia de grupo o equipo incrementa la habilidad de éstos para generar nuevos productos, debido a que los equipos inteligentes son aquellos que estimulan a quienes toman las decisiones al desacuerdo y retan la opinión de unos u otros a través de procesos de generación, disseminación y utilización de inteligencia [12], [16]. Por lo tanto, la inteligencia de equipo en el desarrollo de un nuevo producto conduce a la creatividad para la obtención de los mismos.

Estos conceptos explican la relación entre conocimiento organizacional y ventaja competitiva [13] pero mostrando la necesidad de una adecuada estructura organizacional para disponer de un modelo de inteligencia [17]. Aquellas organizaciones con sistemas de gestión de conocimiento efectivos, que les proporcionan ventajas competitivas con base en el conocimiento sobre sus competidores, se consideran organizaciones inteligentes [18], especialmente cuando facilitan la adquisición de este saber por parte de la estructura de mando [19]. El concepto de inteligencia organizacional usa las teorías del aprendizaje organizacional [20], en particular la importancia de la creación del conocimiento [21], así como el reconocer su entorno para la representación del mismo [22] y lo que corresponde a su uso en la orientación hacia el mercado [23]; además de la integración de la inteligencia individual como plataforma para proveer una visión respecto a cómo las organizaciones pueden adquirir, diseminar y utilizar información, respondiendo rápidamente para facilitar y crear ventajas competitivas mediante el análisis y comparación con su competencia [24], lo que requiere como preámbulo la definición de su propio rol y el de sus integrantes [25].

Este documento intenta mostrar algunos de los aspectos más relevantes de la línea de investigación, su impacto dentro del énfasis en Ciencia de la Información y el Conocimiento dentro del Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y del soporte que le brinda el grupo de investigación en Sistemas Expertos y Simulación (SES).

2. Antecedentes

El grupo de investigación de Sistemas Expertos y Simulación (SES) el cual soporta la línea de investigación de Inteligencia Organizacional en el Doctorado de Ingeniería, fue creado en el año 2001. Su origen se da como respuesta a la necesidad de unir esfuerzos para la investigación, especialmente en el tema de la simulación como técnica emergente de la investigación de operaciones y que por aquel entonces se convertía en una oportunidad para mejorar el desempeño empresarial, a la vez que permitía un banco de temas de extensión, innovación e investigación, como se demuestra en [26], [27] y [28]. Éste fue uno de los primeros grupos del proyecto curricular de Ingeniería Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y se convirtió en pionero al realizar proyectos de investigación que vinculaban grandes equipos (mayores a 20 estudiantes de pregrado), lo que permitió incursionar en el aprendizaje y socialización del conocimiento colectivo de naturaleza colaborativa, al tratar de representar el sistema complejo de la empresa en sus áreas funcionales [29], [30].

A medida que se han desarrollado proyectos de investigación tanto con estudiantes de pregrado, especialización y maestría, el grupo se ha distinguido por tener la capacidad de analizar sistemas mediante el uso de múltiples herramientas en el contexto de la investigación de operaciones y especialmente por trabajar con diferentes enfoques de simulación, [31] - [34].

Esta razón motivó la creación del subgrupo de interés en Modelamiento Social en el año 2008, del cual se ha derivado una interesante producción científica, tanto en ponencias nacionales como internacionales, artículos y libros. Con este subgrupo se ha intentado responder a las necesidades de pertinencia del grupo SES a la hora de modelar situaciones de interés social, desde la perspectiva de la simulación continua, [35] - [37].

Desde su creación en 2001 propuso un proyecto de investigación que consistió en el diseño de un prototipo de diagnóstico para la pyme mediante sistemas dinámicos [29], y creó de esta forma una metodología para la adquisición de información y su representación mediante modelos de simulación para cada una de las áreas funcionales y su posterior integración. Años más tarde, en convenio con el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Industria Electro Electrónica e Informática (CIDEI), se desarrolló un proyecto denominado “Mediante metodologías de inteligencia competitiva y esquemas de asociatividad, desarrollar una oferta de bienes y servicios de automatización de bajo costo, que satisfaga las necesidades de modernización de tres cadenas productivas, clientes potenciales del clúster de la industria electro electrónica de Bogotá y Cundinamarca”. Allí se utilizó la misma metodología de adquisición de conocimiento para 15 empresas de tres sectores industriales diferentes [38].

Ha sido de interés para el grupo SES trabajar con otros grupos de la universidad, así como que sus integrantes se vinculen a redes de trabajos nacionales e internacionales. En 2009, junto con el grupo GICOGÉ desarrolló un proyecto de investigación en el marco del *Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions (LACCEI)* en el que se propuso el diseño y desarrollo de una metodología de acreditación para el consorcio LACCEI, con base en el modelo de capacidad de maduración integrado CMMI [39]. Este modelo también buscaba una representación de conocimiento encaminada a mejorar los estándares de calidad en los programas de ingeniería.

Por la misma época, el grupo en conjunto con docentes de universidades de Estados Unidos y Chile decidieron realizar un libro de simulación como mecanismo de socializar y compartir sus experiencias académicas e investigativas, como la de [40].

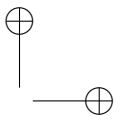
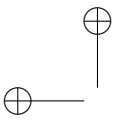
Por otro lado, algunos de sus integrantes han recibido reconocimientos nacionales e internacionales, como tesis de pregrado y maestría con carácter meritatorio y laureado (máxima distinción dada a los trabajos de grado de la Universidad Distrital), primer lugar en el Primer Concurso de Simulación en Logística y Flexsim (2009), mejor artículo técnico de estudiantes de Ingeniería Industrial IIE 2011 Región 16 (Latinoamérica), entre otros.

El grupo SES ha contribuido con la formación investigativa de aproximadamente 50 estudiantes de pregrado, 10 de maestría y actualmente está formando a dos estudiantes de doctorado.

3. Justificación

La línea de investigación en Inteligencia Organizacional apoyada por el grupo SES pretende aportar nuevo conocimiento en los modelos de inteligencia organizacional que mejoren la capacidad de abstracción, generación, representación, colectivización y mantenimiento del conocimiento de las organizaciones y su adecuado uso en los procesos de toma de decisiones en todos los campos del devenir empresarial y en todos los niveles, en especial en los estratégicos y tácticos.

Entendiendo que estos procesos: de adquisición, representación y toma de decisiones; se circunscriben a las condiciones propias de la cultura individual y social y, por ende, repercuten



en la cultura de las empresas. Además, los desarrollos en el mundo académico y científico de otros contextos no siempre son adecuados al caso de la industria latina y mucho menos al del entorno colombiano.

Adicional a todo lo anterior, esta línea de investigación doctoral pretende ampliar estos campos del modelado de la inteligencia organizacional a los entornos sociales, ya que las características, pero a la vez las limitaciones, entre el mundo empresarial y el entorno de las sociedades difieren, lo que se convierte en una oportunidad para utilizar la gestión del conocimiento desde la perspectiva ingenieril en medio para desarrollar y mejorar el bienestar de la sociedad. Todo esto implica que se requieran adaptar estos procesos, no sólo a los entornos culturales propios de las microsociedades dadas en la empresa, sino contextualizarlos en el ámbito de las culturas y subculturas de la sociedad colombiana. Para el grupo de investigación el reto es dar respuesta a estos y otros interrogantes desde una perspectiva del conocimiento y mediante un enfoque integral y sistémico.

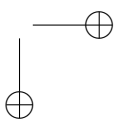
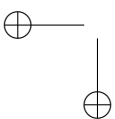
Las propuestas investigativas están enmarcadas en los aportes metodológicos desarrollados en el grupo SES y corresponden a sus objetivos planteados, que se pueden sintetizar como los de adquirir el conocimiento que permita diseñar y modelar los sistemas de los ambientes económicos y sociales. Para ello se pueden utilizar, entre otras técnicas, las de los sistemas expertos, la simulación del sistema y otras derivadas, de tal suerte que se facilite el proceso de identificar, definir y analizar el conocimiento necesario de los factores determinantes en las organizaciones en procura de generar las ventajas competitivas en la industria colombiana y la sociedad en general.

No sólo resulta útil desde la perspectiva económica para los negocios capitalizar su intangible más valioso, lo es el conocimiento, en aspectos como las propuestas de nuevos o mejores desarrollos de productos y procesos, adicionalmente resulta de interés para la sociedad poder tener una ganancia ya no en la perspectiva económica sino en la de mejorar la cultura y con ella el comportamiento colectivo de sus ciudadanos, lo cual eleva el uso de recursos a la vez que permite mejorar el bienestar de la sociedad y su productividad.

4. Objetivos de la línea

El objetivo principal es adquirir el conocimiento que permita diseñar y modelar los sistemas de los ambientes económicos y sociales y que mediante los sistemas expertos, la simulación del sistema y otras técnicas derivadas, permit: identificar, definir y analizar el conocimiento necesario de los factores determinantes en las organizaciones en procura de generar las ventajas competitivas en la industria colombiana, y la sociedad en general con el fin de establecer acciones que apoyen y los desarrollen armónicamente.

Todo esto se logra al investigar en los aspectos referidos a la adquisición eficiente y permanente del conocimiento individual y su posterior mecanismo para aportar al acervo colectivo dentro de la organización. Esto implica el estudio de metodologías de transmisión efectivas, socialización y cambio de la cultura laboral donde se privilegie el quehacer de los equipos de trabajo frente a los tradicionales logros individuales.



Por otro lado, en el caso de la adquisición de nuevo conocimiento se presenta un escenario cercano a la creación de nuevo conocimiento. En este caso, se pretenden definir nuevos modelos o modificar los existentes para los procesos de la investigación, desarrollo e innovación ($I+D+i$), enfocados principalmente a la creación de nuevos productos y procesos productivos o la modificación exitosa de los ya disponibles en la organización, integrando los saberes propios de la calidad, así como las metodologías de la gestión de proyectos.

Frente al procesamiento de la información y los juicios que tienen los actores que están involucrados en la empresa o en la sociedad, la línea de Inteligencia Organizacional se interesa principalmente en el estudio de la creación de nuevo saber, su apropiación y la aplicación en los procesos de toma de decisión. Adicionalmente, su logro se da si este nuevo saber se lleva a su aplicación, y es que gracias al uso de la inteligencia organizacional se pretende mejorar la eficiencia en los procesos críticos de la empresa o mejorar los desempeños de la sociedad; su evaluación se hace mediante técnicas de modelado, pensamiento sistémico y simulación.

5. Fundamentación teórica

La IO pretende investigar los fenómenos de adquisición del conocimiento individual y colectivo dentro de la organización, su procesamiento; así como la creación, apropiación del conocimiento y su aplicación en los procesos de toma de decisiones. La diferencia entre la IO y la inteligencia de los negocios (BI) es muy tenue, ya que esta última se ocupa de transformar los datos en información, y la información en conocimiento, de forma que se pueda optimizar el proceso de toma de decisiones en los negocios. Entonces su mayor divergencia radica en los procesos de colectivización del conocimiento por parte de la IO y en las complejidades matemáticas y computacionales con las que se trabaja en la BI.

Por otro lado, la IO propende a que en la organización mejore la capacidad de aprender de una situación problemática y la convierta en una oportunidad de transformación mediante la combinación específica de conocimientos conceptuales, operacionales e instrumentales, así como a través de la selección de la mejor opción dentro de las diferentes alternativas para utilizarlos. Adicionalmente, se busca aumentar la satisfacción del grupo, de la organización o de la sociedad afectada por la problemática u oportunidad mejorando su competencia del trabajo colaborativo en contrapeso al individualismo exacerbado y tradicional de los modelos convencionales de trabajo en el mundo occidental.

Esa competencia es especialmente útil no sólo para la organización sino también para la sociedad, pues permite mejorar la voluntad o deseo de compartir con los demás el proceso creativo, sus resultados y sus consecuencias positivas, así como el de aumentar las habilidades de comunicación, tolerancia, respeto, entre otras, que requieran las acciones del proceso colaborativo. Esto obliga estudiar la inteligencia tanto individual como colectiva de las organizaciones.

Es por ello que surgen diferentes teorías a finales del siglo XX acerca de la inteligencia, entre las que se destaca la de las inteligencias múltiples, de Howard Gardner, quien sugiere que esta es un conjunto de capacidades múltiples, distintas e independientes con las que se

intentan resolver problemas o elaborar productos que sean valiosos en una o más culturas [41] y en diferentes niveles de desarrollo, especialmente en el caso educativo [42]. Por otro lado, está la teoría triárquica de Rober J. Sternberg, que se opone al enfoque psicométrico en el que se adopta un acercamiento más de orden cognitivo, ya que ubica la inteligencia con propósitos de: adaptación a, selección de, conformación de, todos estos ubicados en entornos del mundo real y relevantes en la vida del individuo [43], [44].

Otro enfoque adicional es el de la inteligencia emocional, que inicia con los trabajos de Peter Salovey y John Mayer, quienes la relacionan con la capacidad compleja e integrada de actitudes y habilidades, sumada a la percepción de control, el contacto con otras personas y el manejo del estrés, en lo que determina la conducta individual, las reacciones, los estados mentales, el estilo de comunicación y los niveles de autoestima que presentan los trabajadores en las empresas de manufactura [45] y que se complementa aun en el caso de la prestación de servicios a la comunidad, por ejemplo el de la policía en [46], o en el caso de las negociaciones empresariales como es el caso de los vendedores [47]. Estos factores afectan de manera directa los niveles de éxito y satisfacción personal y social. Otro destacado promotor de este concepto es Daniel Goleman. Su principal aporte consiste en reunir los resultados de una década de estudios sobre la conducta y el procesamiento de las emociones, y expresarlo en forma sencilla y accesible [48] y de utilidad real, como en el caso de la investigación hecha por el gobierno de China a más de 500 empleados y que revelan la importancia de la inteligencia emocional en el desempeño laboral [49].

Una forma simplificada de analizar el proceso de la inteligencia organizacional se muestra en la Figura 1, donde se muestra que el modelo de inteligencia consiste de tres fases claramente identificadas: adquisición de conocimiento, representación y toma de decisiones.



Figura 1. Modelo de inteligencia organizacional.

Fuente: elaboración del autor.

Es claro que todas estas etapas parten originalmente del deseo, voluntad o necesidad individual y que gracias al trabajo en equipo trascienden al devenir de la organización, en este estadio los procesos sobre todo de toma de decisiones son llevados a cabo por terceros que no disponen de más base de conocimiento que la dada por la coherencia de los procesos decisionales basados en los logros corporativos (cumplimiento de la misión a través de las metas y objetivos corporativos); por otro lado, para garantizar la sostenibilidad de las organizaciones implica una interfaz con su entorno recibiendo y emitiendo información que le permitan ampliar su base de conocimiento.

En la fase de adquisición también se puede incluir la fase de creación de conocimiento; sin embargo, no se sigue la misma lógica y, por supuesto, metodología para adquirir que para generar nuevo conocimiento. Estos tópicos han sido dilucidados por varios autores [50] que proponen involucrar condicionantes socio-culturales, por ejemplo en el caso de los procesos de enseñanza [51], o el papel de los inmigrantes para socializar su conocimiento en el mundo laboral [52]. Otros examinan cómo la empresa se convierte en un espacio propicio dada su condición de comunidad especializada en la creación y transmisión interna de conocimiento, así mismo se propone la importancia de la generación de conocimiento, que sumado al capital humano son elementos económicos de gran importancia para la creación de valor por las empresas [53].

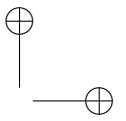
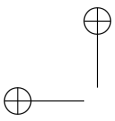
También se hace indispensable establecer los criterios y bases para potenciar la creación de conocimiento como estrategia para el desarrollo de capacidades propias que contengan un alto componente de la satisfacción de las necesidades y que sean difíciles de imitar por la competencia, [11], [50], pero es necesario reconocer e identificar las características del individuo para no traspasar criterios y valores morales o éticos [54] y los deseos y motivaciones de cada cual [55].

Wikström y Norman proponen otro modelo fundamentado en tres tipos diferentes de procesos de conocimiento en la empresa: los procesos generativos o de generación de nuevo conocimiento, los procesos productivos y operación del nuevo conocimiento, y los procesos representativos de difusión y transferencia del nuevo conocimiento [56]. Así estos procesos han servido de base a otros desarrollos de conocimiento como las modificaciones hechas por la interacción en el caso de las redes de conocimiento [57] y las relaciones de una cadena de valor no sólo con clientes, sino con proveedores [58].

Leonard-Barton amplía los criterios de los anteriores autores y expone el proceso de construcción de conocimiento delineado por cuatro fases sucesivas: (1) resolución compartida de problemas; (2) experimentación; (3) implementación e integración de nuevos procesos y herramientas y (4) aplicación y difusión del conocimiento [59].

En el caso de la representación de conocimiento, se intenta traducir a un saber explícito el conocimiento tácito que está en el individuo o en la colectividad. Lo anterior ha sido ampliamente tratado por autores como Kim, quien incorpora también el concepto de aprendizaje de bucle simple y de bucle doble, diferenciándose si se trata del aprendizaje del individuo o del organizacional, [60] y posteriormente es confirmado en otros trabajos [61], donde adicionalmente se expone su despliegue por los diferentes niveles de decisión, estratégico, táctico y operativo [62] y el despliegue a metodologías de captura y representación de conocimiento en especial para el desarrollo de productos que son complejos por la múltiple y variada naturaleza de información requerida [63], muchos otros estudios que confirman el valor del proceso de representación del conocimiento y que se pueden encontrar en bases de datos científicas, en donde se exponen casos prácticos de utilización de los modelos de inteligencia organizacional.

Por otro lado, se muestra el mecanismo de representación con un enfoque de conversión, que es inherente a todos los procesos de la gestión del conocimiento, a partir de la aportación de Nonaka y Takeuchi, quienes plantean que, antes de lograr un conocimiento organizacional, es necesario fomentar el conocimiento tácito personal para luego realizar la conversión que recorre, en espiral, el ciclo: socialización (tácito a tácito), externalización (tácito a explíci-



to), combinación (explícito a explícito) e internalización (explícito a tácito), cuyas iniciales posibilitan reconocer el modelo: SECI [9].

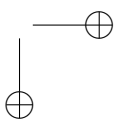
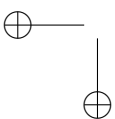
Finalmente, ese conocimiento compartido debe ser útil para la organización. Esto se logra facilitando los procesos de toma de decisiones mediante la incorporación del conocimiento compartido por los diferentes actores del proceso, lo cual, desde luego, debe impactar los logros misionales de la organización y/o mejorar el bienestar de la colectividad. Claro está que como con cualquier otro proceso de decisión, el entorno impone restricciones y limita los logros organizacionales; esto se contempla y mitiga mediante el conocimiento colectivo que disponga la empresa. Entre otros, el proceso decisional históricamente se ha basado en cómo mejorar e introducir nuevos productos y procesos, aunque esta mirada y uso no restringe el verdadero valor de los modelos de inteligencia en las organizaciones.

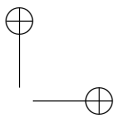
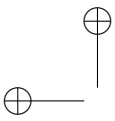
El cómo se aprende colectivamente y se socializa este conocimiento ha sido estudiado parcialmente por autores como Simon, quien propone que el conocimiento es más un fenómeno social que individual [64]. Así como por Wasserman y Faust, quienes proponen que el aprendizaje se puede ver como una red en donde los nodos son personas y los arcos son relaciones y que estas operan en la generación de fenómenos de conocimiento en los equipos de trabajo [65]. Mientras Contractor supone que si en una red social se representa quién es quién, en una red de conocimiento se representa quién sabe qué [66], diferencias de enfoques que permiten entonces capitalizar el poder de las interacciones sociales en búsqueda de aumentar el conocimiento colectivo, [67], así como el valor del trabajo colaborativo en el aprendizaje [68] y el valor que se tiene de la inteligencia organizacional, no solo en empresas de carácter privado sino en aquellas de naturaleza pública [69]. Éste es un escenario adecuado no sólo para seguir avanzando en los modelos de inteligencia organizacional, sino también para ahondar en otros tópicos relacionados como el del conocimiento social.

6. Objetos de investigación de la línea

En la formación del aspirante a doctor en Ingeniería con énfasis en Ciencia y Tecnología de la Información y del Conocimiento, los objetos de investigación de esta línea se concentran en los procesos de aprendizaje individual y colectivo de los miembros de la organización y los impactos de este proceso con su entorno, en dimensiones como la cultural, social, política y económica, de manera que esta organización, mediante la integración de redes, capture información, la transforme en conocimiento y facilite los procesos de toma de decisiones que la conduzca a un funcionamiento eficiente.

Por otro lado, resulta de interés el estudio de situaciones conflictivas que pueden y deben ser modeladas mediante la integración de herramientas blandas y duras para la solución de problemas complejos en el ámbito del quehacer cotidiano, y que como profesional e investigador competente requiere de una formación científico – técnico, específicamente en lo relacionado con los procesos de conocimiento, que le permitan a las organizaciones donde este individuo labora, el mejoramiento continuo generando un valor agregado a sus resultados y que repercutan en los índices de gestión, crecimiento económico y social del país.





De esto se desprende que se desarrollen trabajos de investigación desde la perspectiva de la gestión del conocimiento en áreas como la adquisición del mismo en temas como mecanismos de detección de brechas, señales de mercado, metodologías de lecturas de señales tempranas del entorno, creación de conocimiento, mecanismos de modificación y técnicas de generación de ideas.

En el campo de la representación, se dispone de uno campo de posibilidades que inician con la transformación de conocimiento mediante modelos semánticos, modelos matemáticos, aplicación de metáforas, así mismo se trabaja en la creación de técnicas y metodologías para la transformación de conocimiento como las que se utilizan en la ingeniería industrial y la ingeniería de software como sería el caso de uso o el de requerimiento de usuario, entre otras muchas más.

También se tienen posibilidades de trabajo investigativo para la mejora de los procesos de toma de decisiones encaminados a la aplicación de las técnicas de socialización de conocimiento para afinar los procesos decisionales. Esto garantiza involucrar el tratamiento de procesos dinámicos debido a la naturaleza del mercado en entornos estocásticos o probabilísticos afectados por las estructuras de la organización.

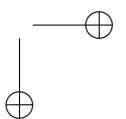
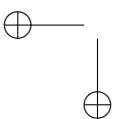
Otro aspecto de interés en la línea de Inteligencia Organizacional es el estudio de aquellos aspectos que modifican positiva o negativamente la cultura de aprendizaje de los individuos y cómo estos puedan aprender colectivamente, así mismo, cuestiones como la motivación y la capacitación pueden ser abordadas como objeto de investigación en esta línea.

Finalmente están los proyectos que involucran la inteligencia colectiva como motor de cambio de la sociedad, que investigan las semejanzas y diferencias que existen en las organizaciones empresariales y las de la sociedad, y analizan factores que mejoren los estándares y comportamientos de las micro y macro sociedades desde la perspectiva de la ganancia social.

7. Conclusiones y perspectivas

Se espera que los trabajos realizados y por realizar contribuyan a entender el valor que tiene el desarrollo de la metodología para una adecuada adquisición y representación del conocimiento, en el contexto de los procesos de toma de decisiones en ambientes dinámicos y que han permitido modelar sistemas de ingeniería de alta complejidad, en el ámbito de la industria nacional, sumado a entender y brindar soluciones a tipos de la problemática social.

Se espera así mismo ampliar estas investigaciones a los modelos de inteligencia organizacional y social, en donde el conocimiento de los colaboradores, en el primer caso, se constituya como el mayor y mejor activo de la organización, y de esta forma se pueda capitalizar para la mejora de la competitividad de la empresa que le garantice su supervivencia. En el segundo caso, que el conocimiento de los individuos pueda ser cohesionado de tal suerte que sean susceptibles de convertirse en un activo de la transformación de la sociedad, con el objetivo de mejorar su bienestar.



Por otro lado, se espera que los proyectos de investigación que sean adelantados en el doctorado dentro del marco de la línea de IO detecten los factores influyentes para lograr estos propósitos de una manera que involucre los aspectos individuales y los colectivos y que contemple las culturas propias del entorno colombiano y latinoamericano. Igualmente se quiere profundizar en los estudios que analicen los efectos de la organización, su cultura y el rol de sus administradores, a fin de facilitar la creación de nuevo conocimiento.

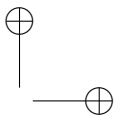
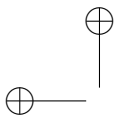
Como perspectiva adicional se fija como objetivo, generalizar este conocimiento en el caso de una organización de orden superior en complejidad como lo es la sociedad; para ello se pretende demostrar que modificando los modelos de la inteligencia organizacional se puede mejorar el conocimiento social .

Referencias

- [1] B. Wernerfelt, "A Resource-Based View of the Firm", Strategic Management Journal, vol. 5, 1984, pp. 171-190.
- [2] J. B. Barney. "Firm Resources and Sustained Competitive Advantage", Journal of Management, vol. 17, 1991, pp. 99-120.
- [3] Y. H. Ling. "The influence of intellectual capital on organizational performance-Knowledge management as moderator", Asia Pacific Journal Management, vol. 30, no. 30, 2011, pp. 937-964.
- [4] [4] S.R. Toorand G. Ofori. "Ethical Leadership: Examining the Relationships with Full Range Leadership Model, Employee Outcomes, and Organizational Culture", Journal of Business Ethics, vol. 90, no. 4, 2009, pp. 533-547.
- [5] D. De Clercq, et. al. "Unpacking the Goal Congruence-Organizational Deviance Relationship: The Roles of Work Engagement and Emotional Intelligence", Journal of Business Ethics, [Online]. Available FTP:http://download.springer.com/static/pdf/501/art%253A10.1007%252Fs10551-013-1902-0.pdf?auth66=1410968289_e9ba37dcfa8c0ac0784babd04a11a270&ext=.pdf
- [6] R. Srivastava and T. Li-Ping Tang. "Coping Intelligence: Coping Strategies and Organizational Commitment Among Boundary Spanning Employees", Journal of Business Ethics, 2013. Available FTP:http://download.springer.com/static/pdf/415/art%253A10.1007%252Fs10551-014-2234-4.pdf?auth66=-1410968338_db4a164906612b45d8eae95d5000fa0a&ext=.pdf
- [7] K. R. Conner and C. K. Prahalad, C. "A Resource-Based Theory of the Firm: Knowledge versus Opportunism", Organization Science, vol. 7, no 5, 1996, pp. 477-494.
- [8] G.Hedlund, "A Model of Knowledge Management and the N-form Corporation", Strategic Management Journal, vol. 15, 1994, pp. 73-90.
- [9] I. Nonaka and H. Takeuchi, The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation?. Oxford, UK:Oxford University Press; 1995, pp. 286.
- [10] M. Cohen, et. al., "A garbage can model of organizational choice" in Ambiguity and Command: Organizational Perspectives on Military Decision-Making. Marshfield, MO: Pitman Publishing Inc., 1986, pp. 311-336.
- [11] G. Morgan, Images of Organization. CA: Sage Publications, 2007.
- [12] M. A. Glynn. "Innovative Genius: A framework for relating individual and organizational Intelligence to innovation," Academy of Management Review, vol. 21, 1996, pp. 1081-1111.
- [13] A. Noruzi, et. al. "Relations between transformational leadership, organizational learning, knowledge management, organizational innovation, and organizational performance: an empirical investigation of manufacturing firms", Int J Adv Manuf Technol, 2013, pp. 1073-1085.
- [14] S. J. Bell, et. al., "Salesperson learning, organizational learning, and retail store performance", J. of the Acad. Mark. Sci., vol. 38, 2010, pp. 187-201.
- [15] P. Gibbons. "Notes from the field: Transforming the Starbucks experience", Journal of Enterprise Transformation, vol. 1, 2011, pp. 7-13.

- [16] M. McMaster, *The Intelligence Advantage: Organizing for Complexity*. Newton, MA: Butterworth-Heinemann, 1996.
- [17] J. B. Thomas, et. al., “ *Understanding Strategic Learning: Linking Organizational Learning, Knowledge Management, and Sense-making*,” *Organization Science*, vol.12, no.3, 2001, pp. 331-345.
- [18] J. Liebowitz, *Building Organizational Intelligence*. NY: CRC Press, 2000.
- [19] J. Wu and X. Chen. “ *Leaders’ social ties, knowledge acquisition capability and firm competitive advantage* ”, *Asia Pacific Journal Management*, 2011, pp. 331-350.
- [20] C. W. Choo, *Information Management for the Intelligent Organization: The art of Scanning the Environment*. NJ: Medford Press. 2000.
- [21] P. Regnérand U. Zander. “ *Knowledge and Strategy Creation in Multinational Companies. Social-Identity Frames and Temporary Tension in Knowledge Combination* ”, *ManagInt Rev*, vol. 51, 2011, pp. 821-850.
- [22] C. Dibrell, et. al. “ *Establishing How Natural Environmental Competency, Organizational Social Consciousness, and Innovativeness Relate* ”, *Journal of Business Ethics*, 2014. Available FTP: <http://download.springer.com/static/pdf/89/art%253A10.1007%252Fs10551-013-2043-1.pdf?auth66=1410968948.48e5ad0da927f012354af4f8d0fccace&ext=.pdf>
- [23] A. K. Kohli and B. J. Jaworski. “ *Market Orientation: The Construct, Research Propositions, and Managerial Implications* ”, *Journal of Marketing*, vol. 54, 1990, pp. 1-18.
- [24] S. Kale and E. A. Karaman. “ *A Diagnostic Model for Assessing the Knowledge Management Practices of Construction Firms* ”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2012, vol. 16, pp. 526-537.
- [25] V. Purchase, et. al. “ *Enterprise Transformation: Why are we interested, What is it, and What are the challenges?* ”, *Journal of Enterprise Transformation*, 2011, vol. 1, pp.14-33.
- [26] G. Méndez and M. A. Pinzón. “ *Cadena logística Integrada: Un apoyo al sector agrícola* ”, *Revista Ingeniería*, 2001, vol. 6, pp. 12-18.
- [27] G. Méndez. “ *Laboratorios de Aprendizaje Empresarial* ” in II Congreso Internacional de la Sociedad de la Información y el Conocimiento, Madrid, ESP, 2003, pp. 84-481.
- [28] L. Álvarez and A. Duque. “ *Simulación de un Sistema Ambiente Multiservicio y Experimentación con un Sistema Preferencial de Atención* ”, Trabajo de Grado, Ingeniería Industrial, Universidad Distrital F. J. C., 2004.
- [29] L. Álvarez and G. Méndez. *Diseño de Prototipo Diagnóstico para la PYME Colombia*. Bogotá, COL: Ed. Universidad Distrital, 2004.
- [30] G. Méndez, et. al. “ *Modelo de Simulación Dinámica para el Diagnóstico de la Pyme* ”, *Revista Ingeniería*, 2006, vol. 11, pp. 80-87.
- [31] D. Tinjaca, et. al. “ *Modelo Dinámico para seleccionar Amenazas en un Proyecto de Desarrollo de Software mediante la técnica de Inteligencia Artificial “Rough Set”* ” in Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference, Panamá, PAN, 2012, paper 261.
- [32] G. Méndez, et. al. *Investigación y desarrollo de un prototipo de Sistema Experto para scheduling en Pymes con entorno Job-Shop*. Bogotá, COL: Ed. Universidad Distrital, 2013.
- [33] E. López, et. al. “ *Diseño de cadenas de distribución con demanda bajo incertidumbre: una aproximación de programación lineal difusa* ”, *Revista Ingeniería*, 2013, vol. 18, pp. 68-84.
- [34] Carlos Franco, et. al. “ *Towards solving games with Type-2 fuzzy uncertainty* ”, *Revista Ingeniería*, 2013, vol. 18, pp. 85-96.
- [35] G. Méndez, et. al. “ *Evaluación del Impacto de los Cultivos de Flores en la Calidad de Vida de la Población del Municipio de El Rosal Cundinamarca, Mediante Dinámica De Sistemas* ”, Trabajo de Grado, Ingeniería Industrial, Universidad Distrital F. J. C., 2009.
- [36] G. Méndez. *Aplicación de la dinámica del sistema para caracterizar y recomendar soluciones a problemas Sociales en Colombia*. Bogotá, COL: Ed. Universidad Distrital, 2011.
- [37] Eduyn López and Adriana Avila. “ *Characterization and modeling of unemployment and the urban informality in Colombia using system dynamics* ”, in 1st IIE Annual Conference 2011. Undergraduate Student Technical Paper Competition, Reno, NEV, 2011.
- [38] Germán Méndez, et. al. “ *Metodología basada en proceso de Jerarquía Analítica (AHP) para seleccionar Cadenas Productivas que buscan Soluciones de Automatización a Bajo Costo* ”. *Revista Ingeniería*, 2008, vol. 13, pp. 15-26.

- [39] Germán Méndez, et. al. “*Modelo de Registro y Acreditación de Instituciones de Educación Superior basado en el Modelo CMMI*”, in The Seventh Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology - LACCEI 2009. San Cristobal, VEN, 2009, paper 116.
- [40] L. Álvarez, et. al. “*Diseño metodológico para la ubicación de ambulancias del sector de atención prehospitalaria en Bogotá D.C*”, Revista Ingeniería Industrial, Chile, 2007, pp. 77-93.
- [41] H. Gardner. *Frames of Mind: The Theory of Multiple Intelligences*. NY: Ed. by Perseus Group. 2011.
- [42] R. Booth and P. J. O'Brien. “*An Holistic Approach for Counsellors: Embracing Multiple Intelligences*”, International Journal Advance Counseling, 2008, vol. 30, pp.79-92.
- [43] R. Sternberg. *Beyond IQ: A Triarchic Theory of Intelligence*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1985.
- [44] G. Keane and M. F. Shaughness. “*An Interview With Robert J. Sternberg About Educational Psychology: The Current “State of the Art”*”, Educational Psychology Review, 2002, vol. 14, No. 3, pp. 313-330.
- [45] J. D. Mayer and P. Salovey. “*The intelligence of emotional intelligence*”. Intelligence journal, 1993, vol. 17, pp. 433-442.
- [46] O. E. Al Ali, et. al. “*An Exploration of the Relationship between Emotional Intelligence and Job Performance in Police Organizations*”, J Police Crim Psych, 2012, vol. 27, pp.1-8.
- [47] K. Kim, et. al. “*Emotional Intelligence and Negotiation Outcomes: Mediating Effects of Rapport, Negotiation Strategy, and Judgment Accuracy*”, Science & Business Media Dordrecht, 2014. Available FTP: http://download.springer.com/static/pdf/419/art%253A10.1007%252Fs10726-014-9399-1.pdf?auth66=1411045618_5fca716d50eabda4a897fcc6755ce1da&ext=.pdf
- [48] D. Goleman, *Inteligencia Emocional*. Bogotá, COL: Editorial Planeta. 2006.
- [49] W. Fu. “*The Impact of Emotional Intelligence, Organizational Commitment, and Job Satisfaction on Ethical Behavior of Chinese Employees*”, Journal of Business Ethics, 2014, vol. 122, pp.137-144.
- [50] B. Kogut and U. Zander. “*What Firms Do? Coordination, Identify and Learning*”, Organization Science, 1996, vol. 7, no 5, pp. 502-517.
- [51] H. Hong and F. R. Sullivan. “*Towards an idea-centered, principle-based design approach to support learning as knowledge creation*”, Education Tech Research Dev, 2009, vol. 57, pp. 613-627.
- [52] E. Yin and Y. Bao, “*The Acquisition of Tacit Knowledge in China: An Empirical Analysis of the ‘Supplier-side Individual Level’ and ‘Recipient-side’ Factors*”, Management International Review, 2006, vol. 46, no. 3, pp. 327 - 348.
- [53] V. Salas. “*Sobre Valor y Coste de los Intangibles*”, Actualidad Financiera, 2001, pp. 3-11.
- [54] F. C. Tseng and Y. Fan. “*Exploring the Influence of Organizational Ethical Climate on Knowledge Management*”, Journal of Business Ethics, 2011 vol. 101, pp. 325-342.
- [55] S. Sacchetti and E. C. Tortia. “*Satisfaction with Creativity: A Study of Organizational Characteristics and Individual Motivation*”, Journal of Happiness Studies, 2013, vol. 14, pp. 1789-1811.
- [56] S. Wikstrom and R. Normann, *Knowledge and Value: A New Perspective on Corporate Transformation*. London, ENG: Routledge Press. 1994.
- [57] D. Ursic, et. al. “*System-Organisational Aspect of a Learning Organisation in Companies*”, Systemic Practice and Action Research, Vol. 19, no. 1, 2006, pp. 81-99.
- [58] R. Jardim-Goncalves, et. al. “*Knowledge framework for intelligent manufacturing systems*”, Journal of Intelligent Manufacturing, 2011, vol. 22, no. 5, pp. 725-735.
- [59] D. Leonard-Barton. “*Core Capabilities and Core Rigidities: A Paradox in Managing New Product Development*”, Strategic Management Journal, 1992, vol. 13, pp. 111-125.
- [60] D. H. Kim. (1993). “*The Link Between Individual and Organizational Learning*”, Sloan Management Review, 1993, vol. 34, pp. 37-45.
- [61] E. Revilla, *Factores Determinantes del Aprendizaje Organizativo. Un Modelo de Desarrollo de Productos*. Madrid, ES: Editorial Club Gestión de Calidad, 1996.
- [62] E. Oztemel and S. Arslankaya. “*Enterprise knowledge management model: a knowledge tower*”, Knowledge Information System, 2012, vol. 31, pp. 171-192.
- [63] R. C. W. Sung, et. al. “*Automated generation of engineering rationale, knowledge and intent representations during the product life cycle*”, Virtual Reality, 2012, vol. 16, pp. 69-85.



- [64] H. A. Simon. “ *Bounded Rationality and Organizational Learning* ” , Organization Science, 1991, vol. 2,no. 1, 1991, pp. 125-133.
- [65] S. Wasserman and K. Faust, Social Network Analysis. Methods and Applications: Structural Analysis in the Social Sciences. UK: Cambridge Press. 1994.
- [66] N. Contractor. “ *IKNOW: A Tool to Assist and Study the Creation, Maintenance, and Dissolution of Knowledge Networks* ” . Community Computing and Support Systems, 1998, vol. 1519, 1998, pp. 201-217.
- [67] S.Rodan. “ *Organizational learning: effects of (network) structure and (individual) strategy* ” , Computing Math Organization Theory, 2008, vol. 14, pp. 222-247.
- [68] D. T. Tempelaar, et. al. “ *The role of self- and social directed goals in a problem based, collaborative learning context* ” , High Education, 2013, vol. 66, pp. 253-267.
- [69] C.Maden. “ *Transforming Public Organizations into Learning Organizations: A Conceptual Model* ” , Public Organization Review, 2012, vol. 12, pp.71-84.

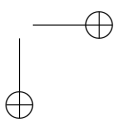
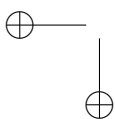
Germán A. Méndez Giraldo

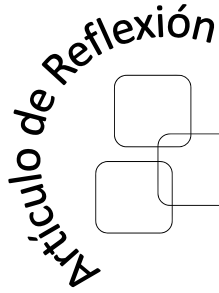
Nació en Bogotá, Colombia. Ingeniero Industrial de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá. Obtuvo su título de maestría en 1998 en la Universidad de Los Andes de Bogotá, Colombia. Obtuvo su doctorado en 1999 en la Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, Cuba.

Se desempeñó como jefe de Producción en industrias nacionales y multinacionales, gerente y coordinador de proyectos. Consultor y asesor empresarial. Es profesor de tiempo completo de la Facultad de Ingeniería de la UDFJC desde 1995 y se ha desempeñado en diversos cargos en la institución, como coordinador de la Especialización en Ingeniería de Producción, de la Maestría en Ingeniería Industrial, rector encargado, vicerrector administrativo y financiero y jefe de la Oficina de Relaciones Interinstitucionales. Cuenta con más de 20 años de experiencia como docente en programas de pregrado en Ingeniería Industrial, Ingeniería de Sistemas y Administración de Empresas, así como en cursos de posgrado de Especialización, Maestría y Doctorado.

Actualmente es el director de la línea de investigación en Simulación y Dinámica del Sistema y de la línea de Inteligencia Organizacional del Doctorado de Ingeniería. Es también el director del Grupo de Sistemas Expertos y Simulación. Se desempeña como profesor en el área de Investigación de Operaciones en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

e-mail: gmendez@udistrital.edu.co





Herbert Enrique Rojas Cubides
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Grupo de Investigación en Compatibilidad e Interferencia Electromagnética GCEM-UD
herojasc@udistrital.edu.co

Edwin Rivas Trujillo
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Grupo de Investigación en Compatibilidad e Interferencia Electromagnética GCEM-UD
erivas@udistrital.edu.co

Adolfo Andrés Jaramillo Matta
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Grupo LIFAE
ajaramillom@udistrital.edu.co



Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos

Technical and Regulatory Aspects for Monitoring and Measurement of Harmonics

Resumen

En este artículo se presenta un análisis de los parámetros requeridos para un adecuado proceso de monitoreo y medición de armónicos cuando se analiza la calidad de potencia en las redes de energía eléctrica. Inicialmente se introducen conceptos básicos de los armónicos presentes en las redes de energía eléctrica, posteriormente se mencionan las normas y recomendaciones de regulación para la calidad de energía eléctrica en el marco colombiano. Seguido a esto se presentan algunos parámetros importantes que deben ser tenidos en cuenta para una adecuada adquisición y tratamiento de las señales de tensión y corriente tanto en frecuencia fundamental como en frecuencias armónicas, y se hace énfasis en medición de armónicos, determinación del punto de acople o conexión común (PCC), correcta ubicación de los sensores y registradores, equipos de medición de calidad de potencia, frecuencia de muestreo, intervalos de observación, transductores, medición de armónicos de tensión, medición de armónicos de corriente y condiciones del sistema durante la medición.

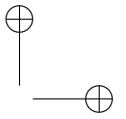
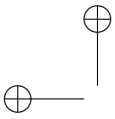
Palabras claves: armónicos, calidad de energía eléctrica, monitoreo y medición, normas técnicas.

Abstract

This paper is a brief analysis of the parameters required for an adequate process of monitoring and measurement of harmonics in electric power networks for power quality studies. Initially, basics of harmonics in electric power networks are introduced; subsequently, standards and recommendations for quality control of electrical energy in the Colombian context are mentioned. Following this some important points to be taken into account for the appropriate acquisition and processing of the voltage and current signals in both fundamental frequency and harmonic frequency, are presented, where the emphasis is on issues such as: harmonic measurement, determination of point of common connection (PCC), proper placement of the sensors and storage data equipment, power quality measurement, frequency of sampling, observation intervals, transducers, voltage harmonics measurement, current harmonics measurement and system conditions for measurement.

Palabras claves: harmonics, monitoring and measurement, power quality, standards.

Recibido: 06-11-2013
Modificado: 05-09-2014
Aceptado: 12-10-2014



1. Introducción

Las expresiones “calidad de potencia”, “calidad de energía eléctrica” o PQ se asocian a la forma de onda en las líneas de distribución del sistema eléctrico de energía que alimenta los dispositivos en sectores residenciales, comerciales e industriales [1]-[3]. Cuando dicha onda, generalmente sinusoidal, se deforma, genera efectos indeseados tanto en los dispositivos conectados al mismo punto de conexión común (PCC) que la fuente de perturbación, como en los sistemas que dependen de éstos dispositivos: sistemas de control, protección o producción. Dentro de los efectos más relevantes producidos por una onda deformada de energía eléctrica se pueden citar: pérdida de información en los dispositivos informáticos, mal funcionamiento de los aparatos medidores de energía, funcionamiento erróneo y paros no programados en los sistemas de protección, control y producción, picos indeseados de potencia eléctrica, mal funcionamiento y aumento de temperatura en dispositivos electromecánicos, los cuales producen una reducción en su tiempo de vida útil, entre otros. La severidad de los efectos depende de la cantidad y sensibilidad de los dispositivos.

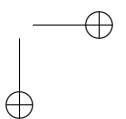
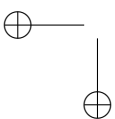
La deformación de la forma de la onda es un cambio en la forma sinusoidal ideal de la onda de tensión o corriente, consecuencia de perturbaciones electromagnéticas que pueden ser producidas por diferentes causas, como maniobras en la red eléctrica (e.g., mantenimiento, conmutación, sistemas de protección o compensación), descargas atmosféricas y funcionamiento de accionamientos electromecánicos de alta potencia, entre otros. Sin embargo, una de las causas más frecuentes de la deformación de onda es la distorsión armónica. Los armónicos se producen debido a cargas no lineales conectadas a la red, las cuales absorben corriente de forma no sinusoidal.

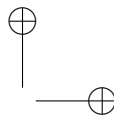
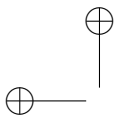
Para el monitoreo y medición de armónicos generalmente se utilizan analizadores de calidad de potencia (PQA), que se encargan de medir y almacenar muchas variables para su análisis posterior. Sin embargo, además de estos equipos, para una adecuada medición de armónicos es necesario tener en cuenta otros parámetros como, por ejemplo, las normas, la selección del punto de conexión común (PCC), ubicación de los sensores y registradores, frecuencia de muestreo, intervalos de observación, transductores, medición de armónicos de tensión y/o de corriente y condiciones del sistema durante la medición, principalmente.

En este artículo se menciona una definición de los armónicos, las normas y regulaciones en el marco colombiano, así como también se referencian algunos estudios sobre la influencia de los armónicos en los sistemas eléctricos, con lo cual se da lugar a la determinación de los parámetros necesarios para un adecuado monitoreo y medición de armónicos en estudios de calidad de potencia.

2. Definición de armónicos

El uso de cargas y equipos con características no lineales en los sistemas eléctricos de potencia produce distorsiones en la forma de onda de corriente debido a su consumo de potencia no lineal. Este efecto produce corrientes sinusoidales con frecuencias múltiplo de la frecuencia de la onda original (60 Hz en Colombia); a estas corrientes se les denomina corrientes





armónicas. El efecto de estas corrientes armónicas puede analizarse como si dichas corrientes se adiccionaran a la onda original, sinusoidal pura, cambiando su forma y propagándose por las líneas del sistema de potencia hacia otras cargas conectadas en el punto de conexión común más próximo [4].

Algunas características de la onda original, que son modificadas por las señales armónicas, se convierten en indicadores de distorsión armónica en las líneas de transmisión y distribución de energía eléctrica [1]; entre ellas se puede mencionar: espectro de frecuencia, factor de potencia, tasa de distorsión armónica y factor de cresta. Con estos indicadores se pueden determinar las acciones requeridas por los sistemas mitigadores de efectos armónicos como son filtros activos y pasivos, bobinas (de CC y AC) y sistemas multipulsos, entre otros [5], [6].

Como se mencionó anteriormente, los armónicos se producen debido a cargas no lineales conectadas a la red, las cuales absorben corriente de forma no sinusoidal. Como ejemplo de estas cargas podemos citar: rectificadores, convertidores AC/DC (debido a los elementos de switcheo) [7], [8], variadores de frecuencia, sistemas de soldadura por arco, hornos de inducción, lámparas fluorescentes, compensadores estáticos de potencia, automóviles eléctricos o híbridos [9], entre otras.

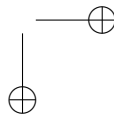
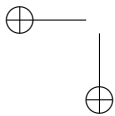
Entre los efectos más relevantes de los armónicos están: disparo de protecciones y calentamiento de cables, sobrecorrientes de neutro, disminución de la vida útil, pérdida de aislamiento por altas temperaturas, pérdidas en el cobre y en el entrehierro de los transformadores [10], perturbaciones en líneas telefónicas y otras cargas sensibles a distorsión en la tensión de alimentación, sobredimensionamiento de transformadores y elementos de protección, disminución de rendimiento y par en motores, y error en equipos de medida y control.

3. Normas relacionadas con la calidad de potencia en Colombia

En Colombia, el marco regulatorio lo establecen y componen distintos entes, como se muestra en la figura 1. Sin embargo, los más relevantes son el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (Icontec) y la Comisión de Regulación de Energía y Gas (Creg). El primero es una organización sin ánimo de lucro que se encarga de la normalización en el país para el desarrollo sostenible de las organizaciones, por lo que presta servicios de educación en metrología, entre otros. De gran interés son las Normas Técnicas Colombianas (NTC), específicamente las referentes a la calidad de potencia: NTC 5000 y NTC 5001. Por su parte, la Creg es una entidad creada por el gobierno nacional la cual tiene como objetivo principal garantizar la calidad, la cobertura del suministro y expansión de los servicios de energía eléctrica, gas natural y gas licuado en el país.

3.1. Norma técnica colombiana NTC 1340

Esta norma del año 2004 aborda conceptos mínimos de calidad de potencia [10]. Sus temáticas centrales son las tensiones y frecuencias nominales en sistema de energía eléctrica en redes de servicio público (figura 2).



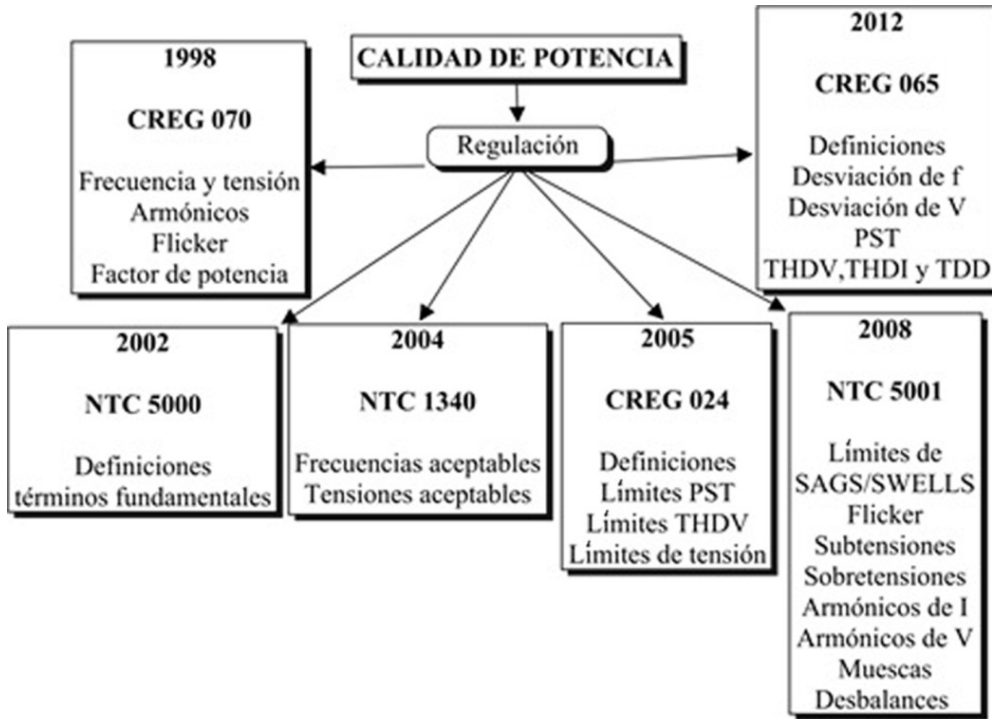


Figura 1. Normas relevantes en Colombia sobre calidad de potencia.



Figura 2. Mapa conceptual NTC 1340 – 2004.

3.2. Norma técnica colombiana NTC 5001

La NTC 5001 del 2008 es la norma técnica colombiana de calidad de potencia eléctrica [11]. Su propósito es establecer los límites y la metodología de evaluación en un punto de conexión común; es una norma que contiene aspectos similares a la norma IEEE 1159 (figura 3).

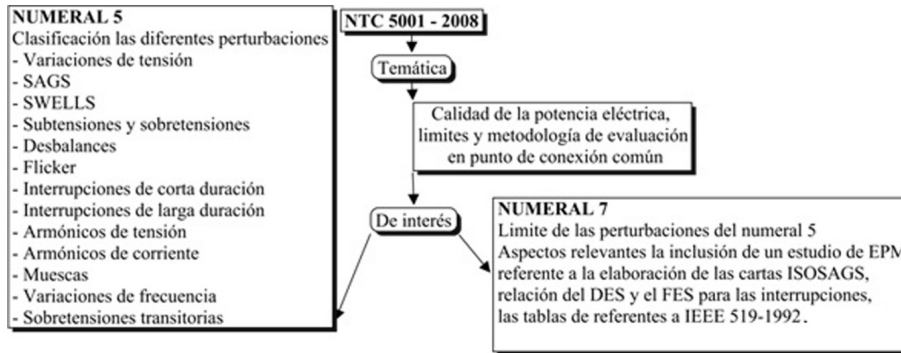


Figura 3. Mapa conceptual de la NTC 5001 – 2008.

3.3. Resolución CREG 070-1998

La resolución CREG 070 del año 1998, denominado el reglamento de distribución de energía eléctrica [12], aborda distintas temáticas como las condiciones de conexión para cargas y generadores, la operación de STR (sistema de transmisión regional) y SDL (sistema de transmisión local), equipos de medida, alumbrado público, entre otros (figura 4). Sin embargo, es de gran interés el capítulo 6, denominado “Calidad del servicio en los STR y SDL”, el cual trata de la calidad de la potencia suministrada, la calidad del servicio prestado, el registro de interrupciones y las políticas para vigilar o supervisar esta calidad del servicio.

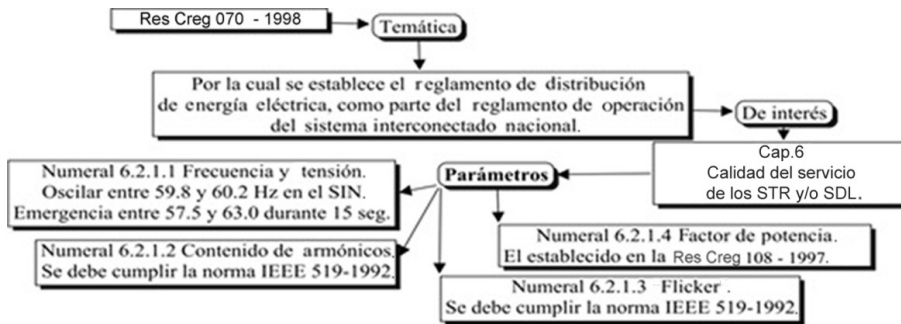


Figura 4. Mapa conceptual CREG 070 – 1998.

3.4. Resolución CREG 024-2005

Esta resolución del año 2005 hace referencia a las normas de calidad de potencia eléctrica aplicable a los servicios de distribución de energía eléctrica (figura 5). La norma da más importancia a esta temática, ya que en la resolución CREG 070 sólo es parte de un capítulo de la calidad de potencia eléctrica. Sin embargo, en esta resolución sólo se enfoca en algunos fenómenos como son los *flickers* y la distorsión armónica en tensión [13].

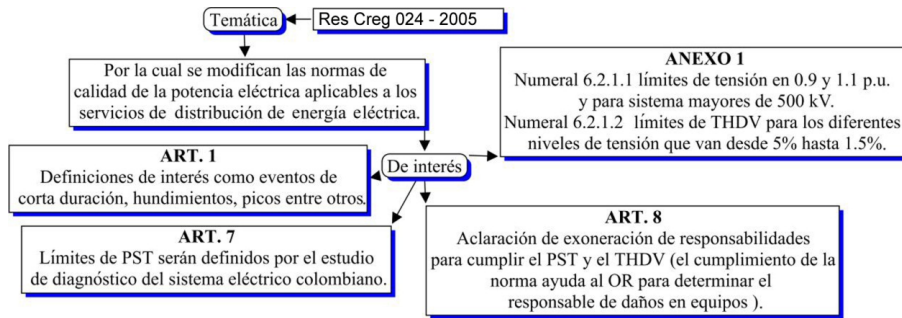


Figura 5. Mapa conceptual CREG 024 – 2005.

3.5. Resolución CREG 065-2012

En 2012, la CREG presenta este proyecto de resolución, el cual trata de complementar y compilar las anteriores en una sola (figura 6). El objetivo es presentar claramente las políticas de calidad de potencia y ajustarlas para que sean similares a la norma NTC-5001. Esta resolución tiene en cuenta indicadores como desviaciones de frecuencia, desviaciones de tensión, *flicker*, desbalances, distorsión total de demanda (TDD) y distorsión armónica de tensión (THDV) y corriente (THDI). Además, establece los límites de los indicadores respectivos y cómo se deben medir dichos fenómenos.

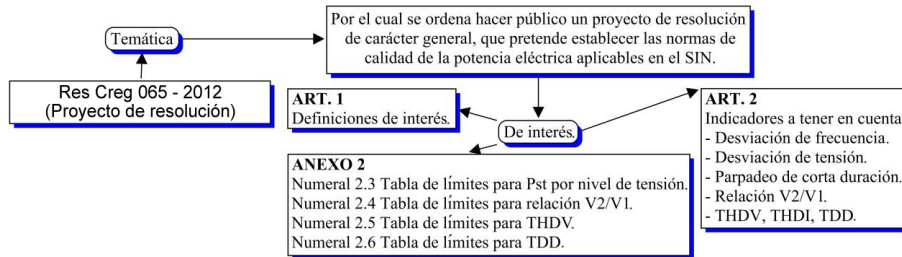


Figura 6. Mapa conceptual CREG 065 – 2012.

4. Influencia de los armónicos en los sistemas eléctricos

El término generación distribuida se refiere al uso de fuentes renovables de energía, las cuales están integradas por elementos electrónicos generadores de armónicos.

En [14] se analiza el impacto en la distorsión armónica en tensión (THDV) usando generación distribuida, para lo cual se trabaja el caso de estudio de 13 nodos de IEEE y se modelan tres tecnologías con el paquete de software PSCAD: una turbina eólica, un generador síncrono y un sistema fotovoltaico. Los resultados evidencian la relación que existe entre el THDV y el tipo de tecnología a utilizar. Además, se muestra cómo al incrementar el número de generadores en el sistema el THDV supera los límites permitidos del 5 %.

En [15] se presentan los resultados de un estudio desarrollado por el fondo de investigación del sistema eléctrico italiano. Este trabajo está enfocado al impacto de la generación distribuida en las redes de distribución mediante el uso de inversores trifásicos de segundo nivel como tecnología de generación. El impacto sólo analiza la comparación de armónicos y obtiene resultados favorables en la inyección de corrientes armónicas luego de usar una configuración de inversores intercalados.

En [16] se analiza la influencia de los armónicos causados por el uso de fuentes de generación distribuida que usan inversores en una red de baja tensión simulada con Matlab® Simulink. Los resultados muestran la influencia de cargas RL sobre el sistema y la relación directa entre el número de inversores y el aumento de la distorsión armónica de la forma de onda. Este trabajo recomienda profundizar en el uso de dispositivos que ayuden a mitigar las distorsiones armónicas y promueve que en un futuro sean incluidos en las normas técnicas relacionadas.

En [17] se presenta un inversor monofásico para sistemas de generación distribuida que requieren características de calidad de energía (armónicos y compensación de potencia reactiva) para el funcionamiento conectado a la red.

En [18] se presenta un estudio de una estructura de control para un sistema basado en inversores de fuente de corriente (CSI), basado en un sistema de referencia multi-síncrona (MSRF), arquitectura que rechaza el efecto de distorsión de voltaje de red y ayuda a alcanzar una corriente de salida de alta calidad.

5. Monitoreo de armónicos para estudios de calidad de potencia

En principio, tanto los clientes (usuarios finales) como la red de distribución comparten responsabilidades en la limitación de corrientes y tensiones armónicas inyectadas en cualquier punto del sistema [19]. A partir de esto, se deben tener en cuenta dos etapas para reducir la distorsión armónica: primero, la medición de corrientes inyectadas y sus tensiones resultantes; segundo, el estudio de las impedancias y su comportamiento en la frecuencia.

Al evaluar la calidad de la potencia eléctrica de una instalación (residencial, comercial o industrial), cualquier tipo de estudio realizado depende en gran medida de la forma en que se realicen las mediciones [20]. A continuación, se presentan algunos tópicos que deben ser tenidos en cuenta para una adecuada adquisición y tratamiento de las señales de tensión y corriente tanto en frecuencia fundamental como en frecuencias armónicas

5.1. Preliminares a tener en cuenta para la medición de armónicos

Un adecuado monitoreo facilita la detección, análisis y control de las componentes armónicas que afectan las señales de tensión y corriente. En la actualidad existe en el mercado gran

variedad de equipos de medición de armónicos. Referencias tales como Fluke 435, AEMC 8336, Dranetz 4400 y Hioki 3197, entre otras, son ejemplos de equipos de alta y media gama que en su mayoría se conectan directamente a computadores (portátiles o de escritorio) con el propósito de almacenar y procesar posteriormente la información. Sin embargo, antes de iniciar cualquier tipo de estudio es importante identificar el punto del sistema en el cual se deben conectar los equipos de monitoreo.

5.1.1. El punto de acople común (PCC)

En este artículo se han tomado como referencia las definiciones presentadas en la norma técnica colombiana y sus extensiones en el estándar internacional [10], [13]. Una de las definiciones más controversiales, pues posee diversas interpretaciones, es la del punto de conexión o acople común (PCC). Éste es definido como un punto de conexión individual ubicado entre el usuario final (punto de medida de energía) y el sistema que lo alimenta, sea el sistema de distribución local (SDL) o el sistema de transmisión regional (STR) y en el cual puede ser realizada la evaluación de la distorsión armónica [11], [21].

A partir de esta definición, los límites definidos en la NTC-5001 son concebidos para ser aplicados en el PCC. Aunque se debe tener en cuenta que este punto puede estar localizado en cualquier lado de un transformador dependiendo del devanado en el que se encuentren conectados otros clientes. La Figura 7 permite explicar este concepto de manera ilustrativa.

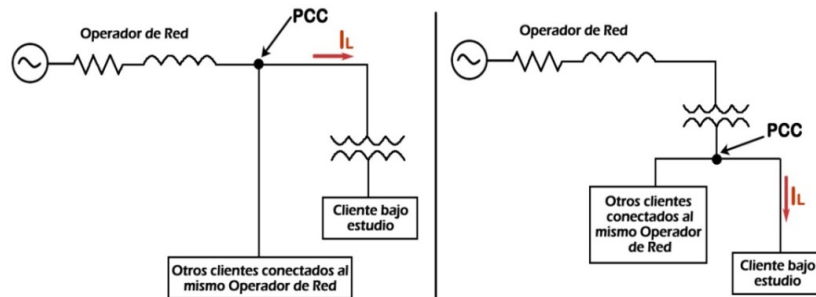


Figura 7. Definición del PCC en sistemas de media tensión según [18] y adoptado por [10].

La norma aclara que cuando el PCC está definido del lado de alta tensión del transformador las mediciones pueden ser tomadas por el lado de baja, siempre y cuando las mediciones sean posteriormente referidas al lado de alta (usando la relación de transformación) y teniendo en cuenta el efecto que sobre los armónicos de secuencia cero tienen los devanados en delta de los transformadores.

5.1.2. ¿Dónde realizar las mediciones?

Como se mencionó, las mediciones para verificar y monitorear los límites armónicos establecidos en la norma colombiana deben realizarse de ser posible en el PCC directamente.

Mediciones en otros puntos de la instalación del usuario final no contribuyen en la evaluación general de los problemas de armónicos, aun cuando estos estudios provean información sobre el comportamiento de cargas puntuales o de gran aporte armónico.

Para muchos usuarios, el PCC está definido del lado del devanado primario de sus transformadores de entrada (media o alta tensión), por lo que en estas ocasiones resulta más conveniente y ventajoso tomar mediciones de tensión y corriente directamente en las fronteras comerciales (figura 8).

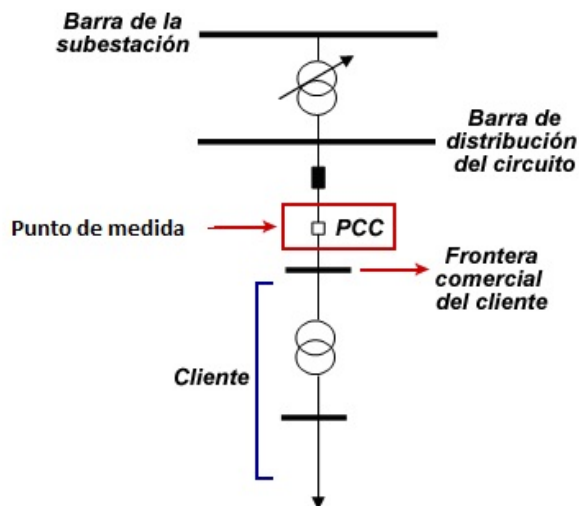


Figura 8. Medición típica en el PCC para clientes industriales.

Las mediciones en el lado de baja tensión del transformador pueden ser adecuadas para la evaluación de las corrientes armónicas. Sin embargo, estas mediciones no pueden ser utilizadas directamente para la evaluación de las distorsiones armónicas de tensión del lado primario del transformador, debido a los efectos que las conexiones delta provocan en los armónicos triples o de secuencia cero [22]. Por ejemplo, transformadores de conexión delta-estrella (DY) (comunes en el sistema eléctrico colombiano) “cancelan” las componentes de secuencia cero del lado del devanado primario (figura 9), mientras los transformadores de conexión estrella-estrella aterrizada (YYG) dejan pasar la totalidad de las componentes armónicas del primario al secundario.

Ahora, si las distorsiones de corriente corresponden únicamente a componentes de secuencia positiva y negativa (típicamente industrias en donde las cargas trifásicas predominan), la relación de transformación sólo afectará los ángulos de las componentes armónicas de corriente [22].

En conclusión, para un estudio en el que se necesita conocer el contenido armónico de la instalación de un cliente (usuario final), es recomendable hacer las mediciones en el PCC

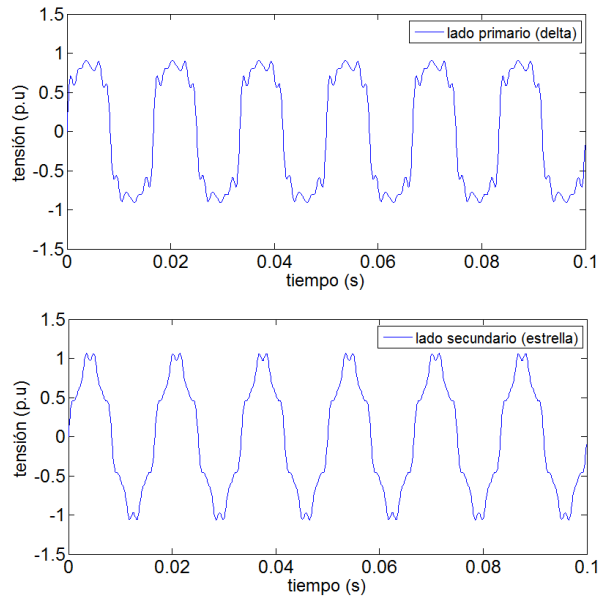


Figura 9. Efecto de un transformador DY sobre la onda de tensión con armónicos.

directamente en el devanado primario del transformador, si las condiciones técnicas y de disponibilidad de los equipos lo permiten. De esta manera, se reduce el tiempo en el tratamiento de las mediciones. Ahora bien, si lo que se quiere es hacer un estudio dentro de las instalaciones del cliente, lo más recomendable es hacer las mediciones en los nodos internos de la planta, las cargas no lineales y bancos de condensadores directamente.

5.2. Equipos usados para el monitoreo de armónicos

Los equipos de medición usados para la medición de armónicos son instrumentos electrónicos basados en microprocesadores que toman la señal de tensión y corriente, y realizan directamente un análisis en la frecuencia usando la transformada rápida de Fourier (FFT). Estos equipos entregan el espectro en magnitud y fase de la señal en función de la frecuencia.

Respecto a las características de los equipos de medida, la NTC 5001 recomienda tener en cuenta los criterios definidos en la norma europea IEC-61000-4-30. Esta norma debe ser tenida en cuenta para la selección de los equipos de monitoreo ya que la norma americana IEEE 519-1992 no define claramente estas características. Los equipos de medida según la IEC-61000-4-30, se clasifican en dos clases [23]:

- Equipos de clase A: son equipos de medida usados para la evaluación contractual de parámetros eléctricos y la verificación del cumplimiento de los valores de referencia (límites) establecidos en esta norma internacional. Normalmente, los equipos de esta clase se utilizan para resolver reclamaciones o disputas entre un operador de red y un cliente.

- Equipos de clase B: son equipos utilizados para el seguimiento de los parámetros de calidad de energía, estudios de diagnóstico en instalaciones y otras aplicaciones donde no se necesita una alta precisión en las mediciones. Los equipos de esta clase, en general, no tienen una especificación diferente a la dada por sus propios fabricantes, mientras que los de clase A tienen definidas las características y las incertidumbres aceptables para la medición de cada uno de los parámetros de calidad de energía.

5.3. Periodo y resolución para el muestreo de armónicos

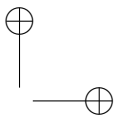
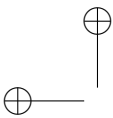
En esta sección se describen las características técnicas más relevantes que deben tener los equipos utilizados para la evaluación de las contaminaciones armónicas en las redes eléctricas. En algunos casos, las recomendaciones dadas en este trabajo se apartan de las características dadas por la IEC-61000-4-30, teniendo en cuenta algunas restricciones técnicas o comerciales de los equipos de medida disponibles en el mercado colombiano.

Para un adecuado monitoreo de armónicos, el equipo de medida debe tener una capacidad de lectura de parámetros con una tasa de muestreo de 12 ciclos (para 60Hz) que deben ser almacenados cada 3 segundos [23]. A partir de estos parámetros, el equipo de medida a ser utilizado debe tener una capacidad para almacenar 28.800 datos en la medición de un día, característica que comercialmente no es fácil de encontrar en los medidores de la clase B.

Por esta razón, se recomienda que la tasa mínima de almacenamiento de los valores de THD y de las magnitudes y ángulos de las componentes armónicas sean por lo menos de 0,1 % del tiempo total de la medida. Esto con el fin de lograr que para el análisis se tenga una base mínima de 1.000 datos, que es el valor mínimo de datos recomendado por la IEC-61000-4-30 para el análisis de una semana a intervalos de 10 minutos. Este valor es cumplido por la mayor parte de los analizadores de redes eléctricas de tipo portátil disponibles en el mercado colombiano. Así, para los diferentes tiempos de medida, la tabla 1 muestra la capacidad de almacenamiento que debe tener un equipo usado en estudios de contaminación armónica según el tipo de cliente.

Tabla 1. Tasas de captura de información para monitoreo de THD

Tipo de cliente	Periodo de medida óptimo	Tiempo de muestreo típico (s)	Tiempo de muestreo óptimo (s)
Residencial	24 Horas	90	30
Comercial	48 Horas	180	60
Industrial	72 Horas	270	90



5.4. Parámetros que se deben medir

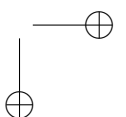
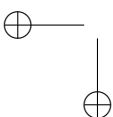
Los parámetros mínimos que debe medir el analizador de redes a ser utilizado en la captura de información para la evaluación de límites de contaminación armónica incluyen:

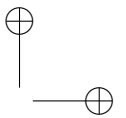
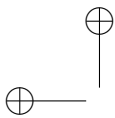
1. Medición (de forma individual) de la magnitud y ángulo de las componentes armónicas de las señales de tensión y corriente desde la componente fundamental hasta el armónico de orden 31 o hasta el máximo disponible (para el caso colombiano hasta el 50 armónico). Este requisito es generalmente cumplido por los medidores de calidad de energía disponibles comercialmente. En este aspecto, se tiene que, en sistemas de potencia como el colombiano, la presencia de armónicos por encima del orden 15 no son frecuentes y en caso de ser detectados son de bajas magnitudes [24]. De esta manera, se puede restringir el orden armónico máximo a ser medido y reducir así la cantidad de memoria usada en el equipo de monitoreo.
2. La medición de los valores RMS de cada una de las señales capturadas de tensión y corriente se debe realizar a la misma resolución y tiempo que los demás parámetros. La incertidumbre aceptada para la medición de la tensión debe ser de un $\pm 0,1\%$ de la tensión medida [22]. Para el caso de la corriente, la incertidumbre de la medida de corriente debe ser de $0,1\%$ de la plena escala del instrumento [22]. Sin embargo, teniendo en cuenta que la mayoría de los equipos de medida usados en Colombia poseen una clase de 0,2 y que a este error se deben sumar los errores propios de los transductores de corriente (CT o pinza de efecto hall) se propone que sea aceptada una incertidumbre máxima del 2% de la plena escala (igual al de clase B definido por IEC-61000-4-30).
3. Medición del ángulo de las componentes armónicas de las señales de tensión y corriente de forma individual desde la componente fundamental hasta el armónico de orden 31 o hasta el máximo disponible (para el caso colombiano hasta el 50 armónico). Se aclara que contar con los ángulos es útil para el análisis de las contaminaciones armónicas y sus soluciones.
4. Cálculo de los valores de THD para las señales de tensión y corriente.
5. Medición de la potencia real activa, la potencia real aparente, el factor de potencia real (incluyendo componentes armónicas) y la energía consumida. Esta captura se debe realizar a la misma resolución y tiempo que los demás parámetros mencionados anteriormente.

En general, para las mediciones de armónicos se considera el sistema eléctrico en estado estacionario. Sin embargo, para efecto de análisis de disturbios específicos, también pueden considerarse los efectos dinámicos productos de las maniobras hechas en la red.

5.5. Selección de la frecuencia de muestreo y de los periodos de medición

La frecuencia de muestreo debe seleccionarse teniendo en cuenta el teorema de Nyquist, que establece que la frecuencia de muestreo debe ser mayor que el doble de la frecuencia más alta que tenga la señal a analizar [18]. En el análisis de componentes armónicas en estado





estacionario, el análisis espectral debe permitir estimar componentes hasta el armónico 50, razón por la cual la frecuencia más elevada que debe considerarse es de 3 kHz para el caso del sistema eléctrico colombiano. La frecuencia de muestreo habitualmente utilizada en estos equipos es de 7,68 kHz, que corresponde a tomar 128 muestras por ciclo de (1/60 s). Con este número de muestras por ciclo se garantiza que el análisis espectral pueda realizarse hasta el armónico 50.

Respecto a los intervalos de observación recomendados para el análisis de armónicos, éstos varían desde los pocos segundos hasta una semana, dependiendo del estudio que se desee realizar. Los intervalos de observación que se recomiendan son los siguientes [24]:

- Intervalos muy cortos (t_{mc}) = 3 segundos
- Intervalos cortos (t_c) = 10 minutos
- Intervalos largos (t_l) = 1 hora
- Intervalos de un día (t_d) = 24 horas
- Intervalos de una semana (t_{sm}) = 7 días

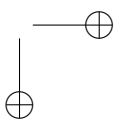
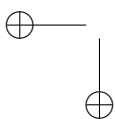
Con el fin de conocer detalladamente el comportamiento de los clientes, las medidas deben ser tomadas de manera ininterrumpida por un periodo suficiente como para determinar estadística y matemáticamente las características de distorsión armónica de cada cliente [25]. Medidas esporádicas o de corta duración deben ser rechazadas desde el comienzo, partiendo del hecho de que no representan con exactitud el comportamiento armónico del cliente. Por estas razones, el periodo óptimo de medida que se recomienda es de una semana de monitoreo. Este periodo permitirá conocer un ciclo de trabajo completo, especialmente para clientes de tipo comercial o industrial.

5.6. Transductores utilizados en la medición de armónicos

La función de los transductores, sea transformador de corriente (CT), transformador de potencial (PT) o ambos, es la de proveer una réplica de la corriente o la tensión del sistema de potencia a un nivel compatible con la operación de la instrumentación. La Figura 10 muestra el esquema de conexión típico para la medición de tensiones y corrientes armónicas usando CT y PT.

En línea con los requerimientos de exactitud sugeridos para la instrumentación, la norma IEC-61000-4-7 establece que el error de los transformadores de tensión y corriente no deberá exceder el 5 % (relacionado al valor medio) en magnitud y 5° en el ángulo de fase, esto para la magnitud más pequeña que se presente. La respuesta en frecuencia sugerida para los transformadores de instrumentación debe ser consecuente con un ancho de banda que puede ir desde 1 kHz a 5 kHz [25].

En la norma IEC-61000-4-30 se presenta un estudio realizado a transformadores de medida de tensión con tensiones primarias entre 6 kV y 400 kV. En este estudio se establece que la



precisión requerida para componentes armónicas sólo se garantiza para frecuencias que a lo sumo llegan hasta los armónicos de orden 7 (420 Hz) para alta tensión y hasta los armónicos de orden 15° (900 Hz) para media tensión [25]. Por esta razón, se deben tener en cuenta las especificaciones técnicas de los equipos utilizados y su comportamiento en la frecuencia.

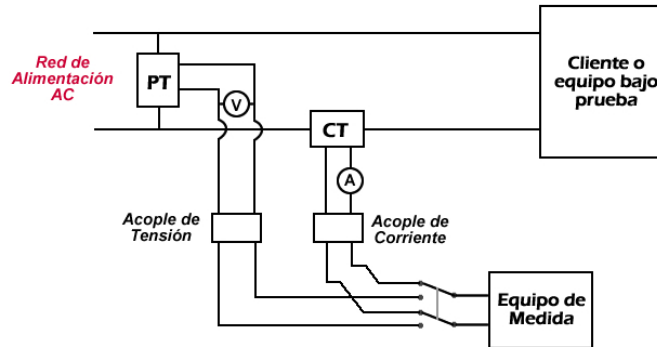


Figura 10. Circuito de Medición de Tensión y Corriente Armónica Usando PT y CT.

5.7. Condiciones adicionales para la medición de armónicos

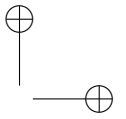
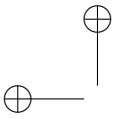
5.7.1. Medición de armónicos de tensión

Las mediciones de armónicos en tensión pueden realizarse del lado de baja tensión de un transformador con una conexión directa a las barras. Para los casos en los que se mida desde el lado de alta tensión, se pueden utilizar PT capturando señales de baja tensión en los equipos de medición.

Los PT generalmente tienen una respuesta en frecuencia aceptable para señales hasta 3 kHz. Transformadores de potencial con divisores capacitivos (CCTV) no deben ser utilizados para la medición de armónicos, ya que éstos utilizan un circuito sintonizado para la dar precisión en mediciones de la onda fundamental y pueden generar errores inaceptables a frecuencias armónicas [25].

5.7.2. Medición de armónicos de corriente

La medición de los armónicos de corriente se requiere para verificar el cumplimiento de los límites propuestos por la NTC 5001. Uno de los conceptos más importantes a la hora de abordar un problema de contaminación armónica es que los límites de armónicos en corriente se expresan como un porcentaje de un valor de corriente fijo que es la corriente promedio de la demanda máxima. Esto significa que los límites de corriente son esencialmente límites fijos de corriente con respecto a cada armónico (THDi) y a la tasa de distorsión total de la demanda (TDD).



Con el propósito de comparar las mediciones con estos límites, es importante que las mediciones de armónicos sean realizadas en magnitudes absolutas (amperios) y no como porcentaje de la corriente fundamental. Esto debido a que la magnitud fundamental de la corriente varía constantemente debido a las variaciones de carga y a los cambios en el control del factor de potencia.

Las corrientes armónicas expresadas como porcentaje de los cambios en la corriente fundamental pueden crear dificultades en cuanto la conversión de las corrientes medidas y los resultados pueden ser erróneos. Por ejemplo, los niveles de distorsión armónica expresados como porcentaje de la corriente fundamental pueden ser muy altos durante condiciones de carga baja, pero las magnitudes armónicas de las corrientes pueden ser totalmente aceptables, razón por la cual se deben calcular la TDD y no únicamente los THDi [11].

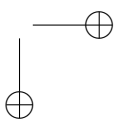
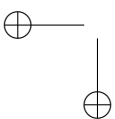
Cuando se realizan mediciones de distorsiones armónicas de corriente dentro de una instalación es importante incluir los ángulos de fase de cada armónico de forma individual. Esto permitirá una evaluación más completa de la cancelación entre los diferentes componentes armónicos dentro del sistema bajo análisis. Los ángulos de fase deben estar relacionados con una misma referencia la cual comúnmente se refiere al ángulo de cruce por cero de la onda fundamental de la fase A (L1 o fase R).

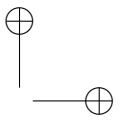
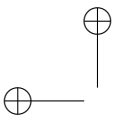
Las características de los CT también son importantes en la medición de las distorsiones armónicas de corriente. La respuesta en frecuencia de estos equipos debe ser evaluada para las mediciones que serán realizadas. Los CT deben tener menos de 3dB de atenuación para frecuencias menores a 3 kHz [25]. En caso de que los equipos disponibles no cumplan con esta condición, los valores de THDi y TDD no podrán ser tomados a través de estos equipos y por tanto deberán buscarse otras alternativas para su captura y análisis.

5.8. Condiciones del sistema durante la medición

Adicionalmente a las variaciones aleatorias de los niveles de armónicos, al realizar un análisis de los límites y niveles de distorsión armónica es importante evaluar el impacto que tienen las diferentes condiciones de operación del sistema sobre los niveles de distorsión armónica de un usuario final (cliente) o bien de la red de alimentación misma. Para estudios enfocados en el análisis de las contribuciones armónicas en el PCC, evaluar las condiciones de operación del sistema tales como el efecto de bancos de condensadores (usados por el cliente o por el operador de red), el efecto de los filtros de armónicos y el efecto de las posibles variaciones de la carga, sumado a las variaciones aleatorias de los niveles armónicos, resulta poco útil pues la finalidad del estudio es el conocer la responsabilidad en el aporte de armónicos a partir de un comportamiento estable tanto del cliente como del sistema de distribución.

Debido a esto, existe una dificultad en la aplicación de la metodología expuesta en la norma IEEE-519 para evaluar la contaminación armónica en un sistema ya que no se tiene en cuenta la relación entre la magnitud de los armónicos y su duración [21]. Un ejemplo típico de este aspecto lo constituye el proceso de arranque de un motor con arrancador electrónico, ya que los armónicos durante este proceso no serán los mismos que los armónicos medidos en el mismo punto después de que el motor se encuentre operando. Para el análisis del aporte armónico,





se recomienda usar la propuesta del grupo de trabajo de IEEE 519A [26], la cual define que los armónicos válidos dentro de un sistema a fin de evaluar los límites permisibles son los armónicos denominados de estado estable o bien aquellos que persisten un mayor periodo.

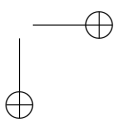
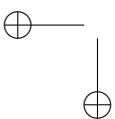
6. Conclusiones

En este trabajo se presentaron de manera sintetizada los requerimientos técnicos y las normas técnicas que deben ser aplicadas con el propósito de realizar un adecuado monitoreo y posterior análisis de la contaminación armónica en cualquier instalación eléctrica conectada a un sistema de distribución colombiano.

Estamentos de carácter nacional e internacional que son veedores de la buena prestación del servicio eléctrico han establecido, a través de diferentes estudios, límites que reducen el aporte armónico de un usuario final (cliente), definiendo así los tope permisibles que garantizan el buen funcionamiento de todos los elementos dentro de un sistema. Es por esto que cualquier estudio relacionado con la estimación de distorsiones armónicas o la determinación de responsabilidades en el aporte de armónicos en el punto de conexión o acople común (PCC), siempre debe ir de la mano con un análisis en el que se comparen los valores de distorsión armónica de cada cliente con los valores tope recomendados en la norma NTC 5001.

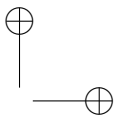
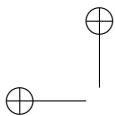
Para un correcto monitoreo y medición de armónicos en el estudio de calidad de potencia no sólo se requiere de dispositivos de medición y almacenamiento de datos que cumplan los requerimientos técnicos expuestos en la norma IEC-61000-4-30, también es necesario tener en cuenta otros aspectos que puedan alterar el comportamiento del sistema en el momento de la medición. Entre estos aspectos se encuentran: la correcta ubicación de los equipos de medición en el PCC, la frecuencia de muestreo, los intervalos de observación, los transductores utilizados, las recomendaciones dadas para la medición de armónicos de tensión y/o de corriente y además, analizar las condiciones del sistema durante la medición.

Se recomienda a los usuarios finales identificar y clasificar sus cargas perturbadoras con el propósito de predecir los problemas que éstas pueden generar en el normal funcionamiento de sus procesos o actividades. De esta manera, los monitoreos realizados en sus instalaciones proporcionarán información complementaria con el fin de tomar acciones para reducir problemas de contaminación armónica. Por otra parte, es conveniente que los clientes con ayuda de los operadores de red realicen actividades encaminadas al conocimiento de su red de alimentación y sus vecinos conectados con el objetivo de mantener ambientes eléctricos con contenidos armónicos por debajo de los límites establecidos.



Referencias

- [1] A. Terciyani, T. Avci, I. Yilmaz, C. Ermis, K. Kose, A. Acik, A. Kalaycioglu, Y. Akkaya, I. Cadirci, and M. Ermis, "A Current Source Converter-Based Active Power Filter for Mitigation of Harmonics at the Interface of Distribution and Transmission Systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, pp. 1374–1386, 2012.
- [2] K. Prabaakaran, N. Chitra, and A. S. Kumar, "Power quality enhancement in microgrid - A survey," in 2013 International Conference on Circuits, Power and Computing Technologies (ICCPCT), 2013, pp. 126–131.
- [3] "IEEE Standard 1159-1995, IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality," ed. New York, 1995.
- [4] P. Supriya and T. N. P. Nambiar, "Review of Harmonic Source Identification Techniques," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 7, Issue 3, pp. 4525–4531, May 2012.
- [5] S. Nath, P. Sinha, and S. K. Goswami, "A wavelet based novel method for the detection of harmonic sources in power systems," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 40, Issue 1, Pages 54–61, Sept 2012.
- [6] D. Stevanovic and P. Petkovic, "The Efficient Technique for Harmonic Sources Detection at Power Grid," *Prz. Elektrotechniczny*, vol. 88, Nr. 11a, pp. 196-199, 2012.
- [7] Q. C. Zhong, "Harmonic Droop Controller to Reduce the Voltage Harmonics of Inverters," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, pp. 936–945, 2013.
- [8] A. M. Eltamaly, "Novel Third Harmonic Current Injection Technique for Harmonic Reduction of Controlled Converters," *J. Power Electron.*, vol. 12, pp. 925–934, 2012.
- [9] C. J. Liu, F. Blaabjerg, W. J. Chen, and D. H. Xu, "Stator Current Harmonic Control With Resonant Controller for Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, pp. 3207–3220, 2013.
- [10] Instituto Colombiano de Normas Técnicas - ICONTEC, NTC 1340: Electrotecnia. Tensiones y frecuencia nominales en sistemas de energía eléctrica en redes de servicio público. 2004, p. 7.
- [11] Instituto Colombiano de Normas Técnicas - ICONTEC, NTC 5001: Calidad de la Potencia Eléctrica. Límites y metodología de Evaluación en Punto de Conexión Común. Colombia, 2008, p. 60.
- [12] Comisión de Regulación de Energía y Gas, Resolución CREG 070-1998: Colombia, 1998, p. 63.
- [13] Comisión de Regulación de Energía y Gas, Resolución CREG 024-2005. Colombia, 2005, p. 10.
- [14] A. F. Abdul Kadir, A. Mohamed, and H. Shareef, "Harmonic impact of different distributed generation units on low voltage distribution system," in 2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011, pp. 1201–1206.
- [15] M. Brenna, R. Chiumeo, and C. Gandolfi, "Harmonic analysis: Comparison between different modulation strategies for three phase inverter connecting Distributed Generation," 2011 Int. Conf. Clean Electr. Power, pp. 231–236, Jun. 2011.
- [16] X. Zhou, J. Liang, and W. Zhou, "Harmonic impacts of inverter-based distributed generations in low voltage distribution network," 2012 3rd IEEE Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst., pp. 615–620, Jun. 2012.
- [17] Bojoi, R.; Limongi, L.R.; Roiu, D.; Tenconi, A. "Enhanced Power Quality Control Strategy for Single-Phase Inverters in Distributed Generation Systems," *Power Electronics*, IEEE Transactions on , vol.26, no.3, pp.798,806, March 2011
- [18] Morsy, A; Ahmed, S.; Massoud, AM., "Harmonic rejection in current source inverter-based distributed generation with grid voltage distortion using multi-synchronous reference frame," *Power Electronics*, IET , vol.7, no.6, pp.1323,1330, June 2014
- [19] P. Garcia, L. Rodriguez, H. Rojas, and A. Ríos, "Aplicación del método de la impedancia crítica para determinar la fuente armónica dominante en circuitos," *Rev. Ing. e Investig.*, vol. 27, no. 1, pp. 138–148, 2007.
- [20] M. Bollen and I. Gu, *Signal processing of power quality disturbances*. New York, USA: IEEE Press Series on Power Engineering, 2006, p. 861.
- [21] IEEE Standards subcommittee, IEEE Standard 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. USA, 1992, p. 101.
- [22] J. Arrillaga, B. Simith, and N. Watson, *Power System Harmonic Analysis*, Second. New Zealand: Wiley and Sons, 1997, p. 382.
- [23] International Electrotechnical Commission, "61000-4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods", International Standard, February 2003.



- [24] E. Parra, *Análisis de armónicos en sistemas de distribución*. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia, 2004, p. 84.
- [25] International Electrotechnical Commission, IEC Standard 61000-4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation. 2002, p. 45.
- [26] IEEE Harmonic Working Group, P519.1 - IEEE Draft Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems. USA: P519A Task Force, 1996, p. 81.

Herbert Enrique Rojas Cubides

Nació en Bogotá D.C., 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.

Se desempeñó como instructor de Redes Eléctricas de Distribución e Instalaciones Eléctricas Industriales en el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y trabajó como ingeniero residente y luego como coordinador de proyectos en varias empresas del sector de ingeniería eléctrica y de telecomunicaciones. Actualmente se desempeña como docente en las áreas de Subestaciones Eléctricas y Aislamiento Eléctrico en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C., Colombia y es investigador del Grupo de Investigación en Compatibilidad e Interferencia Electromagnética (GCEM-UD), donde realiza estudios sobre procesamiento de señales, alta tensión, aislamiento eléctrico, compatibilidad electromagnética y calidad de potencia.

e-mail: herojasc@udistrital.edu.co

Adolfo Andrés Jaramillo Matta

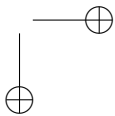
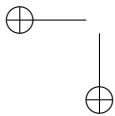
Nació en Palmira, Colombia. Es ingeniero electrónico de la Universidad del Valle, de Cali, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería – Énfasis en Automática, en la Universidad del Valle de Cali, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería Electrónica, en la Universidad Rovira i Virgili, de Tarragona, España. Obtuvo su Ph.D. en la Universidad Rovira i Virgili, de Tarragona, España. Se desempeñó como investigador y coordinador de investigación en la Universidad del Valle durante 2 años. Posteriormente, ejerció el cargo de PDI en la Universidad Rovira i Virgili y actualmente se desempeña como docente de planta en las áreas de Control y Calidad de Potencia en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C., Colombia.

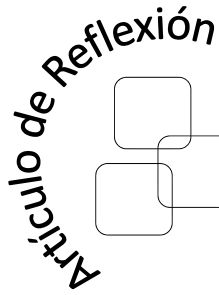
e-mail: ajaramillom@udistrital.edu.co

Edwin Rivas Trujillo

Es ingeniero electricista de la Universidad del Valle, de Cali, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Ingeniería – Énfasis en Sistemas de generación de energía Eléctrica en la misma Universidad. Doctor en Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Automática de la Universidad Carlos III de Madrid-España y Máster de la misma Universidad, actualmente se desempeña como docente titular de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; lidera el Grupo de Investigación en Compatibilidad e Interferencia Electromagnética (GCEM-UD).

e-mail: erivas@udistrital.edu.co





Sobre el rol innovador de la educación energética para la investigación en ingeniería

Energy education: a new research topic in engineering

Adriana Patricia Gallego Torres
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
adpgallegot@udistrital.edu.co

Jonn Edgar Castro Montaña
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
jecm1419@yahoo.com



Resumen

En este artículo se presenta una propuesta conceptual acerca de “la educación energética”, producto de la revisión y análisis de estudios teóricos y metodológicos que han abarcado el tema recientemente, y que surgió de la necesidad de construir un marco referencial que oriente la configuración y desarrollo de procesos de educación energética, particularmente como proyectos de investigación en el Programa de Doctorado en Ingeniería en la Universidad Distrital.

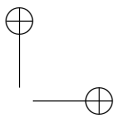
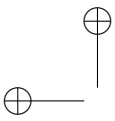
Palabras claves: educación energética, energías alternativas, conciencia energética.

Abstract

This paper describes a conceptual characterisation of the issue of “energy education”. For this purpose a comprehensive review of the most significant approaches to the subject in recent years was conducted, an a referential framework was built in order to motivate and guide the development of research projects in energy education, particularly in the Engineering Doctorate Program at Universidad Distrital.

Palabras claves: energy education, alternative energy, energy awareness.

Recibido: 06-11-2013
Modificado: 05-09-2014
Aceptado: 12-10-2014



1. Introducción

La educación energética es un proceso educativo que se remonta a mediados de la década de los años setenta del siglo XX, a raíz de la crisis energética producida inicialmente por el alza del petróleo; posteriormente se ha seguido desarrollando debido a la volatilidad del precio del mismo [8], el reconocimiento del agotamiento de las fuentes de energía de origen fósil [9], y el impacto ambiental negativo que tiene los procesos de extracción, transporte y uso [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16].

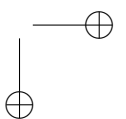
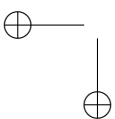
En la primera década del siglo XXI, la problemática tomó mayor fuerza debido a la conexión con problemas como el calentamiento global y los resultados de los productos de las investigaciones en ciencia e ingeniería [17] [18] [19] [20] [21] [22], el agotamiento del agua [23], la falta de solidaridad energética [24], entre otros.

De lo anterior surge la necesidad de investigaciones que lleven a los ingenieros a formular modelos energéticos diversificados, con base en el desarrollo de tecnologías más eficientes y el uso de fuentes alternativas de energía, limpias y renovables [25], que incluyan a los usuarios como parte activa y decisiva en dichos modelos, además de contemplar el nuevo escenario de modernización de las redes eléctricas (Smart Grid). La ingeniería en aras de mitigar el problema ha desarrollado dispositivos con protocolos unificados de monitoreo, medición y control que brindan la capacidad a los usuarios de ser parte activa del modelo adaptándose a sus necesidades.

Es así como se espera que las nuevas generaciones de ciudadanos giren hacia un cambio cultural donde los procesos de educación energética se consideren indispensables, sobre todo si se tiene en cuenta que el hecho de emplear redes inteligentes hace que cambie de una manera radical el concepto de cómo el usuario consume y hace uso de la energía, es decir, que las nuevas tecnologías y la nueva perspectiva de la educación energética hace que los ciudadanos sean parte activa del proceso de generación y consumo [1] [2] [26] [24] [27] [28].

En la actualidad existen diferentes tendencias a la hora de afrontar la educación energética, entre ellas destaca prominentemente la aplicación de SmartGrid enfocadas a la formación e información para el consumidor de forma que este sepa cómo hacer mejor uso de la energía y cambiar patrones de consumo. Al ser Colombia una potencia energética [29] [30] es fundamental fomentar la educación energética en tal sentido, en tanto que es productor de fuentes de energía de origen fósil, como petróleo, carbón y gas natural, y además tiene un enorme potencial en suplir sus necesidades energética con fuentes renovables de energía como la hidroelectricidad, tanto así que ya ha comenzado a comercializar con países vecinos.

Así pues, se considera necesario construir una propuesta de educación energética propia, que si bien puede tener como referente las realizadas en otras latitudes, no se puede caer en un proceso de transferencia acrítica, que no reconozca las particularidades del contexto colombiano [31]; con este fin en éste trabajo se presenta una reflexión teórica que busca enriquecer el concepto de educación energética que se ha desarrollado en el mundo, para construir un modelo que responda a las condiciones del contexto colombiano y a las nuevas tecnologías para el uso y gestión de la energía. Se espera de forma convocar el interés de los investigadores, particularmente de los estudiantes del Programa de Doctorado de la Universidad Distrital,



en considerar esta problemática para proponer proyectos de investigación contextualizados en el potencial que desde Colombia pueda ofrecer para mitigarla en el planeta.

2. La educación energética: desde una perspectiva social

Para analizar ésta perspectiva, es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos: el concepto de educación, de formación, el entorno, el contexto histórico y cultural, las políticas públicas y nuevas tecnologías

- a. *La educación:* La concepción de educación ha variado con el pasar de los años y las distintas crisis que han sufrido las sociedades, como prueba de ello tenemos por ejemplo, durante los siglos XVIII y XIX la educación era un instrumento para cultivar el espíritu, a la que solo tenían acceso personas de las clases sociales más adineradas; posteriormente, durante la revolución industrial, se requirió mano de obra calificada, lo que implicó una educación instruccional en masa, para entrenar a los más pobres para trabajar en las fábricas y además, adecuar sitios donde preparar a los futuros empleados y cuidar los niños mientras sus padres trabajaban.

Posteriormente el capitalismo configuró la educación como inversión, mediante la cual un país podría generar dividendos. Para el caso específico de América Latina, según Medina Bernal [32], en el siglo XX se combinaron la educación instruccional y la educación tipo inversión, bajo la esperanza de alcanzar el desarrollo. Cabe anotar, que son las diversas formas en que se ha concebido la educación, así como también, los modos de pensar, las estructuras políticas y los medios de producción los que han demarcado los diversos conceptos sobre lo que hoy se considera, educar, formar, instruir e informar. En este sentido, la educación energética es una propuesta que enseña a aprender, porque existe una correspondencia entre concebir el aprendizaje como una capacidad abierta [34] y el hecho que la realidad energética es dinámica. La realidad energética, al ser dinámica, es decir cambiante, requiere de un ejercicio educativo permanente, de constante aprendizaje para poder lograr una comprensión cada vez más adecuada.

- b. *El contexto social, cultural y ambiental:* este aspecto se ha visto marcado por problemas como la degradación ambiental, la violencia social, el agotamiento de las fuentes naturales de energía, el hiper-consumo, la necesidad de adaptarse a las redes inteligentes, entre otros, lo cual plantea la necesidad de un enfoque educativo diferente a la de otras épocas. En este sentido, la educación como instrucción o como inversión o la combinación de las dos hace ver a las personas como medios y no como fines del desarrollo, es decir, como un elemento importante para la realización de las personas desde la óptica individual y colectiva como un derecho humano [32], filosofía que se adapta perfectamente a lo enunciado en el I Seminario Internacional de Mercados Energéticos realizado en Junio del 2012. En este, destacaron conclusiones relacionadas con el usuario final como la siguiente: "Se debe continuar con el ejercicio permanente de evaluar nuevas posibilidades de aporte de las redes y mercados inteligentes a los diferentes componentes de la cadena de valor, desde la producción hasta el consumidor final"[3].
- c. *La Formación:* Una educación energética debe buscar la formación del ser humano como ciudadano e implicarlo en las políticas públicas de desarrollo. Al respecto, Estanislao

Zuleta [33] en su obra *Educación y Democracia*, diferencia dos tipos de educación, que asegura son contrarias, una educación entendida como un proceso de formación, que permite y fomenta el desarrollo de las personas, de su individualidad, y autonomía, que forma un sujeto que difícilmente se adapta al sistema, de hecho va en contra del sistema y por otra parte plantea, la educación como entrenamiento, relacionada al proceso económico que lo que produce es una fuerza de trabajo calificada que tiene demanda en el mercado, que produce sujetos heterónomos con grandes habilidades para adaptarse al sistema económico existente.

La prioridad, de la educación como entrenamiento, es educar para reducir el tiempo, los costos y maximizar las ganancias, para ello se hace necesario acelerar la información, el entrenamiento, los conocimientos útiles en la división del trabajo, donde el trabajador no necesita conocer el sentido ni el funcionamiento del sistema sino tan solo saber operar en una parte restringida. Se podría preguntar aquí ¿qué tipo de educación es la educación energética, del tipo formativo o del tipo de una forma de entrenamiento?

- d. *El Entorno*: La educación energética, centra su atención en reconstruir las relaciones de los seres humanos con su entorno y a su vez, con las fuentes naturales de energía, ya que sus necesidades para vivir le implican usarlas y a la vez cuidarlas. En la actualidad, no puede ser una educación polarizada y quedarse tan solo en informar personas o instruir trabajadores, lo que se busca es un ejercicio dialógico, en el que estas dos posturas que resultan opuestas coexistan y se superen. Es absurdo buscar formar personas muy reflexivas, que se resisten al sistema que no sepan hacer nada o buenos trabajadores que no reflexionen ni participen de la vida ciudadana, casi esclavos en pleno siglo XXI. Pero es más absurdo formar personas e instruir las al mismo tiempo, totalmente desconectados de la naturaleza, esto es, de construir la conciencia de su pertenencia y dependencia a la naturaleza y del poder y responsabilidad que tiene de usarla y cuidarla.
- e. *Las Políticas Públicas*: En este aspecto se debe tener en cuenta la realidad energética y las regulaciones que los gobiernos han realizado al respecto, lo que implica la posibilidad de cambios. Aunque muchos aspectos sean comunes entre la realidad energética durante la revolución industrial, la crisis energética de la década de los setenta del siglo XX y la actualidad, cada uno tiene sus particularidades. Por un lado, las fuentes energéticas son más diversas y hoy día existen mayor cantidad de desarrollos tecnológicos y posibilidades de aprovechar diversas fuentes, existe mayor conocimiento de las afectaciones ambientales y a la salud humana que generan el uso de algunas fuentes y tecnologías energéticas, de la misma manera, hoy día se reconoce la importancia de la responsabilidad de cada ser humano en el uso adecuado de la energía.
Según la UPME-Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia- (Enero, 2012), “Si bien es cierto Colombia como país en desarrollo ha tenido una responsabilidad mínima en la acumulación de gases de efecto invernadero proveniente de actividades antropogénicas, su política energética está dirigida hacia la satisfacción de las necesidades de los agentes económicos y de la población utilizando los recursos disponibles con criterios de sostenibilidad económica, social y ambiental”, lo que llevaría a fundamentar la educación energética en estas nuevas tecnologías, lo que implica procesos de educabilidad, lo que conlleva a una interacción entre diferentes usuarios (tanto regulados, como no regulados). Las experiencias sobre educación energética en la Unión Europea específicamente, en el marco del programa Altener, donde se desarrolló el proyecto “Force for Energy by Children” (Fuerza por la Energía de los Niños), han mostrado que los niños asumen con claridad la responsabilidad de la concienciación energética, en su familia y con sus ami-

gos [37]. También lo plantea, Odalis Rodríguez [38] profesora de primaria e investigadora en educación energética de Cuba, al asegurar que lo que los niños aprenden en la escuela lo enseñan en sus casas, por ejemplo, cuando aprenden a ser responsables con el uso de la energía eléctrica en las dinámicas de la escuela lleva a que los niños lo hagan con su familia.

- f. *Las nuevas tecnologías:* Desde esta óptica se puede afirmar, que la educación energética, debe contar con unas condiciones mínimas que permitan conjugar redes eléctricas inteligentes, fuentes alternativas de energía, las necesidades del sector energético y del mercado energético colombiano, los escenarios existentes; atendiendo a las problemáticas ambientales generados por otros modelos energéticos desde el punto de vista de la ingeniería y la Educación. Estudios anteriores plantean que la educación energética es una propuesta que busca favorecer la supervivencia de la especie humana en el planeta, ya que se entiende que, los problemas energéticos ponen en peligro la vida del ser humano en el planeta y la de casi todos los organismos vivos que se conocen [36].

Esto a su vez implica que no es posible tener una educación para el futuro prescrito sino para el futuro que se está construyendo en el presente, que está en constante cambio. Tampoco puede ser una acción paliativa que posterga la necesidad de acción en el ahora, dejándola para un futuro que no existe. La implementación de redes eléctricas inteligentes, podría modificar el futuro próximo, ya que el usuario es partícipe del modelo, lo que implicaría un cambio no solo en las tecnologías sino en las costumbres y el arraigo al sistema energético actual.

En suma, la racionalización de la educación energética comprende un proceso de aprendizaje basado en la información concebido para que el sujeto pueda dar cuenta de los resultados del conocimiento a la hora de la utilización y no necesariamente esta pensada para que los usuarios se apropien de los procesos de generación y gestión, es decir, de lo que se trata no es de reducir la educación a la información, de lo que se trata es de educar sujetos capaces de resolver problemas y tomar decisiones. No se puede concebir que una educación energética se reduzca solo a propuestas informativas, como las sonadas campañas publicitarias o a los promotores de ventas, con sus casas inteligentes, o a dar algunos tips de ahorro energético, a presentar un inventario de los electrodomésticos de bajo consumo, que si bien son acciones necesarias no son suficientes, pues se quedan en información que circula pero no en un elemento del sistema que constituye estar educado energéticamente y ha ser partícipe de la cadena.

3. La educación energética como sistema

La definición de educación energética dada por los especialistas hace referencia al desarrollo de un sistema de conocimientos, procedimientos, habilidades, comportamientos, actitudes y valores en relación con el uso adecuado de las formas de energía, su generación y su gestión lo que nos lleva a ir más allá y postular que la educación energética debe orientarse hacia una formación epistemológica que incluya los adelantos tecnológicos, financieros y sociales que hacen que el usuario sea parte activa de los modelos energéticos [26] [24] [27] [28] [35].

Los *conocimientos* asociados a la educación energética como sistema son el conjunto de conceptos, principios físicos, teorías y modelos científicos que van desde la generación, transformación hasta la gestión de la energía. Sobre el conjunto de conceptos, Arrastía [26] plantea que deben ser abordados desde un enfoque sistémico, en tanto que cada concepto se relaciona con todos los demás, el tratamiento de uno solo no es suficiente, deben trabajarse en conjunto, además, no se pueden desligar de los aspectos éticos y económicos. Algunos de los temas que se proponen trabajar, por ejemplo para Arrastía [24], están relacionados con el sistema energético contemporáneo, ya que permite entender las maneras cómo han cambiado los patrones energéticos de la humanidad de un periodo a otro y cómo se ha llegado al sistema actual, además, se favorece el abordaje de las relaciones injustas, excluyentes, consumistas y especulativas en que se basa el comercio de muchos de los portadores y tecnologías energéticas.

Otros *conceptos* que se deben reforzar van desde la nociones básicas de energía, el principio de conservación de la energía, las unidades de medida de la energía, los tipos de energía, las fuentes energéticas, los sistemas tecnológicos asociados a la energía, el consumo energético y medidas de ahorro energético, la generación, el transporte y la gestión [42]. Kandpal & Garg [7] proponen que en relación al estudio de las fuentes energéticas, además de estudiar si son o no renovables, deben hacer énfasis en los que estén disponibles localmente y del tipo de necesidades que se presenten y son factibles de suplir; sobre las tecnologías energéticas, recomienda abordar temas como la evaluación de recursos, la tecnología, la economía y la energética y las cuestiones socioculturales y los impactos ecológicos y ambientales. Arrastía & Yanes [28], argumentan que cuando se aprende sobre las fuentes alternativas de energía, se debe reconocer y valorar que el Sol es la principal fuente de energía, en tanto que es la fuente de vida y origen de la demás formas de energía que el hombre ha usado desde el comienzo de su existencia, además, porque la gran “mentira energética” de la actualidad y a la que proponen hacer frente, es considerar que la energía solar no es suficiente para abastecer el consumo mundial.

La educación energética como un sistema incluye el desarrollo de *habilidades* [7], esto hace referencia a que las personas comprendan el funcionamiento de diversos sistemas y tecnologías energéticas, que puedan diseñar, construir e implementar soluciones tecnológicas para aprovechar las diversas fuentes de energía, que valoren las consecuencias de las políticas energéticas, que puedan sugerir soluciones alternativas a la crisis energética y que puedan hacer evolucionar las soluciones globales en el marco de la sostenibilidad. Esta puede ser una de las áreas que susciten mayor interés para la comunidad académica de las distintas ramas de la Ingeniería.

Por otra parte las *actitudes* constituyen otro de los aspectos importantes que conforman el sistema a desarrollar en la educación energética. Al respecto, Pupo & Pérez [43] entiende por actitud un estado psíquico de la personalidad que posee componentes cognitivos, afectivos y conductuales, que son difíciles de cuantificar y que una forma de aproximarse a estas es por medio de la observación de actuaciones y declaraciones verbales, en tanto que se asume que las actitudes están en estrecha relación con las acciones conscientes que al integrarse con la comunicación conforman la actuación. Sumado a esto los especialistas en educación energética de la Unión Europea [5] plantean, que las actitudes de un ciudadano pueden ser modificadas por los sistemas de educación en tanto que estos exponen al ciudadano nuevas ideas y conceptos, dando al estudiante la capacidad social y analítica que le permita evaluar de forma racional sus opciones en la vida.

Algunas de las actitudes a formar son, de acuerdo con Pupo & Pérez [43], la actitud del ahorro energético, según Ballenilla, et al. [44] la actitud crítica frente a la tecnología, especialmente cuando se desea valorar las tecnologías orientadas a la sostenibilidad, de tal manera que puedan buscar respuestas a preguntas como: ¿qué costo energético implica?, haciendo énfasis en las tecnologías relacionadas con la obtención, gestión y uso de la energía. Respecto a esto último por ejemplo, determinar su tasa de retorno energético TRE, es decir, ¿Cuánta energía se obtiene de la energía que hay que invertir para obtenerla?, también, ¿cuál es su potencial de sustitución de las fuentes de energía primaria tomando como base el consumo actual de energía?, ¿qué porcentaje podría llegar a cubrirse de forma realista?, y finalmente ¿cuál es el plazo de tiempo en que es previsible que se realice dicha sustitución?. Arrastía [26] considera que lo que se deben formar en las personas son actitudes adecuadas hacia el cuidado del entorno natural y de los otros, la ciencia y la tecnología y en términos generales de la energía [45].

Igualmente los *valores*, representan otra arista que permite configurar el sistema que constituye la educación energética. Formar valores como la solidaridad diacrónica, que hace referencia al deber que se debe tener para con las generaciones futuras en relación con el cuidado y uso de las fuentes energéticas, en tanto que desarrollar el sentimiento de solidaridad es una respuesta a la injusta repartición de la energía en el mundo, así como la responsabilidad que todos compartimos en la protección del ambiente y la prevención de los graves efectos que provoca la producción masiva de energía a partir de los combustibles fósiles y nucleares, requiere de la formación en principios éticos a modo de norma que orienten los comportamientos del ser humano[26]. Algunos de los principios éticos de la energía, que se plantean, que deben hacer parte de la educación energética son [28]:

- Accesibilidad justa, que se refiere a la disponibilidad de energía para todos sobre bases justas y a un nivel adecuado.
- Uso Racional, que hace referencia a reducir el consumo disminuyendo el despilfarro y uso banal de la energía.
- Sostenibilidad y equidad, que se refiere a que las fuentes de energía deben ser renovables satisfaciendo las necesidades del presente sin dañar la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las suyas del momento.
- Responsabilidad ambiental que se relaciona con tomar medidas para reducir el impacto ambiental de la producción, distribución y uso de la energía.
- Innovación, investigación y desarrollo, que se refiere a que los gobiernos deben invertir en investigación, desarrollo y formación de recursos humanos en el campo de la energía.
- Educar a través de los medios de comunicación.
- Cooperación internacional, que se refiere a la necesidad de un pensamiento global respecto a la energía, que permita construir un consenso que oriente los programas de acción en el uso y producción de energía a partir de las sus implicaciones globales.

Teniendo en cuenta lo anterior, la educación energética se debe asumir como un sistema dinámico, que se va construyendo en la medida que se va aprendiendo al respecto de los

elementos que lo componen. Sin duda alguna el enseñar a aprender, es un proceso complejo, pues el sistema al no estar dado, implica el desarrollo de capacidades cerradas y sobre todo abiertas, como resolver problemas reales sobre lo energético. Esto no se aprende totalmente sino que requiere un aprendizaje constante. La segunda cosa que se concibe, es que los seres humanos en el proceso educativo están en la capacidad de desarrollar el sistema, de aprender lo que sea necesario para desarrollarlo, ubica a los protagonistas del proceso educativo como creadores del sistema que configuran su educación energética.

La educación energética como sistema es simultáneamente una educación científica, tecnológica, social y una educación ambiental. Al ser la educación energética un sistema no se considera exclusiva de la educación científica, como si sólo se tratara de comprender teorías y conceptos sobre la energía, los procedimientos que enmarcados en la actividad científica permiten la construcción y validación de teorías científicas alrededor de la energía, o como una educación tecnológica como si solo se refiriese a la comprensión de los procesos tecnológicos sobre el aprovechamiento de la energía desde las fuentes y tecnologías alternativas de energía. Tampoco se considera como una educación ambiental, que busca proteger, cuidar y preservar las fuentes naturales de energía, gestionar los recursos energéticos y controlar que se realice con bajos niveles de contaminación. La educación energética es todo lo anterior en simultáneo, es un concepto que integra componentes, pues ninguno por sí solo da cuenta de lo que implica saber y hacer frente a lo energético, en cambio integrando se puede obtener una aproximación más adecuada a la realidad energética, que es lo que caracteriza un sistema que relaciona todas sus partes. Esta relación se puede establecer de la siguiente manera:

- La relación entre la educación energética y la educación ambiental según, Ávila, Cruz, & Núñez [36] se identifica porque la educación energética comparte con la educación ambiental aspectos como: que es un proceso continuo y permanente, que es una dimensión de la educación integral, que está orientada al sistema de conocimientos, habilidades, hábitos, capacidades, actitudes y valores, en los procesos económicos, sociales y culturales, que muestra la relación entre los seres humanos, la sociedad y la naturaleza. Además, Kandpal & Garg [7] consideran que la educación energética y la educación ambiental existen vínculos fuertes ya que la primera debe tener en cuenta la relación entre lo energético y lo ambiental, donde se puedan identificar los impactos sobre el ambiente y la forma de mitigarlo o contrarrestarlos cuando a lo energético se refiere, un ejemplo claro es lo que sucede cuando se aborda el problema del cambio climático.
- La relación entre la educación energética y la educación científica y tecnológica se ha hecho evidente. Según Fernández [46] considera que la educación energética permite abrir la enseñanza de la física hacia metodologías CTS en tanto que permite construir puentes entre las ciencias experimentales, las ciencias sociales y el ambiente. Además, Vásquez [47] considera que la educación energética debe ser uno de los objetivos principales de la enseñanza de las ciencias, es decir que sea responsabilidad de los profesores de ciencias los que asuman la educación energética, por ser estos los que de una manera u otra están formados en el conocimiento sobre lo energético. Es claro pues que para ello debe abordarse la educación energética en los procesos de formación de profesores.
- Las relaciones entre la educación tecnológica y la educación energética, se refieren a la necesidad que los ciudadanos aprendan a hacer un uso responsable de las tecnologías,

que en el caso de lo energético toma gran relevancia, por un lado, la mayoría de artefactos tecnológicos de la actualidad realizan un gasto de energía que además de ser cada vez más eficiente debe ser racional. Por otro lado, frente a las múltiples opciones que se ofrecen en términos de tecnologías que aprovechan fuentes alternativas de energía como la solar, la eólica, entre otras, el ciudadano debe comprender su funcionamiento, sus riesgos, su pertinencia y que tanto le permite resolver sus necesidades energéticas [48]. En ambas formas de educar, formar a los ciudadanos en la toma de decisiones sobre los desarrollos tecnológicos que les permiten suplir sus necesidades sin afectar negativamente el ambiente, resulta siendo un punto de encuentro ineludible, más que comprender o saber usar los diversos artefactos tecnológicos se debe aprender a tomar decisiones racionales, contextuales, sobre tecnologías adecuadas social, ética y ambientalmente [49].

- La educación social y la educación energética coinciden en la necesidad de formar ciudadanos participativos que se alejen de las dinámicas de la democracia representativa y se reconozcan como actores sociales activos que cuentan con un conjunto de derechos y deberes los cuales deben promover, proteger y hacer uso [50]. Sin duda, uno de los derechos de los ciudadanos es gozar de un ambiente sano y para ello deben ejercer el deber de cuidarlo y protegerlo frente a cualquier amenaza como el uso inadecuado de fuentes de energía de origen fósil o los agro-combustibles, además, de poder participar en la toma de decisiones del tipo de fuentes que se deben usar en su comunidad.
- Las relaciones entre la educación científica y tecnológica y la educación ambiental en la actualidad son más visibles y necesarias y la educación energética permite establecer estas relaciones. Al respecto, Lucie Sauve [51], concibe que para la educación de ciudadanos, la educación científica y la educación ambiental pueden presentar relaciones de complementariedad pertinentes e importantes, en tanto que los problemas que aquejan a la humanidad en pleno siglo XXI pasan por la comprensión científica, tecnológica y de la naturaleza, el cuidado del ambiente, apuntan a la transformación social y el reconocimiento de otros saberes. Lo que permite ver con mayor claridad la factibilidad de concebir a la educación energética como una intersección entre la educación ambiental y la educación científica y tecnológica, en tanto que no se trata de plantear otra forma más de educar para colocar en el currículo, ni una necesidad coyuntural como la sucedida en la década de los setenta del siglo XX con la crisis energética, sino como una emergencia que se ha configurado por la realidad energética actual y el reconocimiento de los elementos significativos de cada una de las formas de educar que no se eliminan sino lo que se buscan es articular ya que las cuestiones energéticas lo requiere como aspecto fundamental en la existencia humana.

Reconocer la educación energética como una propuesta educativa que supera las propuestas en educación científica, tecnológica, social y ambiental cuando se refieren a lo energético, pero que se fundamenta en dichas propuestas, implica ubicarse en un mirador transdisciplinar. Al respecto, Basarab Nicolescu, físico rumano especialista en teoría de partículas elementales, fundador y director del Centro Internacional de Investigaciones y Estudios Transdisciplinarios (CIET) y cofundador del Grupo de Estudio de la Transdisciplinariedad de la Unesco, quien también fue coautor, con Lima de Freitas y Edgar Morín, de la primera carta de la transdisciplinariedad en el Convento de Arrábida Portugal en 1994 y autor del manifiesto de la Transdisciplinariedad publicado en diciembre de 1996 en París; plantea que la transdisciplinariedad

promueve la reconciliación entre la ciencias naturales, experimentales y mal llamadas duras y exactas con la ciencias sociales, humanas y mal etiquetadas como ciencias blandas, permitiendo ver que unas no son más que otras sino que se hace necesario religarlas para construir un nuevo conocimiento de la realidad.

La transdisciplinariedad es una de las características de las perspectivas de la educación a comienzos del siglo XXI [52], y una disposición de pensamiento para comprender sistemas como la educación energética, porque ésta a la vez que abarca las disciplinas, sin abolirlas ni subyugarlas, favorece su apertura a aquello que las cruza y supera, permitiendo alcanzar lugares donde las disciplinas no pueden llegar, dinamizando la circulación de conceptos y valores entre las disciplinas, garantizando así la complejidad de lo real, donde no existen problemas completamente resueltos ni puntos de partida totalmente ciertos, es el lugar en el que el pensamiento oscila entre las partes y el todo buscando claridad mutua, pero nunca crece de manera rectilínea ya que las verdades son provisionales, además de parciales [53].

Para construir un conocimiento transdisciplinario se requiere pensar de manera distinta a como se pensaba en la modernidad, esto es, partiendo la realidad, separando el conocimiento, súper-especializando la experiencia, de lo que se trata en lo transdisciplinar es de favorecer un pensamiento ligado [54], hacer que la incertidumbre interactúe con la certidumbre, la vida con la muerte. El pensamiento ligado hace necesario contextualizar, porque el pensamiento debe estar ligado al contexto ya que sin este no tiene sentido, globalizar porque si él no se liga con lo global queda aislado, relacionar a otras formas de pensar no permitiendo que exista una sola forma que resulte siendo homogenizante y buscar las múltiples causas de lo que sucede porque los acontecimientos y los hechos en una realidad compleja son multi-causales [52].

La transdisciplinariedad es una alternativa de la manera como se comprende el mundo y el ser humano. Según, de Freitas, Morin & Nicolescu [55], la transdisciplinariedad es una forma de hacer frente, entre otras cosas: al crecimiento exponencial de disciplinas académicas que hace imposible una visión global sobre el ser humano, a la amenaza que sobre la vida se alza de una tecnología centrada en la eficacia, a la ruptura entre un conocimiento más acumulativo y un ser interior cada vez más empobrecido que posicionan firmemente un nuevo oscurantismo, a un conocimiento que genera desigualdades entre pueblos y naciones haciendo poderosos a los que lo poseen y minusválidos a lo que no lo tienen, a la complejidad del mundo y a la autodestrucción material y espiritual de la especie humana, porque la transdisciplinariedad favorece una forma de inteligencia que da cuenta de la dimensión planetaria de los conflictos que se viven en la actualidad.

La educación energética si bien debe ser transdisciplinar, hasta el momento se ha caracterizado más por ser interdisciplinar, al respecto, Dias, Mattos, & Balestieri [4] utilizan un ejemplo clarificador, al referirse al estudio del contexto histórico y geográfico del uso de los combustibles fósiles, ya que éste permite reconstruir los hechos que motivaron el actual modelo de consumo de energía, permite el análisis numérico y conceptual de los procesos físicos de transformación de la energía donde confluían disciplinas como las matemáticas, la química y la física, también permitiría la evaluación del impacto ambiental debido al uso y producción de combustibles fósiles donde confluían disciplinas como la biología y la química.

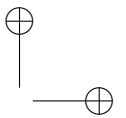
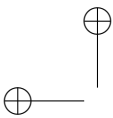
El carácter interdisciplinar de la educación energética, también se puede ver claramente en la relaciones entre la economía y la física, pero antes de presentar tales relaciones debe ha-

cerse claridad a qué tipo de economía se hace referencia, ya que no se trata de la economía capitalista puesto que ésta es la responsable de la situación de deterioro ambiental y de la desigualdad social. Por el contrario, hace referencia a la economía que reconoce sus vínculos con el ambiente. Al respecto, Cardentey, Pérez, & Hernández [56] evidencian dos tipos de economía que tienen en cuenta las relaciones con el ambiente, la primera llamada como economía ambiental, la cual surge desde la década de los sesenta del siglo XX y se considera como una construcción de la renovada economía clásica, donde las relaciones entre economía y ambiente se limitan al campo de las externalidades, esto es, a los impactos, cuyo valor no se tienen en cuenta por los precios de mercado y permanecen externos al mercado, para ello, propone imputar valores monetarios a dichos impactos y a los recursos no renovables, de tal manera que puedan incluirse en el análisis costo-beneficio para decidir sobre la rentabilidad de su eliminación o conservación.

El segundo tipo, es la economía ecológica, en la cual se estudian críticamente conceptos como el de materia prima, reservas y producción, haciendo ver que no son convenientes para un sistema eco-integrador y se propone la sustitución de estos conceptos por otros. Por ejemplo, el de materia prima se propone cambiar por el de recursos renovables y no renovables, ya que el concepto de materia no tiene en cuenta la renovabilidad de los recursos.

La economía ecológica tiene fundamentos físicos basados en las leyes de la termodinámica [56], de la siguiente manera: La primera ley de la termodinámica o del principio de conservación de la energía, permite plantear que la actividad económica se caracteriza por la transformación de materiales y energía de un estado a otro, sin que existan aportes a la cantidad de energía que se invirtió al comienzo del proceso. La segunda ley o ley de la entropía, se asocia a que el valor económico de la materia y la energía está dado por la disponibilidad de estas para ser utilizadas, en contraste a las que no están disponibles o que ya ha sido utilizada, donde se debe entender que la actividad económica es un proceso que utiliza material de baja entropía y se transforma en materiales de alta entropía; se debe entender que la degradación de la energía que produce toda actividad económica, hace responsables a la generación actual con la actividad económica y desarrollo de futuras generaciones. La tercera noción se relaciona con plantear la imposibilidad de generar residuos de los que pueda tolerar la capacidad de asimilación de los ecosistemas y la imposibilidad de extraer de los sistemas biológicos más de lo que se pueda considerar en su rendimiento sostenible ya que ambas situaciones implicarían la destrucción de la vida.

La educación energética requiere también de una mirada transdisciplinar, porque en concordancia con la transdisciplinariedad planteada por Nicolescu [57], ésta hace frente a la paradoja que plantea el inmenso desarrollo en el conocimiento especializado que ha permitido conocer el mundo desde lo infinitamente pequeño hasta lo infinitamente grande y aún no se conozca quiénes somos, reduciendo el sentido y significado de la vida y la muerte a lo insignificante y absurdo, ya que la actual crisis de la humanidad no es como las anteriores. La educación energética siendo transdisciplinar, permite ubicar al ciudadano como actor activo y responsable de la realidad energética, la cual si bien es compleja y requiere esfuerzos por ser comprendida, también es construido y transformada por las acciones del ciudadano, así como el ciudadano es formado y transformado por dicha realidad, generando una interacción que coloca la necesidad de cuidar, preservar y valorar la vida de todos los seres vivos, trascendiendo así la idea de construir miradas disciplinares sobre la realidad energética, que si bien son necesarias, como se decía son insuficientes, que más que comprender para conocer y actuar sobre dicha realidad lo que se quiere es aprender a vivir bien si dañar el entorno y a los otros.



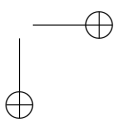
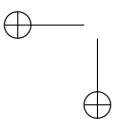
Asumiendo hasta aquí que la educación energética es un sistema dinámico relacionado con la actividad humana que favorece el pensamiento sobre cuestiones energéticas y que busca combatir la ignorancia sobre lo energético, se abre la posibilidad de plantear la misma como una acción intencionada, porque, parte de un estado inicial de la realidad, caracterizada en muchos casos por la ignorancia de las personas sobre la realidad energética, que desea ser transformado a otro estado, a un estado de no ignorancia donde se ha fomentado una forma de pensar que permite la construcción de un sistema de conocimientos, procedimientos, habilidades, actitudes y valores sobre lo energético. Una forma de pensar que permite concebir y construir una realidad energética distinta. El estado al que se quiere llegar, si bien comienza como un ideal, permite trabajar éste en función de lograr que sea distinto al inicial.

4. La educación energética una acción colectiva, política y planetaria

La educación energética es, por tanto, una acción colectiva, ya que la proponen y desarrollan un conjunto de seres humanos movilizados por el interés de resolver sus necesidades energéticas sin afectar negativamente su entorno natural y a los otros. La educación energética, debe entenderse a su vez, como bien lo plantea Paulo Freire cuando dice que “nadie educa a nadie y nadie se educa solo, los hombres se educan en comunidad y el mundo es su mediador” [58]. El mundo para el caso de la educación energética, es el mundo que depende de las fuentes de energía, aquel en el que viven los ciudadanos y hacen uso de dichas fuentes. Por medio de la educación el ser humano aprende que no es único [34] se da cuenta que su naturaleza depende de otros, y de que en soledad no se forman seres humanos ya que son el resultado de lo que aprende en la interacción.

Adicionalmente, la educación permite al ser humano aprender que no es el primero, con el que se inicia la historia, le hace caer en cuenta que antes de él ha habido otros que han construido una historia, una cultura, una dinámica social en la cual se instala, que puede transformar pero no desconocer. El ser humano al reconocer que no es único, ni el primero, por medio de la educación puede construir dos ideas fundamentales, la de sociedad y la de tiempo. La idea sociedad, además, de permitirle ver que depende de los otros, le muestra la necesidad de reconocer las dinámicas sociales, las formas de interactuar, aprende a compartir. La idea de tiempo, se constituye cuando reconoce que tiene pasado, que depende de otros que ya no viven pero que vivieron y dejaron legados, cuando tiene presente y además cuando tiene que pensar en los que aún no han nacido pero que llegarán y que serán responsabilidad de él educarlos y dejarles un legado. Como acción colectiva, la educación energética no adoctrina a las masas, no es una propuesta para seguir ciegamente, por el contrario, ésta es una construcción que debe ser reflexiva, discutida y gestionada por el colectivo de ciudadanos donde no hay una imposición sino una construcción conjunta.

Ahora bien, la educación energética como acción colectiva, es entendida como una acción de carácter político, porque busca la formación de ciudadanos para que participen activamente en su sociedad y su cultura transformándolas y enriqueciéndolas en relación a lo energético. De lo que se trata es de empoderar a los ciudadanos para que puedan participar en la toma de decisiones que sobre las cuestiones energéticas que se les presentan o se puedan presentar



en su vida social, familiar, política, etc. Según Freire [59], la educación es una práctica inevitablemente política, porque no es una acción neutral, ya que está orientada por ideales que pueden ser utópicos, pero que movilizan a la acción.

Puede sonar utópico pensar que la educación energética puede contribuir en la transformación del modelo energético actual, por un modelo alternativo, pero son las utopías las que movilizan los cambios y para generar los cambios se requiere tomar decisiones. Así la participación cobra una vital importancia ciudadana en la educación energética ya que no se refiere solamente a tener acceso a los servicios de energía, ni a depositar un voto en una elección sobre alguna propuesta energética, se trata de tener capacidad de construir propuestas, analizarlas críticamente, desarrollarlas, tomar decisiones que le permitan desarrollarse en armonía con su ambiente, esto es con la naturaleza y con los otros. Si bien Estanislao Zuleta [33], concibe que la educación pública es una manera de mantener la ilusión que se vive en una sociedad democrática, libre, con movilidad social y con igualdad de oportunidades, también la considera como un campo de combate desde el cual se puede enfrentar el sistema, de esta manera se puede pensar también el carácter político de la educación energética como parte de la educación pública.

La educación energética, como acción política no se presta para agenciar políticas energéticas que en su elaboración no hayan participado activamente los ciudadanos, según Pedrosa & Leite [60] las políticas energéticas no dependen directamente de cada ciudadano, lo que les resultan impersonales y por tanto no responden a ellas. No se está diciendo que la formulación y aplicación de políticas no sean necesarias para el desarrollo de las formas adecuadas en el aprovechamiento de la fuentes de energía, pero sí que al hacer políticas al margen de la participación de los ciudadanos se convierte en imposiciones, que conlleva, entre otras cosas, a que los cambios de acciones frente a lo energético resulten siendo forzadas, descontextualizadas y no consientes. Esto a su vez implica que tarde o temprano se termine haciendo resistencia para la negación y no una resistencia crítica para la construcción. Las relaciones entre la educación energética y la elaboración de políticas energéticas, debe caracterizarse por ser de construcción colectiva y recíproca, esto es, en la medida que la educación energética permite el posicionamiento crítico frente a las políticas, además de permitir su comprensión y transformación, las políticas energéticas por su parte se constituyen en un insumo importante para el desarrollo de la educación energética en tanto que son referentes de estudio obligados para la formación energética de los ciudadanos.

La educación energética es una construcción dialógica entre la planetariedad y la localidad. La planetariedad, al igual que la transdisciplinariedad, de acuerdo con Moacir Gadotti, en su obra *Pedagogía de la Tierra* [52], plantea que es una de las categorías que configuran las perspectivas actuales de la educación que hace referencia al reconocimiento que todos los seres humanos pertenecen a un mismo lugar, al planeta Tierra, y que los problemas que se generan en dicho planeta afectan a todos, como es el caso de los problemas ambientales, que son de carácter planetario, un ejemplo claro es el cambio climático ya que no respeta fronteras.

El reconocimiento de la planetariedad es necesario en este siglo, más aún cuando gracias a las nuevas tecnologías de la información y la comunicación se logran interacciones sociales casi que de manera inmediata entre habitantes de distintos lugares separados por miles de kilómetros, interacciones donde se pueden construir el reconocimiento de problemas energéticos que se comparten y de las soluciones que se puedan desarrollar. El concepto de planeta-

riedad, se plantea también, como una opción al concepto de globalización promovida por el desarrollo capitalista, según Marco Raúl Mejía [61], debe pensarse que la única globalización no es la del mercado sino que se hacen posibles otras globalizaciones que surgen bajo la necesidad de atender problemas globales como los de la afectaciones del ambiente, la pobreza, la violencia y en este caso los problemas energéticos.

5. A manera de conclusión

Esta disertación partió de la necesidad de acuñar un nuevo concepto sobre educación energética, que lleve a las nuevas generaciones a vivir en un planeta saludable. Hablar de educación energética supone estudiarla desde tres perspectivas: el cuidado del medioambiente y sus implicaciones, el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones y los esquemas sociales asociados al desarrollo sostenible, que incluyen, valores, actitudes, comportamientos, representaciones. Lo que nos lleva necesariamente a definirla como un sistema dinámico constituido por conocimientos, procedimientos, habilidades, comportamientos, actitudes y valores en relación con la generación, uso y gestión de la energía. El aprendizaje al que hace referencia la educación energética está ligado a favorecer el pensamiento y la toma de decisiones, a la vez que involucra a los usuarios en la cadena, la formación de capital humano, la participación en las políticas energéticas y los entes reguladores.

Es necesario dejar por sentado, que éste trabajo solo hace referencia a la conceptualización de la educación energética, una segunda parte que se encuentra en construcción plantea una propuesta de cómo llevar la educaciones energética a las nuevas generaciones de usuarios y cómo alfabetizar a las actuales, que comienza con una fase de conceptualización que permite establecer una hoja de ruta, para poder lograr un aprendizaje significativo que transforme los usuarios de simples consumidores a ciudadanos inteligentes, que optimizan los recursos energéticos y que sean parte activa del sistema.

Vale la pena recalcar que la educación energética, brinda a los individuos los elementos necesarios para realizar un análisis crítico de las condiciones de su entorno, permitiéndoles identificar los principales problemas energéticos y buscar con su participación alternativas de solución. Además, como bien lo plantea Mario Alberto Arrastía, la educación energética debe entenderse como un fenómeno educativo, como un proceso largo y complejo que incluye asumir como propios, los conceptos, procedimientos, valores y actitudes que no se pueden imponer sino que requieren de la disposición favorable de las personas y la comprensión de sus necesidades [24] [28], lo que implica reconocer que educar energéticamente es favorecer el pensamiento de los ciudadanos en relación a la urgencia de la sostenibilidad de las ciudades actuales y mas específicamente, de los sistemas energéticos.

Para terminar, y como perspectiva, estamos convencidos que ésta educación energética, debe avanzar en posteriores investigaciones hacia una educación energética inteligente, que busca superar la ignorancia de los usuarios e implicarlos de forma participativa para que las próximas generaciones puedan tener ciudades limpias e inteligentes, tecnológicamente desarrolladas y avanzadas.

Referencias

- [1] F. Casellas, G. Velasco, F. Guinjoan. El Concepto De Smart Metering En El Nuevo Escenario De Distribución Eléctrica. 2009
- [2] Congreso nacional de servicios públicos. Taller Tecnología e implementación de redes inteligentes en el sector eléctrico. 2011
- [3] Colombia Inteligente. Tomado el 3 de febrero del 2013. Url: <http://www.colombiainteligente.org/Pages/default.aspx>.
- [4] R. Dias, C. Mattos y J. Balestieri, «Energy education: breaking up the rational energy use barriers,» *Energy Policy*, vol. 31, n° 11, pp. 1339-1347, 2004.
- [5] Comunidades Europeas, Educación energética. Enseñar a los futuros consumidores de la energía, Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de la Comunidades Europeas, 2006.
- [6] J. Figueroa, R. Villalobos, C. Contreras, X. Latorre, N. Hanh, C. Chaparro, C. Maureira, F. Ledesma, J. Leiva y R. Figueroa, Eficiencia Energética en la Enseñanza Media Científica Humanística. Guía de apoyo Docente, Chile: CONAMA Nacional, 2009.
- [7] T. Kandpal y H. Garg, «Energy Education,» *Applied Energy*, pp. 71-78, 1999.
- [8] R. Pichs Madruga, «Situación petrolera mundial y sostenibilidad energética,» de Educación Enerxética e Desenvolvimento Sostible, Santiago de Compostela, 2007.
- [9] A. Vilches, D. Gil Pérez, J. Toscano y O. Macias, «Agotamiento y destrucción de los recursos naturales,» 2007. [En línea]. Available: <http://www.oei.es/decada/accion23.htm>.
- [10] Fracaso primer intento de contener derrame de petróleo en el Golfo de México, «El Tiempo.com,» 8 5 2010. [En línea]. Available: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-7699346>.
- [11] J. J. Bourne, «Derrame de petróleo en el Golfo Un dilema profundo,» *National Geographic en español*, pp. 2 - 31, 2010.
- [12] Instituto Mundial del Carbón, El carbón como recurso. Una visión general del carbón, Londres: World Cool Institute, 2005.
- [13] Alerta por derrame de crudo en Santander, «El Tiempo.com,» 14 5 2012. [En línea]. Available: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-5419490>.
- [14] Emergencia en Barrancabermeja por derrame de crudo, «El Tiempo.com,» 21 7 2012. [En línea]. Available: http://www.eltiempo.com/colombia/oriente/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-12053083.html.
- [15] Derrame de petróleo afectará humedal Torca, «El Tiempo.com,» 24 2 2012. [En línea]. Available: http://www.eltiempo.com/colombia/bogota/ARTICULO-WEB-NEW_NOTA_INTERIOR-11205762.html.
- [16] J. Rincón, «El carbón y su problemática ambiental,» *Revista Academia Colombiana de Ciencia*, vol. 26, n° 99, pp. 271-278, 2002.
- [17] IPCC, Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los grupos I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, R. K. Pachauri y A. Reinsinger, Edits., Ginebra, Suiza.: IPCC, 2007, p. 104.
- [18] J. F. Isaza Delgado y D. Campos Romero, Cambio Climático. Glaciaciones y calentamiento global, Bogotá: Fundación Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, 2007.
- [19] Declaración de Bogotá sobre el clima y las energías, «Klimaforum Latinoamerican Network,» 21 09 2012. [En línea]. Available: <http://klnred.ning.com/>.
- [20] T. Flannery, El clima está en nuestra manos, Primera ed., New York: Taurus, 2006.
- [21] J. Pabón, «El cambio climático en Colombia,» Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 2008.
- [22] S. Weart, El Calentamiento Global. La Historia de un descubrimiento científico, Navarra: Laetoli, 2006.
- [23] M. Edwards, D. Gil, A. Vilches y J. Praia, «La atención a la situación del mundo en la educación científica,» *Enseñanza de las Ciencias*, vol. 22, n° 1, pp. 1-17, 2004.
- [24] M. A. Arrastía Ávila, «Educación Energética de respeto ambiental. Premisa para el desarrollo sostenible,» de Educación enerxética e desenvolvimento sostible, Santiago de Compostela, 2007.
- [25] EPM, «Parque eólico Jepírachi,» 19 Julio 2013. [En línea]. Available: <http://www.epm.com.co/site/Home/Institucional/Nuestrasplantas/Energ%C3%ADa/ParqueE%C3%B3lico.aspx>.

- [26] M. A. Arrastía Ávila, «Algunas ideas sobre los aspectos conceptuales, éticos y metodológicos de la educación energética. Acciones realizadas para lograr la educación energética de la sociedad cubana,» de Educación e Enerxía: Propostas sobre a educación enerxética e o desenvolvemento sostible, Santiago de Compostela, 2005.
- [27] M. A. Arrastía Ávila, «El desarrollo demanda educación energética,» 17 3 2009. [En línea]. Available: http://www.cubaenergia.cu/index.php?option=com_docman&Itemid=5&limitstart=25.
- [28] M. Arrastía Ávila y E. Yanes Blanch, «El programa de capacitación para cuadros y docentes de la Universidad Pedagógica Enrique José Varona,» de Educación, Enerxía e Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2006.
- [29] Colombia Energía, «Colombia, potencia mundial en competitividad energética,» 20 Marzo 2013. [En línea]. Available: <http://www.colombiaenergia.com/node/115>.
- [30] Colombia, una potencia energética, «El Espectador.com,» 26 Marzo 2011. [En línea]. Available: <http://www.elespectador.com/impreso/vivir/articulo-259277-colombia-una-potencia-energetica>.
- [31] J. E. Castro Montaña, «Argumentos para una educación energética en Colombia: Entre lo planetario, lo contextual y la no transferencia,» Revista EDUCyT. Volumen extraordinario, pp. 42-67, 2012.
- [32] J. Medina Bernal, Derecho a la educación, Bogotá: Ántropos, 2006.
- [33] E. Zuleta, Educación y democracia: Un campo de combate, Bogotá: Omegalfa, 1985.
- [34] F. Savater, El valor de educar, Madrid: Ariel, 1996.
- [35] C. Morales Crespo y E. Pérez Alí Osmán, «Diplomado en Educación Energética desde las ciencias naturales para profesores de la enseñanza media,» de Educación. Enerxía e Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2006.
- [36] E. R. Avila Guerra, M. Cruz Diéguez y G. A. Núñez Zaldívar, «La Educación Energética para el desarrollo sostenible: Un desafío en el siglo XXI,» Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y la Economía Social-OIDLES, vol. 4, nº 8, pp. 1-10, 2010.
- [37] Brussels Energy Agency, «The persuasive power of children towards energy consumption in the local community,» 17 febrero 2010. [En línea]. Available: <http://www.curbain.be/fee/>.
- [38] O. Rodríguez Villar, «Formación de Valores a través de la Creación de una Cultura de Ahorro de Electricidad,» de Educación e Enerxía Propostas sobre a Educación Enerxética e o Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2005.
- [39] J. Bruner, Realidad mental y mundos posibles, Tercera ed., Madrid: Gedisa, 1988.
- [40] M. Caraballo González y M. Caraballo Arronte, «Propuestas de acciones en educación energética para la preparación de profesores de Pinar del Río,» de Educación Enerxética e Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2007.
- [41] C. M. Morales Crespo, «La educación energética en el componente politécnico de la enseñanza,» de Educación enerxética e desenvolvemento sostible, Santiago de Compostela, 2007.
- [42] J. C. Cacabelos Romero, C. Lema Pérez y J. R. Piñeiro García, «Alrededor de la energía,» de Educación Enerxética e Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2007.
- [43] N. Pupo Lorenzo y E. Pérez Alí Osmán, «La educación de Actitudes de Ahorro de Energía a través de las ciencias naturales,» de Educación e Enerxía propostas sobre a Educación Enerxética e o Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2005.
- [44] F. Ballenilla, P. Gisbert, P. Sempere, R. Martín, M. A. Carballo, A. Vicente, J. A. Guillén y P. Aranda, «La sostenibilidad desde una nueva y urgente perspectiva,» de Educación, Enerxía e Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2006.
- [45] O. Pérez Ruiz, N. Sánchez García, A. F. Villegas Sáenz, T. Sánchez García y E. Pérez Alí Osmán, «Educación energética de los ciudadanos, ¿un capricho o una necesidad?,» de Educación, enerxía e desenvolvemento sostible, Santiago de Compostela, 2006.
- [46] M. A. Fernández Domínguez, «A Enerxía motor do mundo. Actividades Escolares na Asignatura de ciencias do medio ambiente e a saúde”do 2 ciclo do ensino secundario obrigatorio en Galicia (España),» de Educación, Enerxía e Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2006.
- [47] J. Vázquez Conde, «El problema Energético como elemento estructurador de Unidades Temáticas del programa de Física del preuniversitario,» de Educación e Enerxía Propostas sobre a Educación Enerxética e o Desenvolvementos Sostible, Santiago de Compostela, 2005.

- [48] F. Tula Molina, «Consumo tecnológico y educación tecnológica: fundamentos filosóficos para un proyecto futuro,» *Sociologías*, vol. 13, n° 26, pp. 154-175, 2011.
- [49] M. Gordillo y J. C. González Galbarte, «Reflexiones sobre la educación tecnológica desde el enfoque CTS,» *Revista Iberoamericana de educación*, n° 28, pp. 1-31, 2002.
- [50] L. Sarmiento Anzola, *Vendimia Biopolítica y ecosocialismo*, Bogotá: Ediciones desde abajo, 2002.
- [51] L. Sauve, «Eco-ciencia: Un cruce fructífero entre la educación científica y la educación ambiental,» de Seminario Doctoral: Educación ambiental y ciudadanía, Bogotá, 2011.
- [52] M. Gadotti, *Pedagogía de la Tierra*, Primera ed., México: Siglo veintiuno editores, 2002.
- [53] G. Fourez, *Cómo se elabora el conocimiento. La epistemología desde un enfoque socioconstructivista*, Primera ed., Madrid: Narcea, 2008.
- [54] E. Morín, *Complexidade e transdisciplinariedade: a reforma da universidade e do ensino fundamental*, Natal: EDUFRN, 1999.
- [55] L. Freitas de, E. Morin y B. Nicolescu, «Carta de la Transdisciplinariedad,» de Carta de la Transdisciplinariedad, Arrábida Portugal, 1994.
- [56] J. Cardentey Lorente, J. Pérez López y R. Hernández-Cruz Pérez, «Los principios de la Termodinámica, uno de los soportes de la economía ecológica y el rol de la escuela en su concientización,» *Mendive*, vol. 6, n° 24, pp. 1-6, 2008.
- [57] B. Nicolescu, *La Transdisciplinariedad. Manifiesto*, Paris: Ediciones Du Rocher, 1996.
- [58] P. Freire, *Pedagogía del oprimido*, Decima octava ed., Santiago de Chile: Siglo XXI, 1970.
- [59] P. Freire, *Pedagogía de la autonomía. Saberes necesarios para la práctica educativa*, Primera edición en español ed., México: Siglo XXI Editores, 1997.
- [60] A. Pedrosa y L. Leite, «Problemáticas energéticas e de lixo doméstico em educação científica para todos os cidadãos,» de Educación, Enerxía e Desenvolvemento Sostible, Santiago de Compostela, 2006.
- [61] M. R. Mejía, *Educación(es) en la(s) globalización(es) I*, Bogotá: Ediciones desde abajo, 2006.

Adriana Patricia Gallego Torres

Nació en Chía, Colombia. Es Física de la Universidad Pedagógica Nacional, de Bogotá, Colombia. Obtuvo su título de Maestría en Educación Sociambiental en la Universidad de Valencia, España. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Valencia, España. Se desempeñó como cargo docente en la Conselleria de Educación de las Islas Baleares, España durante 5 años. Posteriormente, ejerció el cargo de docente en la Pontificia Universidad Javeriana de Bogotá. Ha desarrollado varios proyectos de investigación entre los que cabe destacar "Historia Social de la Ciencia en la segunda mitad del siglo XIX", auspiciado por Colciencias.

Actualmente se desempeña como profesora en el área de Investigación en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia, y es directora del grupo de IREC donde realiza estudios sobre Ciencia, Ingeniería y Sociedad, entre otros.

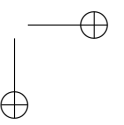
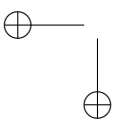
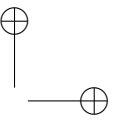
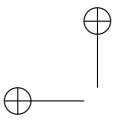
e-mail: adpgallegot@udistrital.edu.co

Jonn Edgar Castro Montaña

Nació en Bogotá, Colombia. Es Físico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá, Colombia. Es candidato a Doctor en Educación en el énfasis de Ciencias en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, de Bogotá, Colombia. Se desempeñó como coordinador Académico en el IEIE en el año 2006. Posteriormente, ejerció el cargo de docente en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Institución donde desarrolló el proyecto Concepciones de Cambio Climático y Calentamiento global.

Actualmente se desempeña como profesor en el área de ciencias en la Universidad Distrital Francisco Josa de Caldas de Bogotá, Colombia, y pertenece como investigador al grupo ENCIMA donde realiza estudios sobre enseñanza de las ciencias y energías alternativas, entre otros.

e-mail: jecm1419@yahoo.com





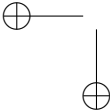
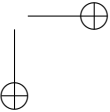
Instrucciones para los Autores

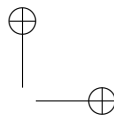
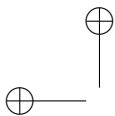
Introducción

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 semestral (dos 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

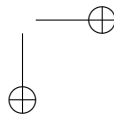
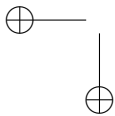
Nota: Enviar los datos de los contactos de los posibles evaluadores (nombre completo, institución y correo electrónico). Esta información también puede ser enviada a la siguiente dirección electrónica revista_ing@udistrital.edu.co

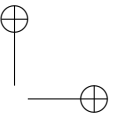
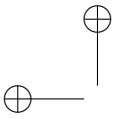
- En caso de ser aceptado, los autores del artículo se comprometen a diligenciar el formato de cesión de derechos para publicación. Se puede descargar en el siguiente enlace:
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/pages/view/Formatos>

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.

