

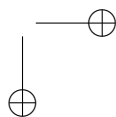
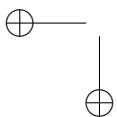
UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

# REVISTA Ingeniería

Volumen 24 • Número 1 • ISSN 0121-750X • E-ISSN 23448393

REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL

# 2019



# REVISTA Ingeniería

Volumen 24 · Número 1 · Año 2019 · ISSN 0121-750X · E-ISSN 2344-8393

## REVISTA CIENTÍFICA CUATRIMESTRAL



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

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

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

## POSTURA EDITORIAL Y AUDIENCIA

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

## EDITOR

**Nelson L. Díaz, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

## COMITÉ EDITORIAL

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

**Alonso Salvador Sanchez, PhD.**  
Universidad de Alcalá,  
España

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

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

**César Leonardo Trujillo Rodríguez, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Josep M. Guerrero, PhD.**  
Aalborg University, Dinamarca

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

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

**Carlos Eduardo Moreno, PhD.**  
Universidad Nacional de  
Colombia

**Víctor Hugo Grisales, PhD.**  
Universidad Nacional de  
Colombia

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

## COMITÉ CIENTÍFICO

**Germán Jairo Hernández, PhD.**  
Universidad Nacional  
de Colombia

**Pablo Gaona García, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Gustavo Puerto Leguizamón, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Elvis Eduardo Gaona García, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

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

**Francisco Santamaría Piedrahita, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

**Diego Rodríguez Patarroyo, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco  
José de Caldas, Colombia

## DIRECTIVAS

**Ricardo García Duarte**  
Rector

**Giovanny Tarazona Bermúdez, PhD.**  
Director Centro de Investigación  
y Desarrollo Científico

**Julio Barón Velandía, PhD.**  
Decano de la Facultad de Ingeniería

## PREPARACIÓN EDITORIAL

**Carolina Suárez R., MSc.**  
Gestora Editorial

**Jenny Alexandra Jimenez, MSc.**  
Corrección de Estilo

**Julian Arcila-Forero, MSc.**  
Diagramación **L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X**

**Imagen Editorial**  
Impresión

## ÁRBITROS EN ESTA EDICIÓN

**Gilberto Carrillo, MSc.**  
Universidad Don Bosco. El Salvador.

**Ivonne Castiblanco, MSc.**  
Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Colombia.

**Carmen Ynzunza Cortés, PhD.**  
Universidad Tecnológica de Querétaro. México.

**Diana Ovalle Martínez, PhD.**  
Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Colombia.

**José Guarnizo Marín, PhD.**  
Universidad Santo Tomás. Colombia.

**Fredy Mesa Rodríguez, PhD.**  
Universidad del Rosario. Colombia.

**Carlos Arredondo, PhD.**  
Universidad de Medellín. Colombia.

**Lexuan Meng, PhD.**  
Universidad de Aalborg. Dinamarca.

## PERMISO DE REPRODUCCIÓN

### Open access



Los artículos incluidos en esta edición se encuentran bajo la licencia "Atribución - No Comercial - Compartir igual": esta licencia permite a otros distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir de tu obra de modo no comercial, siempre y cuando te den crédito y licencien sus nuevas creaciones bajo las mismas condiciones.

Atribución - No Comercial - Compartir igual.

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/co/>

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.

## COSTO DE PROCESAMIENTO DE ARTÍCULOS

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

## INDIZADA EN

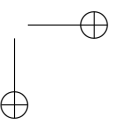
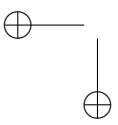
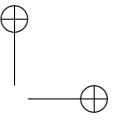
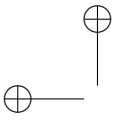


## CARÁTULA

La portada está inspirada en la temática de los artículos de la presente edición, relacionando El papel de la ingeniería en su visión y marco para el desarrollo, implementación y aplicación de nuevas formas de generación de energía, a partir del uso de recursos naturales renovables.

### Idea creativa y Diseño Gráfico:

Carolina Suárez R. y Liliانا Valencia Leal



## TABLE OF CONTENTS

### Editorial

- The Role of Renewable Energies in the Microgrids** 4  
*El Rol de las Energías Renovables en las Microrredes*  
Nelson Leonardo Díaz A.

### Industrial Engineering

- Industry 4.0 and Digital Manufacturing: a Design Method Applying Reverse Engineering** 6  
*Industria 4.0 y Manufactura Digital: un Método de Diseño Aplicando Ingeniería Inversa*  
Jorge Carro Suárez · Fabiola Flores Salazar · Irma Flores Nava · Ramón Hernández Hernández

### Electrical and Electronic Engineering

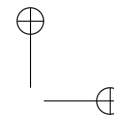
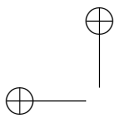
- Liquid Level Monitoring System in Big Deposits** 29  
*Sistema de Monitoreo de Nivel de Líquido en Grandes Depósitos*  
Reinier Quiala Llorens · Ailén Pérez Molinet · Fidel Ernesto Hernández Montero

### Special Number Renewable Energy Sources, Systems and Integration

- Comparative Analysis of the Performance of Mono-crystalline and Polycrystalline PV modules in weather conditions of Fusagasugá** 49  
*Análisis Comparativo del Rendimiento de los Módulos Fotovoltaicos Monocristalino y Policristalino bajo Condiciones Climáticas de Fusagasugá*  
Yimy E. García Vera · Luisa F. Sanabria Pérez · Luz A. Cruz Pardo · Carlos H. Montufar Benavides

- Optimized Hierarchical Control for an AC Microgrid Under Attack** 64  
*Control Jerárquico Optimizado para una Microrred de CA Bajo Ataque*  
Vladimir Toro · Eder David Baron · Eduardo Mojica-Nava

- Instructions for Authors** 83



## The Role of Renewable Energies in the Microgrids

### El Rol de las Energías Renovables en las Microrredes

El creciente consumo energético, sumado a la preocupación del daño ambiental causado por los convencionales combustibles fósiles, han impulsado el desarrollo de fuentes alternativas de energía que permiten suplir los requerimientos energéticos con un menor impacto ambiental. Como respuesta a dicha situación, han surgido nuevos paradigmas en la forma en que se integran y controlan dichas fuentes de energía renovables, a fin de que el consumidor energético pueda hacer un uso eficiente de la energía generada. Un ejemplo de lo anterior son las microrredes eléctricas, las cuales buscan integrar de manera eficiente los recursos energéticos distribuidos, que pueden ser localizados dentro de un área determinada con el objetivo de suplir un requerimiento energético específico.

Debido a la integración de recursos energéticos distribuidos, las microrredes eléctricas pueden operar de forma independiente y aislada de la red eléctrica convencional o pueden operar de forma interconectada garantizando siempre la confiabilidad del suministro energético para los requerimientos locales. Sin embargo, la tendencia en la operación de las microrredes es reducir la dependencia de la red eléctrica convencional y buscar satisfacer su consumo en base a los recursos energéticos locales. Esto sin duda, redundará en un doble beneficio, primero para el propietario de la microrred, el cual reduce el consumo energético de la red convencional y por ende el valor de las facturas de energía, mientras que por el otro esto se traduce en una menor congestión y saturación de la red eléctrica convencional.

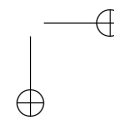
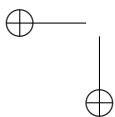
Dicha operación independiente de la red se logra mediante un uso cada día más eficiente de las fuentes de energía renovables. Lo cual se garantiza con una arquitectura de control y gestión adecuada que maximice el uso del recurso energético disponible; además, se deben considerar los desarrollos tecnológicos que permiten hacer una conversión eficiente de la fuente de energía primaria a energía eléctrica.

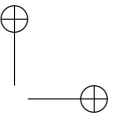
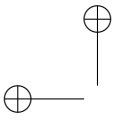
La presente edición de la *REVISTA INGENIERÍA* contiene una edición especial dedicada a las fuentes de energías renovables y su integración. La sección

Open access



Citación: N. Díaz, "El Rol de las Energías Renovables en las Microrredes.", *Ingeniería*, vol. 24, no. 1, pp. 4-5, Jan-Apr 2019.  
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.14416>





---

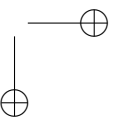
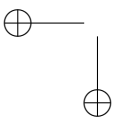
N. Diaz

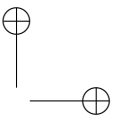
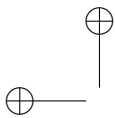
especial la componen dos documentos, el primero orientado a un análisis de la tecnología utilizada por paneles fotovoltaicos y su desempeño ante condiciones de operación ambientales particulares. El segundo documento se enfoca en el control y gestión de microrredes eléctricas optimizando su operación y considerando diferentes escenarios que pueden comprometer su gestión.

Adicionalmente, esta edición la complementan dos documentos, el primero relacionados con manufactura digital empleando proceso de la Industria 4.0; el segundo documento presenta el diseño e implementación de sistemas de control para el almacenamiento de líquido en grandes depósitos.

**Nelson Leonardo Diaz A., PhD.**

**Editor Revista *INGENIERÍA***





Research

## Industry 4.0 and Digital Manufacturing: a Design Method Applying Reverse Engineering

*Industria 4.0 y Manufactura Digital: un Método de Diseño Aplicando Ingeniería Inversa*

**Jorge Carro Suárez<sup>1</sup> Fabiola Flores Salazar<sup>1</sup> Irma Flores Nava<sup>1</sup> Ramón Hernández Hernández<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad Politécnica de Tlaxcala  
correspondence: jorge.carro@uptlax.edu.mx

Recibido: 14/09/2018. Modificado: 30/11/2018. Aceptado: 30/01/2019.

### Abstract

**Context:** This research presents a review of literature and current state of the Industry 4.0 and Reverse Engineering process with the aim of proposing a design method for the digitization and manufacturing of 3D parts through the use of Digital Manufacturing.

**Method:** A theoretical and systematic review about Industry 4.0 and Reverse Engineering is carried out to determine the relationship between them. Subsequently, several published design methods are analyzed to select one as a reference. Finally, according to the results obtained from the theoretical analysis a proposal of the design method to perform the digitization and manufacture of a 3D piece. The application of the proposed method is validated with the digitalization of one piece and its 3D modeling and printing.

**Results:** We identified that the relationship between Industry 4.0 and Reverse Engineering is the Additive Manufacturing and that the ideal design method for the development of the research is the Archer's model through the perspective of Liu & Boyle, since the proposed model will focus on designer through a process of digitalization. Finally, its application demonstrates its relevance, considering that nowadays the Digital Manufacturing must be a determinant component for Industry 4.0

**Conclusions:** The conditions, particularities and operating costs of the new processes applied by Industry 4.0 imply the need to consider new models to generate benefits for companies in order to become more competitive, profitable and sustainable companies on a global scale. In this context, Digital Manufacturing is presented as an alternative design, which although it has been applied for years, it has not been recognized as a new technological trend, so its inclusion on Industry 4.0 is relevant and necessary.

**Keywords:** Reverse Engineering, Industry 4.0, Digitization, Manufacturing, Laser scanner.

**Language:** Spanish

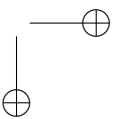
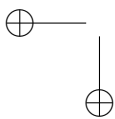
Open access



Cite this paper as: J. Carro ; F. Flores; I. Flores and R. Hernández. "Industria 4.0 y Manufactura Digital: un Método de Diseño Aplicando Ingeniería Inversa", Ingeniería, vol. 24, no.1, pp. 6-28, Jan. - Apr. 2019.

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

DOI:<https://doi.org/10.14483/23448393.13821>



### Resumen

**Contexto:** Para la presente investigación se revisó la literatura y actualidad sobre industria 4.0 e Ingeniería Inversa con el objetivo de proponer un método de diseño para la digitalización y fabricación de piezas en 3D a través del uso de Manufactura Digital.

**Método:** Se realiza una revisión teórica y sistemática sobre Industria 4.0 e Ingeniería Inversa para determinar la relación entre ambos conceptos; posteriormente, se analizan diversos métodos de diseño publicados para seleccionar uno como referencia y finalmente, de los resultados obtenidos del análisis teórico, se presenta una propuesta de método de diseño para realizar la digitalización y manufactura de una pieza 3D. Como comprobación, el método se aplica en la captura, modelado e impresión 3D de una pieza.

**Resultados:** Se encuentra que el punto de relación entre Industria 4.0 e Ingeniería Inversa es la Manufactura Aditiva y que el método de diseño ideal para el desarrollo de la investigación es el de Archer a través de las perspectivas de Liu y Boyle, ya que el modelo propuesto se enfocará en el criterio del diseñador a través de un proceso de digitalización. Finalmente, su aplicación demuestra la relevancia de considerar a la Manufactura Digital como un componente determinante para la Industria 4.0 en la actualidad.

**Conclusiones:** Las condiciones, particularidades y costos de los nuevos procesos aplicados por la Industria 4.0 hacen necesario que se planteen nuevos modelos que generen beneficios a las empresas para ser más competitivas, rentables y sustentables; en este contexto, la Manufactura Digital se presenta como una alternativa de diseño, que a pesar de que lleva años siendo aplicada, no ha sido reconocida como una nueva tendencia tecnológica, por lo que su inclusión en la Industria 4.0 es pertinente y necesaria

**Palabras clave:** Digitalización, Escáner láser, Industria 4.0, Ingeniería inversa.

**Idioma:** Español

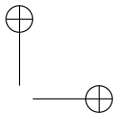
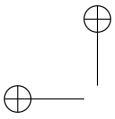
## 1. Introducción

La creciente demanda mundial de recursos naturales, además de los desafíos inherentes que la acompañan, plantean un gran reto para las empresas de manufactura; las nuevas tecnologías y un cambio demográfico de la fuerza de trabajo, así como el deseo de nuevos productos individualizados hacen que la fabricación sea más desafiante que nunca [1]. Es claro que hoy en día, implementar sistemas de gestión de la calidad ya no es suficiente para impulsar la competitividad de las empresas, es imperioso desarrollar procesos y productos innovadores basados en nuevas tecnologías, los cuales den a las compañías el soporte para adaptarse y superar los cambios a través de negocios más competitivos y de mejores procesos tecnológicos [2].

Asimismo, el futuro de la industria está siendo moldeado por megatendencias como el cambio demográfico, la globalización, la escasez de recursos, el cambio climático, las tecnologías e innovaciones dinámicas y la personalización masiva [3], esto ha llevado a que las empresas estén cambiando actualmente de la producción en masa a la producción personalizada, lo que ha derivado en la necesidad de implementar nuevos procesos de producción como la digitalización y la manufactura inteligente [4], siendo ambos conceptos parte de lo que en la actualidad se conoce como industria 4.0, y que en muchos países ya se identifica como la “cuarta revolución industrial” [5].

Los conceptos de industria 4.0, digitalización y manufactura inteligente contemplan la introducción de tecnologías digitales en la industria de la fabricación [6], los cuales requieren nuevas alter-





nativas de diseño que permitan la creación y análisis de productos y procesos a través de prototipos virtuales [7]; en este contexto, en los últimos años se ha venido desarrollando una nueva área del conocimiento que contempla tanto a la digitalización como a la manufactura inteligente, se hace referencia a la ingeniería inversa (RE, por sus siglas en inglés), un método válido para la creación o recreación de nuevos productos a partir de productos existentes y a veces obsoletos, con el fin de determinar sus características, funciones, detalles de diseño, construcción y operación para reproducirlos y en lo posible mejorarlos [8]. No obstante, su aplicación muchas veces requiere equipamiento de alto costo, lo que ha llevado a que su adopción sea mínima, especialmente, para las pequeñas y medianas empresas [9].

Con base en lo anterior, el objetivo de la presente investigación es proponer un método de diseño para la digitalización y manufactura de una pieza 3D aplicando el concepto de ingeniería inversa hacia los principios de la industria 4.0, aplicando manufactura digital, y definiéndola como un proceso de fabricación que crea piezas físicas directamente de archivos de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés) 3D o archivos de datos utilizando maquinaria controlada por un ordenador con una mínima intervención humana y cuya manufactura puede ser aditiva o sustractiva [10].

Para tal fin, se inició con la revisión de la literatura, antecedentes y actualidad de la industria 4.0, así como de ingeniería inversa para determinar sus puntos de relación; posteriormente, se analizaron diversos modelos de diseño publicados y reconocidos para determinar sus principales características y seleccionar el más apropiado para generar una propuesta de diseño aplicando manufactura digital.

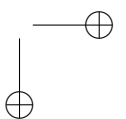
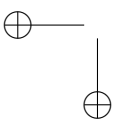
En la segunda sección se presenta la metodología de la investigación; en la tercera se presentan y se someten a un espacio de discusión los resultados del análisis teórico, la propuesta del modelo de diseño y su aplicación a través de la digitalización, modelado y manufactura de una pieza por medio de impresión 3D; las conclusiones y trabajos a futuro se presentan en la cuarta y quinta sección respectivamente.

## 2. Revisión de la literatura, antecedentes y situación actual

### 2.1. Industria 4.0

El concepto industria 4.0 nace en Hannover Alemania hacia el 2011, con el objetivo de promover la manufactura computarizada impulsada por el asombroso aumento de la capacidad computacional y de conectividad, la aparición de nuevas capacidades analíticas y de inteligencia empresarial, nuevas formas de interacción hombre-máquina, como las pantallas táctiles y sistemas de realidad aumentada, además de notables mejoras en la transferencia de instrucciones digitales al mundo físico como la robótica y la impresión 3D [11].

Sus cuatro principales impulsores son el Internet de las cosas, el Internet Industrial, la fabricación basada en la nube y la manufactura inteligente, puntos relevantes que comparten la visión de una futura producción digitalizada [12]; no obstante que la mayoría de estas tecnologías digitales se



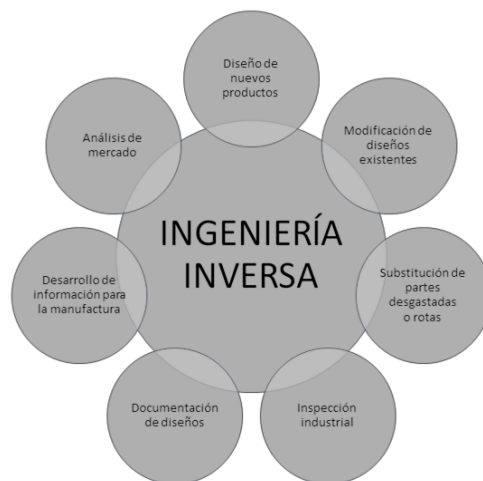
han estado gestando durante algún tiempo, muchas empresas aún no están listas para su aplicación a escala. Dichas tecnologías ahora se encuentran en un punto en el que por su mayor confiabilidad y menor costo están comenzando a tener sentido para las aplicaciones industriales [13].

En este contexto, se describen nueve tendencias tecnológicas (pilares) que están construyendo las bases de la industria 4.0 y que exploran su potencial técnico y sus beneficios económicos para potenciar los procesos de manufactura en las empresas [14]. En la Tabla I se presentan cada uno de ellos con su respectiva definición.

Todos estos pilares se aplican no solo en la industria, sino en todo tipo de organizaciones; por lo tanto, se está frente a una revolución digital más que industrial. Si a esto se le añade la hiperconectividad de las redes, los avances científicos en bio, nano o nuevos materiales y la globalización, se estará frente a una transformación de la economía y ante un cambio mucho mayor que el de las revoluciones industriales previas [9].

## 2.2. Ingeniería inversa

La ingeniería inversa tiene como objetivo principal identificar las características y funciones de un proceso, sistema o componente para reproducirlo [20]; asimismo, es utilizada como una metodología de rediseño que busca ser aplicada en productos ya existentes [21]. Para el caso de componentes mecánicos, la ingeniería inversa es ideal para recabar información a partir de un modelo físico sin la necesidad de usar documentación gráfica o digital, incluso, es muy útil para el duplicado de partes en los procesos de fabricación o para la recuperación de información que se ha perdido por fracturas o desgaste de las piezas a fabricar. En sí, la sustitución de partes o el copiado y reproducción de sistemas a partir de un modelo de referencia son solo algunas de sus más conocidas aplicaciones [7]. Borja-Ramírez [22] planteó un modelo con factores de aplicación de ingeniería inversa en el sector industrial, el cual se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Factores de aplicación de ingeniería inversa en la industria. Fuente: elaboración propia con base en [22].

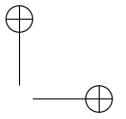
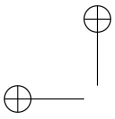
**Tabla I.** Pilares de la Industria 4.0

Pilar	Definición
<b>Big Data</b>	Constituye la recopilación y evaluación exhaustiva de datos de diferentes fuentes, equipos y sistemas de producción, así como de sistemas empresariales y gestión de clientes, para convertirlos en estándares y respaldar la toma de decisiones en tiempo real [14]. En la actualidad, el sector empresarial presenta gran desconocimiento sobre lo que significa Big Data; hoy las compañías no saben qué hacer con el gran volumen de datos e información almacenada en diferentes medios o bases de datos, los cuales pueden ser de gran importancia, principalmente en la toma de decisiones [15].
<b>Robots Autónomos</b>	Una parte esencial de industria 4.0 son los métodos de producción autónomos impulsados por robots que pueden completar las tareas de forma inteligente, con un enfoque en la seguridad, flexibilidad, versatilidad y colaboración. Sin la necesidad de aislar su área de trabajo, su integración en el proceso lo vuelve más económico y productivo, abriendo muchas aplicaciones posibles en las industrias. Los robots industriales están evolucionando para facilitar la cuarta revolución industrial, por lo que a futuro reemplazarán a los humanos en los flujos de trabajo dentro de áreas cerradas. En industria 4.0, los robots y los humanos trabajarán codo a codo, por así decirlo, en tareas de interconexión y utilizando interfaces inteligentes de sensores hombre-máquina [16]. Actualmente, los robots se vuelven más autónomos, flexibles y cooperativos día a día, y con seguridad interactuarán entre sí, trabajarán de forma segura al lado de los humanos, incluso, aprendiendo de ellos [14].
<b>Simulación</b>	Las simulaciones se usarán más extensivamente en las operaciones de la planta para aprovechar los datos en tiempo real y reflejar el mundo físico en un modelo virtual, este puede incluir máquinas, productos y humanos, reduciendo los tiempos de configuración de la maquinaria y aumentando su productividad [14]. En este contexto, el Diseño e Ingeniería Asistida por Computadora se han convertido en una herramienta útil no sólo para realizar cálculos, estudios y simulaciones, sino también para optimizar el tiempo y los recursos durante la etapa de diseño, siendo una técnica de análisis que permite crear y simular en un modelo virtual del comportamiento de un producto o proceso antes de su fabricación o implementación [7].
<b>Integración de sistemas</b>	El principio de la industria 4.0 se resume esencialmente en tres dimensiones de integración: integración horizontal en toda la red de creación de valor, ingeniería de extremo a extremo a lo largo de todo el ciclo de vida del producto e integración vertical y sistemas de manufactura en red [17].
<b>Internet industrial de las cosas</b>	Internet de las cosas significa una red mundial de objetos direccionados e interconectados entre sí, los cuales se comunican a través de protocolos estándar [18]. Este pilar aporta beneficios a lo largo de cuatro áreas clave: (a) aumento de eficiencia, mediante la captura de una mayor cantidad de datos de procesos y productos mediante el uso de tecnología como sensores; (b) nuevos modelos de negocios, que permiten la automatización de algunos procesos mejorando los tiempos de lanzamiento al mercado y respondiendo velozmente a las necesidades del cliente; (c) nuevos canales de ingresos, ayudando a monetizar los servicios adicionales en los productos existentes; (d) gestión de riesgos y cumplimiento de regulaciones de seguridad donde la maquinaria puede aprender a monitorear y auditar el cumplimiento de procedimientos, avisando de irregularidades e inconvenientes mucho más rápido que el ser humano [19].
<b>Ciberseguridad</b>	Muchas empresas aún confían en los sistemas de gestión y producción que no están conectados. Con la mayor conectividad y el uso de protocolos de comunicaciones estándar que vienen con industria 4.0, la necesidad de proteger los sistemas industriales críticos, así como las líneas de fabricación de las amenazas de ciberseguridad han aumentado drásticamente, como resultado, las comunicaciones seguras y confiables, así como la administración sofisticada de identidades y accesos de maquinaria y usuarios son esenciales en los nuevos procesos [14].

<b>La nube</b>	En un mundo cada vez más competitivo, las organizaciones necesitan un mayor intercambio de datos entre sitios y empresas, es decir, lograr los tiempos de reacción en milisegundos [14]. Con el uso de la nube, es posible disponer de computadoras y servidores de forma virtual, es decir, en lugar de tenerlos físicamente solo se reciben servicios de almacenamiento, acceso y uso de recursos informáticos que están en la red, por lo que es posible conectarse desde cualquier lugar con diferentes dispositivos y compartir documentos e información con terceros [9].
<b>Manufactura Aditiva</b>	En los últimos años, las compañías han empezado a adoptar la manufactura aditiva o impresión 3D, con la cual, son capaces de diseñar y fabricar sus propios prototipos o producir sus componentes individuales. Con la industria 4.0, este pilar será ampliamente usado para producir pequeños lotes de productos personalizados que ofrecerán ventajas tales como diseños más ligeros con mayor rendimiento, ideales para la industria aeroespacial y automotriz [14]; no obstante, para la manufactura aditiva es imprescindible contar con un sistema de escáner para obtener un modelo 3D digital [9].
<b>Realidad aumentada/virtual</b>	Consiste en la mezcla de contenido digital con contenido físico para construir una realidad mixta en tiempo real [9]. Los sistemas basados en la realidad aumentada admiten una variedad de servicios, como la selección de piezas en un almacén y el envío de instrucciones de reparación a través de dispositivos móviles. La industria puede utilizar la realidad aumentada para proporcionar a los trabajadores información en tiempo real para mejorar la toma de decisiones y los procedimientos de trabajo; los trabajadores pueden recibir instrucciones de reparación sobre cómo reemplazar una pieza en particular en tanto, que están viendo el sistema real que necesita reparación [14].

De la figura 1 se define lo expresado a continuación [22].

- **Diseño de productos nuevos:** el proceso de diseño de algunos productos, inicia con prototipos o modelos físicos. La ingeniería inversa es usada para representar el prototipo con un modelo de información computacional, mejorar u optimizar el diseño con sistemas de CAD y fabricar un producto con equipo de manufactura asistida por computadora (CAM, por sus siglas en inglés) usando el modelo CAD.
- **Modificación de diseños existentes:** los sistemas de ingeniería asistida por computadora (CAE, por sus siglas en inglés) ofrecen muchas ventajas para modificar diseños cuando se requieren realizar pruebas de comportamiento físico del prototipo, como es el análisis de esfuerzos estáticos, dinámicos e impacto.
- **Substitución de partes desgastadas o rotas:** cuando una parte única se desgasta o rompe y no se cuenta con planos, es posible manufacturar una copia usando su modelo CAD.
- **Inspección industrial:** una alternativa para verificar las partes mecánicas es comparar sus dimensiones físicas con el modelo CAD, el modelo puede ser obtenido por medio de reconstrucción de imágenes parciales y ser empleado sin alterar el diseño, inspeccionarlo o documentarlo.
- **Documentación de diseño:** los productos diseñados por medio de sistemas CAD son frecuentemente modificados durante la etapa de producción para ajustar detalles o hacer mejoras. La documentación (planos) del modelo CAD puede ser actualizada para que corresponda al resultado final en cualquier momento.



- Desarrollo de información para la manufactura: a partir de la información extraída de un producto, es posible generar la trayectoria de herramientas en Control Numérico Computarizado (CNC) o información a través de archivos STL (*STereo Lithograpy*).
- Análisis de mercado: la realización de modelos CAD implica un análisis detallado del producto. Si se hace el análisis de varios diseños, de diferentes fabricantes, es posible, mediante estudios específicos, identificar las mejores ideas y tecnologías usadas por otros.

Actualmente existen varias técnicas de innovación para el diseño aplicando ingeniería inversa, entre las que destacan la digitalización y la rapidez de diseño en el prototipo [23]. En la primera es posible transferir superficies reales hacia un formato digital, por lo que el principio de digitalización se da a través de una nube de puntos obtenida por un proceso de escaneado; dicha nube es la base para capturar y modelar la pieza en CAD donde se perfecciona con base en los datos originales, esto es, modelado sólido basado en características [24]. Con respecto a la segunda técnica, esta se fundamenta en CAM, permite visualizar el proceso de fabricación de la pieza de acuerdo con los resultados obtenidos por el proceso de escaneado y modelado en CAD.

En los últimos años, las grandes empresas están invirtiendo en ingeniería inversa para incrementar su competitividad y reducir el tiempo requerido para la creación de prototipos y para la producción real de productos. Hay muchas razones para usar ingeniería inversa, el criterio base para su elección como método de creación es la ausencia de un modelo CAD 3D digital, por lo que las posibilidades de su aplicación aumentan paralelamente con el desarrollo de *hardware* y *software* que se utiliza para la creación y el diseño de productos, un ejemplo de estas aplicaciones son la digitalización de productos reales, modelado en CAD para la comparación de productos producidos o la configuración de la máquina mediante sistemas CAM después de la medición digital [23].

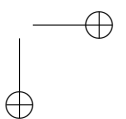
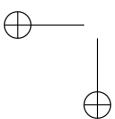
En su proceso, algunos sistemas usan cámaras ópticas para realizar el escaneado [25]–[27]; sin embargo, no son precisas para obtener información sobre profundidad y textura de los objetos o de los ambientes sometidos a estudio [28], por lo que para obtener estos datos se ha observado que los sistemas escáner por dispositivo láser son la mejor opción en tanto que son capaces de generar información con una alta precisión en lo que concierne a profundidad y textura [29], [30].

### 2.3. Métodos de diseño

Tradicionalmente, las actividades de diseño y manufactura han estado unidas, no existía una actividad previa de dibujo o bosquejo antes de la fabricación; en la actualidad estas dos actividades se realizan de forma separada y es necesario un diseño previo para comenzar la fabricación [31].

Este principio ha derivado en la necesidad de contar con metodologías que sirvan como guías para el desarrollo de procesos y productos. Desde los principios de Asimov en 1962, los métodos de diseño han realizado esta función; sin embargo, a través del tiempo han evolucionado sus tendencias adaptándose a las necesidades de cada época y sociedad. En la Tabla II se muestra cómo se ha desarrollado esta evolución, presentando los puntos importantes en el proceso de cada método de diseño para su análisis.

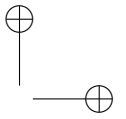
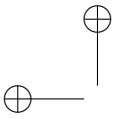
Al analizar cada uno de los métodos de diseño presentados en la tabla anterior, se observa que a pesar de las diferencias que existen entre ellos también se explicitan coincidencias que los llevan a



**Tabla II.** Evolución en el proceso de los métodos de diseño.

Método de diseño representativos	Proceso	
<b>Asimov, 1962</b>	1) Necesidad 2) Estudio de factibilidad 3) Estudio de factibilidad 4) Proyecto detallado 5) Proyecto detallado	6) Planeación de la distribución 7) Planeación del consumo 8) Planeación del retiro
<b>Diseño total Pugh, 1990</b>	1) Necesidad del mercado 2) Especificaciones de diseño 3) Diseño conceptual	4) Diseño de detalle 5) Manufactura del producto 6) Venta del producto
<b>Cross, 1994</b>	1) Exploración 2) Generación 3) Evaluación 4) Evaluación	
<b>Diseño para nuestra realidad Milani, 1997</b>	1) Establecimiento de la necesidad 2) Aceptación del problema 3) Descripción 4) Descripción 5) Concepción del sistema 6) Estudio de factibilidad	7) Formación completa del sistema 8) Diseño de detalles 9) Fabricación y ensayos de prototipos 10) Evaluación final 11) Operación y mantenimiento
<b>Archer, 1999</b>	1) Problema 2) Programación 3) Obtención de información 4) Análisis	5) Síntesis 6) Desarrollo 7) Comunicación 8) Solución
<b>Shigley y Mischke, 2002</b>	1) Reconocimiento de la necesidad 2) Definición del problema 3) Síntesis	4) Análisis y optimización 5) Evaluación 6) Presentación
<b>Hernandis, 2003</b>	1) Diseño estratégico 2) Diseño conceptual 3) Diseño de detalles 4) Simulación 5) Validación	
<b>Dim, 2006</b>	1) Validación 2) Necesidades 3) Diseño conceptual 4) Diseño preliminar	5) Diseño detallado 6) Comunicación Fabricación
<b>Mott, 2006</b>	1) Definir especificaciones 2) Crear los conceptos de diseño 3) Toma de decisiones 4) Diseño detallado	
<b>Pahl, Beitz, Feldhusen y Grote, 2011</b>	1) Planeación y clasificación de tareas. 2) Diseño conceptual.	3) Encarnación del diseño 4) Detallado del diseño.
<b>Diseño Paramétrico para la creación de productos, 2014</b>	1) Idea abstracta 2) Condiciones geométricas y matemáticas. 3) Selección de parámetros.	4) Programación del proceso. 5) Comparación de resultados.

Fuente: elaboración propia con base en [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37].



compartir etapas comunes, es el caso de las necesidades, las etapas conceptuales y alternativas de soluciones, donde la creatividad es la principal protagonista; no obstante, los esfuerzos en la investigación sobre la ingeniería del diseño han cambiado recientemente, considerando ahora tres puntos de vista, el del cliente, el del diseñador y el de la comunidad, con un anexo extra que son los apartados especiales [38], [39], las necesidades del mercado [40] y las nuevas tendencias de la era digital [37].

En el primer punto de vista se enfatiza que la visión del cliente se hace necesaria debido a la gran competencia presente en los mercados, la cual, cada vez está más saturada de productos similares en el que el cliente posee un alto poder de decisión. Aquí los focos de acción se deben centrar en la gestión de las necesidades, el diseño para la estética y en la ergonomía. Dentro de esta vertiente se presentan métodos como de diseño axiomático de Shu, método de ingeniería Kansei, el modelo transdisciplinario de desarrollo de ciclo de vida del producto de Humus, Ertas, Tate y Cicek, modelo de inteligencia de la estética de Macdonald, modelo de evaluación de ergonomía de Colombo y Cugini [39].

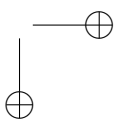
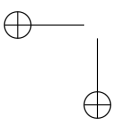
Desde la perspectiva del diseñador, los focos de acción se deben centrar en el diseño para la robustez, la optimización, flexibilidad y cognición del diseño, lo que representa la capacidad del experto para entender, razonar e implementar un pensamiento inteligente de diseño. Se destacan métodos como el de diseño robusto de Taguchi, montajes inteligentes de Downey, sistemas robustos basado en el modelado de sistemas de Zakarian y la matriz de estructura de diseño de Yassine, el proceso de diseño creativo de Howard, el método TRIZ para la resolución de problemas, la metodología de optimización de diseño por datos de Zhao, Icoz, Jaluria y Knight, el método para el diseño de mecanismos complejos de Kobayashi y el método de evaluación de flexibilidad de un producto de Rajan [40].

En el último punto, desde el punto de vista de la comunidad, se debe prestar atención al ecodiseño, en el que el diseñador debe prestar atención especial al cuidado del medio ambiente y a un diseño apropiado para el desmontaje de los modelos. Modelos como el de manufactura rápida (RM, por sus siglas en inglés), diseño para el medio ambiente (DFE, por sus siglas en inglés) y el diseño para el desensamblaje (DFD, por sus siglas en inglés) son los más destacados en esta vertiente [39].

Como apartados especiales considera los costos de ingeniería, los métodos computacionales aplicados y las plataformas globales para personalizar la producción. En las necesidades del mercado se establece la idea y funcionalidad del producto [40]. En las tendencias de la era digital se resalta la importancia de las ciencias computacionales como una nueva visión de diseño en ambientes virtuales [37].

### 3. Metodología

El desarrollo del presente trabajo se dividió en tres etapas; en la primera se realizó una revisión bibliográfica de la literatura sobre industria 4.0 e ingeniería inversa para determinar sus puntos clave y puntos en común en conjunto con diversos modelos de diseño publicados y reconocidos; en una segunda etapa, y con base en el análisis previo se propone un modelo de diseño que relacione



los factores comunes de industria 4.0 e ingeniería inversa bajo el concepto de manufactura digital; en la última etapa se aplica el método con la digitalización, modelado e impresión de una pieza 3D.

## 4. Resultados y discusión

Con base en el análisis de la literatura se identificó que la industria 4.0 en su pilar manufactura aditiva abarca cuatro técnicas de fabricación rápida, las cuales se muestran en la Figura 2.

La característica común entre las técnicas mostradas en la Figura 2 es el número de fases en su proceso de fabricación, desde el desarrollo de la idea por parte del diseñador hasta la obtención del producto acabado [41].

Con base en este análisis, en la Tabla III se presenta la matriz de relación entre la manufactura aditiva y los factores de aplicación de ingeniería inversa.

La matriz muestra que la manufactura aditiva se relaciona con la ingeniería inversa a través la digitalización para el diseño de prototipos, mejora de productos, análisis y simulación, diseño de información digital y manejo de datos. Se destaca que cualquier técnica de prototipado rápido es reconocida como una nueva técnica de fabricación de elementos, herramientas y moldes, por lo que el personal y los diseñadores deben tener en cuenta que esta nueva posibilidad deriva en una mayor simplicidad de los procesos de montaje y puesta a punto de todos los elementos en su conjunto [41].

Como resultado de este análisis, para la propuesta del método de diseño se tomó como referencia el modelo de Archer y su método sistemático para diseñadores, el cual considera que un proceso de diseño debe contener tres etapas principales: analítica, creativa y de ejecución [34]. Su modelo conceptual se muestra en la Figura 3.

El modelo primero resalta la importancia de identificar el problema, preparar especificaciones y recabar información relevante; posteriormente, determina una fase creativa para analizar propuestas, sintetizar los datos y proponer un prototipo, para finalmente, preparar estudios y simulaciones que conlleven a un producto final.

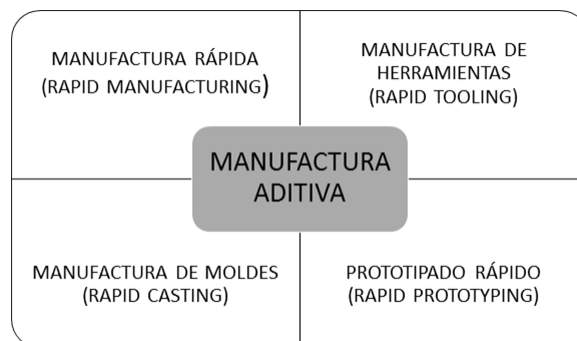


Figura 2. Técnica de aplicación de Manufactura Aditiva. Fuente: elaboración propia con base en [40].

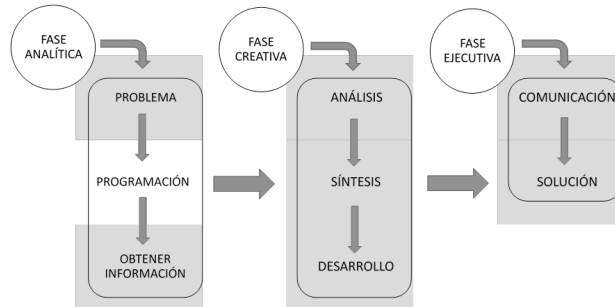


**Tabla III.** Matriz de relación ingeniería inversa-manufactura aditiva. Fuente: elaboración propia.

Factores de aplicación de Ingeniería Inversa	Manufactura Aditiva de Industria 4.0
<b>Diseño de nuevos productos</b>	Los procesos convencionales para el diseño de nuevos componentes se fundamentan en el empleo de recursos con una gran capacidad de elementos de control para alcanzar niveles de precisión y fiabilidad elevados [41], por lo que con el prototipado rápido se obtiene de manera rápida una réplica tridimensional de diseños generados en CAD, con un menor costo, lo cual permite estudios morfológicos y evaluaciones en el proceso en las partes mecánica, estética comercial y operacional [42].
<b>Modificación de diseños existentes</b>	El uso de CAE se ha convertido en una herramienta útil, no solo para realizar cálculos, estudios y simulaciones de modelos y procesos, sino que también es de gran ayuda para optimizar el tiempo y los recursos de diseño, siendo una técnica de análisis que permite simular, analizar y modificar la geometría de un diseño previo o prototipo antes de su fabricación o implementación [7], mediante técnicas de manufactura rápida como lo es la impresión 3D [41].
<b>Substitución de partes desgastadas o rotas</b>	La ventaja de diseñar modelos con base en ingeniería inversa y manufactura aditiva es que no depende de planos o dibujos para su fabricación, ya que estos pueden ser generados o recuperados posteriormente al modelado en CAD de forma digital [7].
<b>Inspección Industrial</b>	La información del acabado superficial, incluida la rugosidad y la textura de la superficie, es importante para identificar el proceso de fabricación original; con base en dicha información y la tolerancia típica de procesos de fabricación similares, se establecen el acabado superficial, la tolerancia dimensional y las restricciones para las características individuales de la pieza deseada [30]. En este contexto, el ciclo de desarrollo de un prototipo que consume varios meses para diseñarlo y fabricarlo se optimiza con la integración de procedimientos avanzados de medición por medio de sistemas escáner con software, el cual utiliza nube de puntos para controlar la calidad de las piezas y herramientas en cada fase de su proceso de fabricación.
<b>Documentación de diseños</b>	El uso de tecnologías CAD y CAE permite que la documentación pueda ser actualizada de forma permanente ante cambios, modificaciones o mejoras de los productos o procesos durante el diseño del prototipo o durante la etapa de producción [22], incluso, en etapas de simulación virtual [7].
<b>Desarrollo de información de manufactura</b>	En la manufactura aditiva, el principal proceso de fabricación es por impresión 3D, el cual requiere la creación de archivos STL con la información digital del modelo [7].

#### 4.1. Método de diseño propuesto

Con base en lo anterior, en la Figura 4 se presenta la propuesta de método de diseño para la manufactura de modelos con un enfoque hacia la industria 4.0 desde la perspectiva del diseñador incorporando el concepto de manufactura digital.



**Figura 3.** Método sistemático para diseñadores de Archer Fuente: elaboración propia con base en [34].

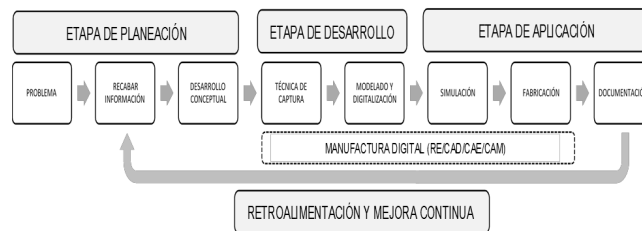
#### 4.1.1. Etapa de planeación

Esta etapa que consta de tres fases equivale al análisis. Se inicia con la formulación e identificación del problema, se determinan las oportunidades que se presentan, su interacción y los obstáculos que impiden su resolución para obtener un escenario de referencia [43]. Los problemas que pueden presentarse son:

- Diseño de un nuevo modelo sin referencias.
- Falta de información para modificar o fabricar un modelo existente (dimensiones, planos, etc.)

Posteriormente, se recaba toda la información posible sobre los requerimientos del proyecto (materiales, usos y posibles aplicaciones, tiempos, técnicas de fabricación), se definen condicionantes y se investiga y analiza la existencia de modelos similares al solicitado para determinar los requerimientos necesarios.

Finalmente, en el desarrollo conceptual, el diseñador analiza la información recabada para llevar a la realidad una idea y proponer soluciones con base en capacidades digitales, ya debe conocer las condicionantes del producto requerido para poder elegir la técnica idónea de captura y fabricación y poder realizar las modificaciones de datos geométricos. En este punto, es importante contar ya con una visión completa del problema presentado y de su posible solución [41].



**Figura 4.** Método de diseño propuesto.

#### 4.1.2. Etapa de desarrollo

La etapa de desarrollo (creativa) se centra en dos fases: la técnica de captura de la geometría y el modelado y digitalización de la información. En la primera fase, el diseñador puede capturar la geometría de un modelo existente a través del uso directo de CAD o por medio del manejo de un dispositivo con la capacidad para capturar la geometría del modelo, comúnmente se utiliza una cámara óptica o un escáner láser. En la primera opción se depende mucho de la información con la que se cuenta (planos). En la segunda opción el resultado depende de la pericia y capacidad para realizar el proceso de escaneado, ya que una captura deficiente podría resultar en superficies inconclusas que paramétricamente no cumplan con todas las características geométricas del modelo. Para subsanar estos detalles, en la fase de modelado se utiliza *software* especializado, el cual permite reparar imperfecciones y suavizar superficies con el fin de corregir y complementar la falta de información digital, así como determinar su precisión con respecto al modelo original; asimismo, es posible rediseñar el modelo aplicando las herramientas básicas de CAD. Para finalizar esta etapa, en el proceso de digitalización, el modelo virtual final se configura para obtener un archivo en formato CAD para su simulación y en formato STL con toda la información necesaria para su fabricación.

#### 4.1.3. Etapa de aplicación

La última etapa especificada como aplicación (ejecución) está conformada por tres fases, primero el modelo obtenido en CAD se somete a un análisis de CAE a través de un estudio de simulación, el cual, dependiendo de las características de uso de la pieza puede ser estático, térmico, pandeo, caída, fatiga o dinámico lineal y no lineal para determinar y predecir su comportamiento con base en su geometría, el material seleccionado y sus propiedades mecánicas.

En la fase de fabricación, si el modelo se fabrica con impresión 3D, se aplicará manufactura aditiva directamente, por lo que solo se debe generar el archivo STL correspondiente. Si es por código CNC o por algún otro proceso que implique sustraer o cambiar la forma del material como moldeo por inyección, forja o conformado, es posible realizar un análisis previo aplicando CAM para su verificación antes de una eventual fabricación, finalizando con la generación de información digital pertinente y necesaria (archivos y carpetas) que servirán de retroalimentación y mejora continua en el caso de que se requiera información o actualización para otros proyectos.

De acuerdo con esta propuesta, la técnica de captura, el modelado y digitalización, simulación y fabricación conforman el concepto de manufactura digital en el método de diseño, siendo un factor relevante en la percepción actual de industria 4.0, la cual se presenta en la Figura 5.

### 4.2. Ejemplo de implementación del método en la realidad

Se plantea el diseño y fabricación de la placa metálica mostrada en la Figura 6. Las fases a seguir de acuerdo con el método propuesto se presentan con detalle a continuación.



Figura 5. Manufactura digital en la industria 4.0.

#### 4.2.1. Planeación

- Problema: se requiere un duplicado de la placa metálica mostrada; sin embargo, no se cuenta con información técnica para su diseño y fabricación.
- Recabar información: el modelo cuenta con geometría compleja. Se requiere que sea más ligero, pero con la capacidad de soportar al menos 100 Kg de carga, por lo que el material propuesto debe ser un plástico con características específicas, el cual será validado por medio de un análisis estático. El proceso ideal de fabricación es por impresión 3D.
- Desarrollo conceptual: se utilizará la técnica de digitalización de Dubravcik y Kender [23] con el objetivo de transferir una superficie real hacia un formato digital por medio de la captura de una nube de puntos, lo anterior utilizando un escáner láser. Para facilitar la captura de la geometría del modelo, se limpió la superficie de la pieza y se colocaron objetivos reflectantes de posicionamiento de 6 mm de diámetro en la cara frontal.

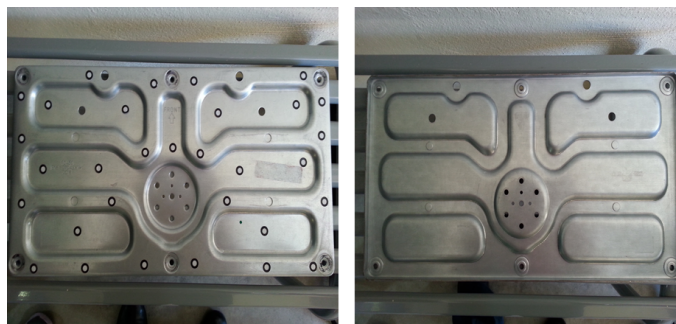


Figura 6. Pieza modelo en sus vistas frontal y posterior.

#### 4.2.2. Desarrollo

- Técnica de captura.

La captura de la geometría del modelo se realiza de forma manual por medio de un escáner *Handy Scan Laser 3D*, con la capacidad de recabar la configuración física del modelo para generar una nube de puntos o mallas relativas a la pieza (*nurbs*). La nube de puntos obtenida y su captura en la plataforma se muestran en la Figura 7. En el modelo se observan imperfecciones, las cuales deben ser corregidas en la siguiente fase.

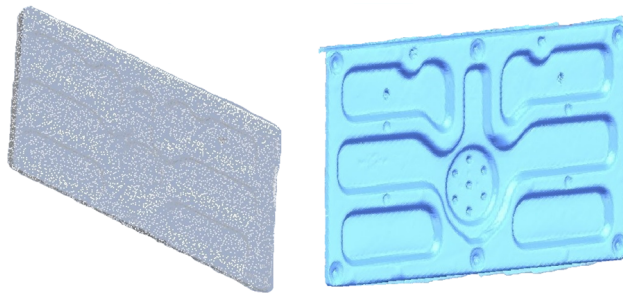


Figura 7. Nube de puntos y modelo capturado.

- Modelado y digitalización.

Para modelar, digitalizar y perfeccionar la pieza en 3D se utiliza *software* especializado en reconstrucción digital, por ejemplo, Rapidform XOR3, el cual contiene una plataforma avanzada para crear sólidos y superficies 3D a partir de datos escaneados, con buenas capacidades en lo que se refiere al modelado basado en características y con la capacidad de generar archivos IGS (siglas del inglés *Initial Graphics Exchange Specification*), desde donde se facilite la exportación del modelo a otra plataforma de CAD para complementar su digitalizado.

Tomando como base la captura realizada, en esta fase el modelo pasa por un proceso de corrección digital. En la Figura 8 se muestra el perfeccionamiento de la *nurb* para su modelado 3D.

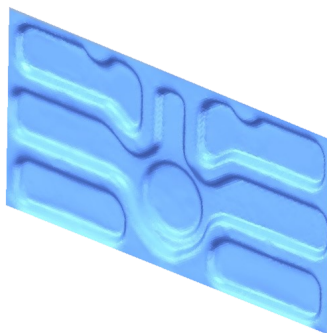


Figura 8. Modelo corregido y suavizado.

La digitalización de la pieza queda completa cuando se pasa de *nurb* a superficie. Posteriormente, se analiza y determina su precisión a través de una muestra de desviación entre la superficie diseñada y la nube de puntos capturada. La Figura 9 muestra el resultado con una precisión establecida de  $\pm 0.1$  mm

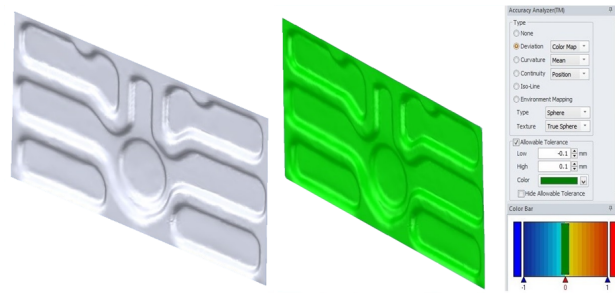


Figura 9. Superficie generada y análisis de desviación.

Se observa que la superficie generada sobre el *nurb* reparado se encuentra dentro de los límites establecidos identificados por un código de colores, lo que garantiza que la superficie creada es aceptable para exportarla, complementarla y detallarla en un entorno de CAD. La Figura 10 muestra ya el resultado final en un ambiente 3D de SolidWorks.

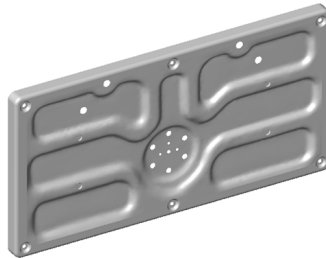


Figura 10. Modelo final en CAD.

#### 4.2.3. Aplicación

- Simulación.

Debido a que los requerimientos son que el material sea más ligero, se utilizará ABS-M30 termoplástico industrial con nivel de producción, el cual se usa principalmente para modelos conceptuales y prototipos funcionales en impresión 3D, pues al ser un material dúctil también es ideal para etapas de pos-proceso (taladros, pintura, etc.) [44]. Posteriormente, el modelo en CAD obtenido se someterá a un análisis estático para determinar su comportamiento.

Este análisis se realizó en SolidWorks Simulation, considerando un espesor de 3 mm en la geometría de la pieza (medida obtenida del modelo original) y estableciendo los puntos de referencia

para las restricciones, como son la geometría fija y la zona donde se aplicará la carga de 100 Kg, que será de forma distribuida. En la Figura 11 y la Figura 12 se presentan ambas configuraciones.

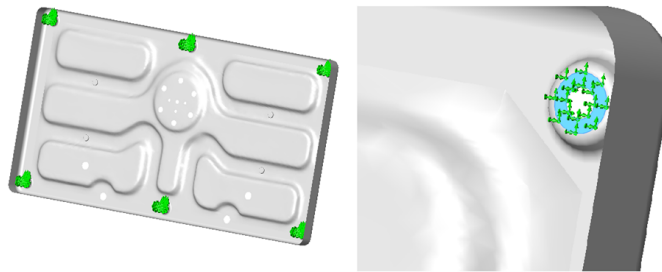


Figura 11. Configuración de la geometría fija.

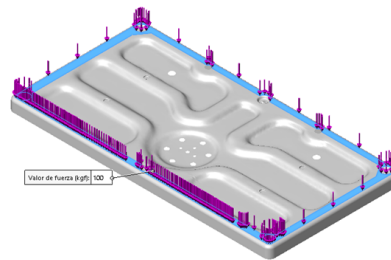


Figura 12. Configuración de la carga aplicada.

El análisis estático comprende los resultados del esfuerzo de von Mises, los desplazamientos y el factor de seguridad, tal como se muestran en la Figura 13, la Figura 14 y la Figura 15 respectivamente.

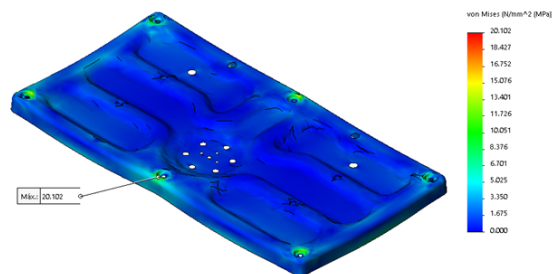


Figura 13. Resultados del esfuerzo de von Mises.

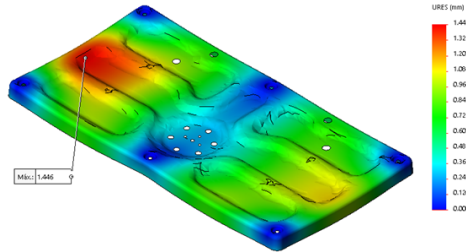


Figura 14. Resultados de desplazamientos.

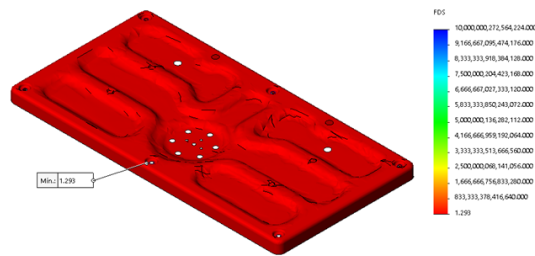


Figura 15. Resultados del factor de seguridad.

Los resultados del análisis estático demuestran que la pieza es segura al presentar un esfuerzo de von Mises menor que el límite elástico del material, lo que se refleja en un factor de seguridad superior a 1.0, que es un indicativo de que el modelo es confiable [35].

- Fabricación.

Con la información obtenida se procede a la impresión del modelo en 3D, esta se llevará a cabo en una impresora Robo R2 tipo FDM, material ABS. El resultado obtenido se muestra en la Figura 16 y la Figura 17.

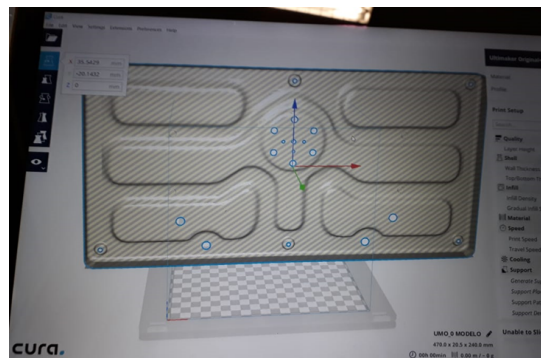


Figura 16. Configuración de la impresora 3D.





**Figura 17.** Modelo impreso.

- Documentación.

Finalmente, la documentación necesaria para una producción eventual del modelo queda determinada y res-guardada en formato digital como se explicita a continuación.

- Formato STL: por si existe la necesidad de modificar la nube de puntos del modelo original.
- Formato IGES: para exportar la información en cualquier plataforma de CAD.
- Formato SLDPRT: formato CAD de SolidWorks para su modelado en 3D.
- Carpeta de simulación: con todos los archivos generados por el estudio estático en SolidWorks Simulation.
- Formato STL: para su impresión 3D.

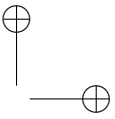
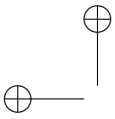
#### **4.2.4. Retroalimentación y mejora continua**

Los resultados obtenidos permitirán obtener una retroalimentación para realizar cambios y mejoras de forma continua durante el desarrollo del método en un caso determinado, generando un ciclo de trabajo hasta llegar a un resultado óptimo y confiable; además, este ciclo de análisis facilitará la toma de decisiones y permitirá identificar riesgos y oportunidades en escenarios futuros, ofreciendo mayores alternativas de diseño y aumentando las opciones de elección.

## **5. Conclusiones**

La manufactura digital lleva más de una década siendo aplicada por las empresas y diseñadores; sin embargo, su desarrollo ha sido aislado e independiente. En el presente trabajo se buscó establecer una relación directa entre sus principales aplicaciones y relacionarlos con la industria 4.0, identificando la importancia que hoy en día tiene para los procesos de fabricación.

Cabe destacar, que aunque la industria 4.0 considera solo a la manufactura aditiva como parte de sus pilares principales, en este trabajo se menciona que la manufactura sustractiva también es



parte inherente de los procesos de fabricación convencionales y que se relaciona directamente con la manufactura digital, por lo que se resalta la propuesta de incorporarla a la industria 4.0 por considerarla viable y pertinente.

A diferencia de los modelos de diseño convencionales, en la propuesta de esta investigación se destaca la aplicación de tecnologías digitales como la ingeniería inversa y los procesos CAD, CAE y CAM, lo que justifica su incorporación a la industria 4.0, cuya principal contribución es la digitalización de los procesos; además, se demuestra que el modelo propuesto tiene aplicaciones reales en el ámbito industrial, específicamente en el área de manufactura, considerando lo presentado en diversos trabajos que han debatido el hecho de que los métodos de diseño teóricos no son aplicados en la práctica profesional y que muchas veces carecen del contexto y aplicabilidad en el mundo real [45], [46].

Asimismo, es importante mencionar que la relevancia del modelo se refleja en que los resultados obtenidos son la propuesta de un modelo pertinente y aplicable en el sector industrial en el área de manufactura, y el reconocimiento de la manufactura digital y sus aplicaciones como parte inherente de la industria 4.0.

Por otra parte, la aplicación de nuevas tecnologías como el uso de escáner láser y de *software* de alto nivel son ejemplos claros de que los métodos de diseño deben evolucionar a la par de la tecnología y considerarla como parte fundamental de nuevos desarrollos industriales; no obstante, aún persisten dos problemas para que las empresas los adopten: el arraigo existente por los métodos convencionales y los altos costos que derivan del uso de nuevas tecnologías. Es necesario dar a conocer a las empresas las ventajas y beneficios de invertir ahora para obtener ventajas competitivas en un mercado cada vez más exigente y competitivo, lo anterior con el fin de alcanzar una mayor rentabilidad en el futuro.

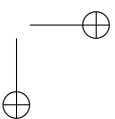
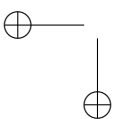
Las empresas deben adaptar su cultura y procesos a las nuevas necesidades de la sociedad y a las nuevas propuestas empresariales, como lo es en la actualidad la industria 4.0, ya que una organización con esta nueva visión sin duda generará valor a largo plazo, se reinventará cuando sea necesario y estará mejor preparada para lidiar con los retos económicos, sociales y ambientales que se vislumbran en el nuevo siglo.

## 6. Trabajo futuro

Los trabajos a futuro considerados para dar seguimiento a la presente investigación estarán alineados al concepto de manufactura digital como factor determinante en la industria 4.0, enfocados en optimizar los costos de los procesos y en ofrecer mayores alternativas de diseño en conjunto con el mejoramiento y actualización continuo en las tecnologías de *software*.

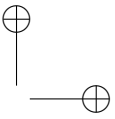
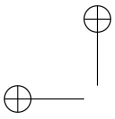
## Referencias

- [1] C. Herrmann, C. Schmidt, D. Kurlle, S. Blume and S. Thiede, "Sustainability in Manufacturing and Factories of the Future", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 1, no. 4,



- pp. 283-292, 2014. <https://doi.org/10.1007/s40684-014-0034-z> ↑7
- [2] S. Sarmiento, "Innovación, un imperativo en las pymes textiles", *Administración Contemporánea. Revista de Investigación*, vol. 7, no. 24, pp. 77-86, 2015. ↑7
- [3] E. Abele and G. Reinhart, *Zukunft der Produktion*. München: Hanser, 2011. <https://doi.org/10.3139/9783446428058> ↑7
- [4] S. Vaidya, P. Ambad and S. Bhosle, "Industry 4.0. A Glimpse", in *2 International Conference on Materials Manufacturing and Design Engineering*, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034> ↑7
- [5] T. K. Sung, "Industry 4.0: A Korea perspective", *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 132, pp. 40-45, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.11.005> ↑7
- [6] C. B. Ynzunza, J. M. Izar, J. G. Bocarando, F. Aguilar and M. Larios, "Implications and Perspectives of Industry 4.0", *Conciencia Tecnológica*, no. 54, 2017. ↑7
- [7] J. Carro, I. Flores and F. Flores, "Ingeniería Inversa e Ingeniería Asistida por Computadora como factores de innovación en los procesos de embutido", *Revista Coloquio de Investigación Multidisciplinaria*, vol. 2, no. 1, pp. 456-464, 2014. ↑8, 9, 10, 16
- [8] C. A. Ospina, *Aplicación de la Ingeniería Inversa en la reproducción de una pieza plástica inyectada*, Tesis de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, 2015. ↑8
- [9] ACAN, "La industria 4.0. Tecnologías habilitadoras". [En línea]. Disponible en: [http://clusterautomocionnavarra.com/wp-content/uploads/2017/10/ACAN-Tecnolog%C3%ADas\\_habilitadoras.pdf](http://clusterautomocionnavarra.com/wp-content/uploads/2017/10/ACAN-Tecnolog%C3%ADas_habilitadoras.pdf) ↑8, 9, 11
- [10] V. Ortega, "Manufactura digital directa". [En línea]. Disponible en: <http://www.usmp.edu.pe/vision2011/exposiciones/5.manufactura%20y%20prototipado.pdf> ↑8
- [11] J. Lee, E. Lapira, B. Bagheri and H. Kao, "Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment", *Manufacturing letters*, vol. 1 no. 1, pp. 38-41, 2013 ↑8
- [12] S. Erol, A. Jäger, P. Hold, K. Ott and W. Sihm, "Tangible Industry 4.0: a scenario-based approach to learning for the future of production", in *6 CIRP Conference on Learning Factories*, 2016. <https://doi.org/10.19053/01211129.3159> ↑8
- [13] C. Baur and D. Wee, "Manufacturing's next act". [En línea]. Disponible en: <https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/manufacturings-next-act> ↑9
- [14] M. Rubmann, M., Lorenz, P. Gerbert, M. Waldner, J. Justus, P. Engel and M. Harnisch, "Industry 4.0: The future of productivity and growth in Manufacturing Industries". [En línea]. Disponible en: [https://www.bcg.com/publications/2015/engineered\\_products\\_project\\_business\\_industry\\_4\\_future\\_productivity\\_growth\\_manufacturing\\_industries.aspx](https://www.bcg.com/publications/2015/engineered_products_project_business_industry_4_future_productivity_growth_manufacturing_industries.aspx) ↑9, 10, 11
- [15] J. J. Camargo-Vega, J. F. Camargo-Ortega and L. Joyanes-Aguilar, "Knowing the Big Data", *Revista Facultad de Ingeniería*, vol. 24, no. 38, pp. 63-77, 2015. <https://doi.org/10.19053/01211129.3159> ↑10
- [16] M. A. K. Bahrin, M. F. Othman, N. H. N. Azli and M. F. Talib, "Industry 4.0: a review on industrial automation and robotic", *Jurnal Teknologi*, vol. 78, no. 6, pp. 137-143, 2016. ↑10
- [17] T. Stock and G. Seliger, "Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0", in *13 Global Conference on Sustainable Manufacturing. Decoupling Growth from Resource Use*, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129> ↑10
- [18] E. Hozdic, "Smart factory for industry 4.0: a review", *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, vol. 7, no. 1, pp. 28-35, 2015. ↑10
- [19] J. Hall, "La internet industrial de las cosas y la industria 4.0 en colada por gravedad". [En línea]. Disponible en: [http://www.cmhmfg.com/pdf/SS\\_2018\\_Spring\\_CMH\\_SP.pdf](http://www.cmhmfg.com/pdf/SS_2018_Spring_CMH_SP.pdf) ↑10
- [20] L. A. García, J. Ruiz, E. Jiménez, L. Reyes, G. Luna, S. R. Ontiveros, V. Rodríguez, F. Ochoa and E. Carrillo, "Clasificación de programas y modelos de la Ingeniería Inversa: aplicaciones a un caso de estudio", in *14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2008. ↑9
- [21] G. Torres, "Ingeniería inversa: una herramienta para la iniciación al diseño", in *V Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica*, 2008. ↑9
- [22] V. Borja-Ramírez, R. Bell, M. López-Parra, S. D. Santillán-Gutiérrez and L. A. González-González, "Estado del arte y tendencias futuras en ingeniería inversa", *Ingeniería Investigación y Tecnología*, vol. 1, no. 2, pp. 51-58, 1999. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.1999.01n2.007> ↑9, 11, 16
- [23] M. Dúbravčík and S. Kender, "Application of reverse techniques in mechanics system services", *Procedia Engineering*, vol. 48, pp. 96-104, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.491> ↑12, 19
- [24] K. Chang and Ch. Chen, "3D shape Engineering and Design Parameterization", *Computer-Aided Design and*

- Applications*, vol. 8, no.5, pp.681-692, 2011. <https://doi.org/10.3722/cadaps.2011.681-692> ↑12
- [25] M. Pollefeys, L. V. Gool, M. Vergauwen, F. Verbiest, K. Cornelis, J. Tops and R. Koch, “Visual modeling with hand-held camera”. [En línea]. Disponible en: <http://www-oldurlis.inf.ethz.ch/personal/marc.pollefeys/pubs/PollefeysIJCV04.pdf> ↑12
- [26] S. Barone, A. Paoli and A. V. Razionale, “Multiple alignments of range maps by active stereo imaging and global marker framing”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, no. 2, pp. 116-127, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.09.003> ↑12
- [27] M. Paulic, T. Irgolic, J. Balic, F. Cus, A. Cupar, T. Brajlilj and I. Drstvensek, “Reverse Engineering of Parts with Optical Scanning and Additive Manufacturing”, in *24 DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation*, 2013. ↑12
- [28] H. Yue, W. Chen, X. Wu and J. Liu, “Fast 3D modeling in complex environments using a single Kinect sensor”, *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 53, no. 1, pp. 104-111, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2013.08.009> ↑12
- [29] D. M. Cole and P. M. Newman, “Using laser range data for 3D SLAM in outdoor environments”. [En línea]. Disponible en: [http://www.robots.ox.ac.uk/~mobile/Papers/3DScanMacthingCole\\_ICRA2006.pdf](http://www.robots.ox.ac.uk/~mobile/Papers/3DScanMacthingCole_ICRA2006.pdf) ↑12
- [30] X. Xiong, A. Adan, B. Akinei and D. Huber, “Automatic creation of semantically rich 3D building models from Laser Scanner Data”. [En línea]. Disponible en: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.295.3009&rep=rep1&type=pdf> ↑12, 16
- [31] E. G. Iserte, M. M. Espinosa and M. Domínguez, “Métodos y metodologías en el ámbito del diseño industrial”, *Técnica Industrial*, no. 300, pp. 38-44, 2012. ↑12, 13
- [32] L. B. Sosa, “Métodos y técnicas de diseño”. [En línea]. Disponible en: <http://eprints.uanl.mx/8993/1/Metodos%20y%20Técnicas%20de%20Dise%C3%B1o.pdf> ↑13
- [33] M. Guerrero, B. Hernandis and B. Agudo, “Comparative study of actions to consider in the process of conceptual design from the engineering and the product design”, *Ingeniare Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 22, no. 3, pp. 398-411, 2014. ↑13
- [34] L. Rodríguez, *Diseño: estrategia y táctica*. Ciudad de México: Siglo XXI Editores, 2004. ↑13, 15, 17
- [35] R. L. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*. Ciudad de México: Pearson Prentice Hall, 2006. ↑13, 23
- [36] G. Pahl, W. Beitz, J. Feldhusen and K.H. Grote, *Engineering design: A systematic approach*. Darmstadt: Springer, 2011. ↑13
- [37] S. Navarrete, “Diseño paramétrico. El gran desafío del siglo XXI”, *Cuadernos del Centro de Estudios en Diseño y Comunicación*, no. 49, pp. 63-72, 2014. ↑13, 14
- [38] S. Liu and I. M. Boyle, “Engineering Design: perspectives, challenges and recent advances”, *Journal of Engineering Design*, vol. 20, no. 1, pp. 07-19, 2009. ↑14
- [39] E. Gaspar, M.M. Espinosa and M. Domínguez, “Métodos y metodologías en el ámbito del diseño industrial”. [En línea]. Disponible en: <http://www.tecnicaindustrial.es/TIFrontal/a-4588-metodos-metodologias-ambito-diseno-industrial.aspx> ↑14
- [40] L. Martínez, L. Pérez, M. Rodríguez, M. Vizcaíno and G. Naranjo, “Metodología para el diseño y desarrollo de productos: Caso de creación de muebles optimizadores con Pop Up”, *Revista I+D en TIC*, vol. 8, no. 2, pp. 6-11, 2017. ↑14, 15
- [41] M. Jiménez, J. Porras, I. A. Rodríguez and M. M. Espinosa, “La fabricación aditiva: la evidencia de una necesidad”. [En línea]. Disponible en: [https://www2.uned.es/egi/publicaciones/articulos/La\\_fabricacion\\_aditiva\\_La\\_evidencia\\_de\\_una\\_necesidad.pdf](https://www2.uned.es/egi/publicaciones/articulos/La_fabricacion_aditiva_La_evidencia_de_una_necesidad.pdf) ↑15, 16, 17
- [42] F. A. Cardona and G. A. Peña, “Implementación del prototipado rápido en la Universidad Católica de Pereira”, *Revista Páginas*, no. 96, pp. 13-24, 2014. ↑16
- [43] T. Miklos and M. E. Tello, *Planeación prospectiva. Una estrategia para el diseño del futuro*. Ciudad de México: Editorial Limusa, 2007. ↑17
- [44] PRODUCTO3D, “Propiedades ABS-M3”. [En línea]. Disponible en: <http://producto3d.com/wp-content/uploads/2015/02/Propiedades-ABS-M30-.pdf> ↑21
- [45] G. Dickson and E. Stolterman, “Why design method development in not always carried out user-centered design”, in *CHI Conference on human factors in computing systems*, 2018. ↑25
- [46] C.M. Gray, “It’s more of a mindset than a method: UX practitioner’s conception of design methods”, in *CHI Conference on human factors in computing systems*, 2016. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858410> ↑25



---

### **Jorge Carro Suárez**

Es Ingeniero Electromecánico egresado del Instituto Tecnológico de Apizaco, México. Maestro en Ciencias en Ingeniería Mecánica con especialidad en Diseño Mecánico por el Instituto Tecnológico de Puebla, México y obtuvo su Doctorado en Planeación Estratégica y Dirección de Tecnología por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla, México. Actualmente, es Docente de Tiempo Completo adscrito al Programa Educativo de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Politécnica de Tlaxcala, México. Especialista en Diseño, Ingeniería y Manufactura Asistida por Computadora (CAD/CAE/CAM). Sus líneas de investigación son Innovación Tecnológica, Desarrollo Sustentable e Industria 4.0. Perteneció al cuerpo académico en consolidación “Diseño y Automatización de Sistemas Mecatrónicos” y es Coordinador del Centro Certificador Internacional Académico SolidWorks UPTx.  
Correo electrónico: jorge.carro@uptlax.edu.mx.

---

### **Fabiola Flores Salazar**

Es Ingeniero en Electrónica del Instituto Tecnológico de Puebla, de Puebla, México. Obtuvo su título de Maestría en Docencia Universitaria en la Universidad Tolteca de México de Puebla, México. Obtuvo su doctorado en la Universidad Popular Autónoma de Puebla de Puebla, México. Actualmente se desempeña como profesor en el área de Ingeniería Mecatrónica en la Universidad Politécnica de Tlaxcala en Tlaxcala, México, y pertenece como investigador al Cuerpo Académico CA-UPTLAX-06 donde realiza estudios sobre Diseño y Automatización de Sistemas Mecatrónicos.  
Correo electrónico: fabiola.flores@uptlax.edu.mx

---

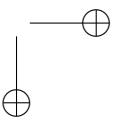
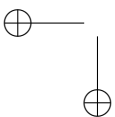
### **Irma Flores Nava**

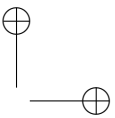
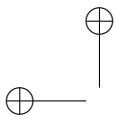
Es Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones, egresada de la Universidad Interamericana A.C. ubicada en Puebla Pue, México. Con Maestría en Ciencias de la Electrónica con Opción en Automatización, egresada de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, ubicada en Puebla Pue, México. Actualmente se desempeña como profesor de Tiempo completo en el área de Mecatrónica en la Universidad Politécnica de Tlaxcala, ubicada en Tlaxcala, México. Perteneció al Cuerpo académico UPTLAX-CA-06, donde realiza investigación de automatización y control de sistemas mecatrónicos.  
Correo electrónico: irma.flores@uptlax.edu.mx

---

### **Ramón Hernández Hernández**

Es Ingeniero Mecatrónico egresado de la Universidad Politécnica de Tlaxcala, México. Se especializa en Máquinas-Herramientas, Metrología e Instrumentación. Actualmente se desempeña como Jefe de Laboratorio de CAM, CNC y Máquinas-Herramientas de la Universidad Politécnica de Tlaxcala y es colaborador del cuerpo académico “Diseño y Automatización de Sistemas Mecatrónicos” en las líneas de investigación Diseño de sistemas Mecatrónicos e Innovación Tecnológica.  
Correo electrónico: ramon.hernandez@uptlax.edu.mx





Research

REVISTA  
Ingeniería

## Liquid Level Monitoring System in Big Deposits

*Sistema de Monitoreo de Nivel de Líquido en Grandes Depósitos*

**Reinier Quiala Llorens<sup>1</sup> Fidel E. Hernández Montero<sup>2</sup> Ailén Pérez Molinet<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Centro Investigación Desarrollo Producción “Grito de Baire” - Cuba, <sup>2</sup>Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría” - Cuba  
correspondence: ailen@tele.cujae.edu.cu

Recibido: 04/10/2018. Modificado: 07/12/2018. Aceptado: 30/01/2019.

### Abstract

**Context:** The objective of this work is to design and build a system capable of controlling the level of liquids stored in large tanks. The system is also oriented to its use in automatic control practices and the transmission of information from a distance.

**Method:** It consists of different stages that meet the fulfillment of the proposed objective. In addition, it is composed of sound and light alarms in case of spills in the tanks or lack of communication between its components. The realization of digital control within the system required a data acquisition procedure implemented by Arduino with XBee modules for communication, and a personal computer.

**Results:** This type of procedure to implement the control was chosen due to the ease of implementation, the benefits and the low costs of the system with respect to those existing in the market. Another task was the practical study of the different control techniques applied to a real system for monitoring the level of liquids in large capacity tanks.

**Conclusions:** The validation of the measurement system was made through a comparison between the real values obtained with the measurement instruments and the values shown by the system through the web application that was designed. The correct operation of this system allowed its subsequent installation in real deposits.

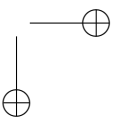
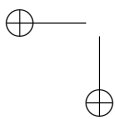
**Keywords:** Level Measurement, Arduino, XBee.

**Language:** Spanish

Open access



Cite this paper as: R. Quiala; A. Pérez and F. E. Hernández “Liquid Level Monitoring System in Big Deposits”, Ingeniería, vol. 24, no.1, pp. 29-48, Jan. - Apr. 2019.  
© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI:<https://doi.org/10.14483/23448393.13837>



### Resumen

**Contexto:** El presente trabajo tiene como objetivo diseñar y construir un sistema capaz de realizar el control de nivel de líquidos que se encuentren almacenados en grandes depósitos, también está orientado a su utilización en prácticas de control automático y a la transmisión de la información a distancia. una energía renovable, sostenible y amigable con el medio ambiente, usada como alternativa para mitigar el cambio climático causado por uso de energías provenientes de los combustibles fósiles; pensando en ello, es muy importante estudiar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos en condiciones reales de funcionamiento.

**Método:** Consta de diferentes etapas que satisfacen el cumplimiento del objetivo propuesto, está compuesto por alarmas sonora y lumínica en caso de derrames en los depósitos o por falta de comunicación entre sus componentes. La realización del control digital dentro del sistema requirió de un procedimiento de adquisición de datos implementado por Arduino con módulos XBee para la comunicación, además de una computadora personal.

**Resultados:** Este tipo de procedimiento para implementar el control se escogió debido a la facilidad de ejecución, los beneficios y los bajos costos del sistema respecto a los existentes en el mercado; otra de las tareas realizadas fue el estudio práctico de las diferentes técnicas de control aplicadas a un sistema real para el monitoreo de nivel de líquidos en depósitos de gran capacidad.

**Conclusiones:** La validación del sistema de medición fue realizada a través de una comparación entre los valores reales obtenidos con los instrumentos de medición y los valores mostrados por el sistema a través de la aplicación web que fue diseñada; el correcto funcionamiento de dicho sistema permitió su posterior instalación en depósitos reales.

**Palabras clave:** Arduino, Medición de nivel, XBee.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

La calidad de un producto, seguridad de la instalación, eficiencia económica, entre otros, constituyen aspectos importantes en cualquier sistema de medición de nivel. Existen ejemplos de medición de nivel en todos los sectores industriales, tal como la industria petroquímica, farmacéutica, hidráulica, alimenticia y energética [1]; el cumplimiento de las expectativas económicas futuras y la fiabilidad bajo las condiciones de trabajo de cada aplicación en particular, son dos aspectos a tener en cuenta durante la elección de los sistemas de medición [2]. La medición de nivel permite conocer y controlar la cantidad de líquido almacenada en un depósito, durante la misma hay que tomar en cuenta algunas propiedades del líquido tales como la viscosidad del fluido, temperatura, densidad, corrosión, gránulos, etc. Para el tipo de medición y la calidad deseada se deben conocer las características del instrumento como campo de medición, exactitud, repetitividad, presurización o no del recipiente, mantenimiento, calibración y costo [1], [3].

Los sensores de medición de nivel son parte integral del control de procesos en muchas industrias [4], y diversos son los que han sido implementados para desarrollar esta función. En el mundo se emplean diferentes tipos de sensores para la medición de nivel [5]–[8] con innumerables fabricantes; Vega [4] es un ejemplo de los fabricantes de sensores a nivel mundial. Otro ejemplo lo constituye Siemens [2], quien se dedica al desarrollo y a la fabricación de productos, diseño e instalación de complejos sistemas y proyectos, también a la creación de una amplia gama de soluciones para afrontar los retos más complicados de sus clientes [4]. Los precios de los sensores ofrecidos

por el primer fabricante se encuentran entre 383 y 656 dólares, los cuales pueden variar teniendo en cuenta el tipo de sensor que se emplee; los precios de los sensores de nivel ofrecidos por Siemens en el mercado actual se encuentran oscilando entre los 1014 y 3623 dólares, valores que pueden variar dependiendo de los tipos y la complejidad de los sensores que se emplee en cualquiera de las aplicaciones para las que fueron diseñados [9].

En Cuba se emplea una amplia gama de sensores para la medición de nivel en diversas industrias y empresas que contienen grandes volúmenes de líquidos en sus depósitos, el Instituto Nacional de la Reserva del Estado y la Empresa Cubana de Aeropuertos y Servicios Aeronáuticos S.A. (ECASA) son algunos de los ejemplos donde realiza la medición de nivel con las características mencionadas. La empresa ECASA cuenta con un sistema de medición de nivel en tanques, este tiene como objetivo principal establecer un sistema de inventario para determinar la cantidad de líquido almacenado en el tanque; el sistema instalado está compuesto por transmisores de nivel por radar, sondas de temperatura y transmisores de presión, el cual se comunica mediante protocolo HART con los tanques correspondientes. El sistema para monitoreo y análisis de un solo depósito tiene un precio cercano a 2094 dólares, además de considerarse costoso, resulta difícil su adquisición en el mercado internacional.

Algunas de las empresas cubanas dedicadas a la medición de nivel no cuentan con un sistema de medición en particular para realizar dicha tarea, en dichas entidades la medición de nivel es realizada por los encargados de depósitos de forma manual y no se tiene en cuenta la dilatación ni contracción del tanque, lo anterior contribuye a errores tanto humanos en el proceso de lectura como técnicos; la no disponibilidad de un sistema de monitoreo de nivel imposibilita la obtención de la información necesaria y precisa sobre el estado de los líquidos almacenados en los depósitos. Otras, como es el caso del INRE, dedicada al almacenamiento de combustible en tanques de gran capacidad, cuentan con un sistema de medición de nivel obtenido de la extinta Unión Soviética para el control del llenado del tanque. Estos medios en la actualidad se encuentran obsoletos y en mal estado, y debido a los altos costos de estos sistemas en el ámbito mundial, se imposibilita la adquisición a algunas entidades que requieren de su empleo; además, como la medición de nivel de líquido de forma manual en algunas entidades conlleva a errores humanos y técnicos, su lectura no es continua y no tiene en cuenta la dilatación y contracción del tanque.

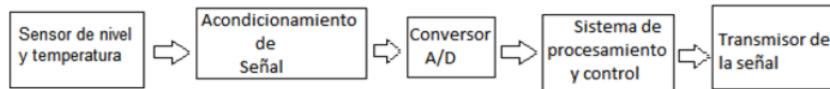
El objetivo de este trabajo consiste en diseñar y construir un sistema de bajo costo, capaz de monitorear de manera continua el nivel de líquido en tanques de 10 000 L de capacidad; dichos tanques presentan un diámetro de 1900 mm, un largo de 4000 mm y un peso de 2200 kg.

El trabajo está compuesto por cinco secciones: la primera sección se dedica a la presente introducción, donde se plantean las motivaciones del trabajo; posterior a ello, existe otra sección donde realiza el diseño del sistema de medición de nivel, especificándose los sensores de nivel y temperatura, el diseño de la tarjeta acondicionadora, el microcontrolador y transmisor empleados; además, consta de otras secciones referidas a la presentación de los resultados parciales y finales, análisis de estos y un análisis económico del sistema; por último, en la sección de conclusiones se muestran los aspectos relevantes del trabajo y sus debilidades, lo cual condujo a una sección de trabajo futuro.



## 2. Diseño del sistema de medición de nivel

Para la realización del diseño del sistema de medición de nivel se tuvieron en cuenta varias etapas, las cuales se muestran en la Figura 1, donde se visualiza el proceso comprendido desde la lectura de los datos hasta la transmisión de estos a un punto donde serán analizados por los especialistas.



**Figura 1.** Esquema en bloque de un sistema de adquisición de datos para la medición de nivel.

Para el diseño del sistema de medición de nivel se tuvieron en cuenta los siguientes requerimientos técnicos:

- Se debe garantizar que en el lugar a implementar el sistema de medición para el trabajo en tanques de combustible no existan altas tensiones ni altos valores de corriente.
- La señal de entrada del amplificador debe ser de baja tensión.
- El amplificador instrumental debe amplificar al menos diez veces la señal de entrada.
- Se debe garantizar la cobertura en un terreno de aproximadamente de 450 m, por lo que se hace necesario el empleo de repetidores para el cumplimiento de este objetivo.



**Figura 2.** Combinación del flotador con potenciómetro.

### 2.1. Sensores de nivel y temperatura empleados

Para la realización del monitoreo de nivel del líquido se utiliza un sensor flotador, este presenta características como: fácil adquisición, bajo costo, durabilidad y es idóneo para este tipo de trabajo [10]. Sin embargo, el problema de su imprecisión durante la medición, propició que se le acoplara un potenciómetro lineal, como se muestra en la Figura 2, para obtener una mejor linealidad en la medición. Durante el desarrollo y calibración del sistema se decidió trabajar con un potenciómetro de 10 k $\Omega$ . Las pruebas aplicadas para su calibración fueron en el rango de 2-8 k $\Omega$ , por ser esta la

parte más lineal de este potenciómetro; lo anterior permitió la obtención de valores más exactos en la medición. Cuenta con capacidad de 20 mA, una exactitud de 10 mm, una longitud de 40 cm y un voltaje de alimentación de 10 V.

Por otra parte, como sensor de temperatura fue escogido el Pt100, el cual se encuentra dentro de la familia de los sensores de resistencia. Los sensores RTD de platino están considerados los más precisos y estables dentro de los sensores estándar; para fines profesionales, un sensor RTD de platino de alta calidad es el que presenta mayores prestaciones [11]. El platino es en gran medida el material más común de los RTD, sobre todo debido a su estabilidad a largo plazo en el aire. Entre los sensores RTD de platino que existen, el Pt100 se destaca dentro de los que más aplicaciones tienen, dicho sensor posee una estabilidad de mayor de 0,2 grados y su rango de medición de 0 a 100 grados.

## 2.2. Diseño de la tarjeta acondicionadora de señales

En este trabajo, la solución escogida para el procesamiento consiste en una tarjeta de acondicionamiento de señales analógicas, esta es diseñada para que trabaje de forma estable, empleando circuitos integrados para su miniaturización; brinda a la salida pequeños valores de voltajes, de forma tal que se puedan obtener, comprender y manipular con cualquier microcontrolador. Esta tarjeta acondicionadora se compone de un diseño sencillo, buscando que su tamaño no sea un obstáculo para su compartimentación, montaje, diseño estructural, mantenimiento y reparación; además, se diseñó con componentes de fácil adquisición en el mercado y fácil montaje, ya que no se trabaja con componentes de montaje superficial (SMD, por sus siglas en inglés). En la Figura 3 y la Figura 4 se muestra el esquema PCB y el diagrama en bloque de esta.

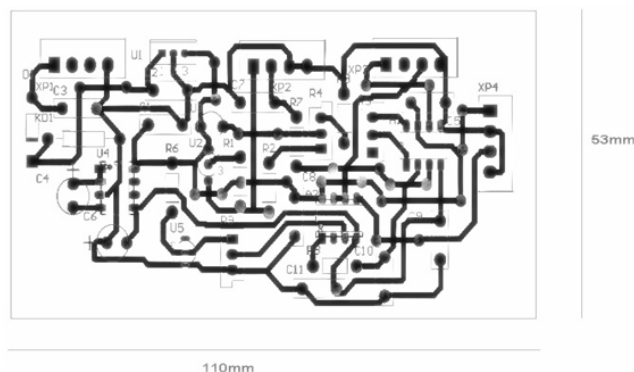


Figura 3. Esquema PCB de la tarjeta acondicionadora.

El diseño de esta tarjeta se basa en los siguientes requerimientos: la señal de entrada del amplificador debe ser de baja tensión, la resistencia de referencia a la entrada del amplificador instrumental debe ser baja, el amplificador instrumental debe amplificar la señal al menos diez veces la señal de entrada, debe poseer una ganancia de cinco a diez veces el valor de entrada y la corriente que circula por los sensores debe estar en el orden de 5-10 mA. Para poner en práctica los requerimientos

anteriores, durante el diseño de la tarjeta se tuvo en cuenta la aplicación de las siguientes condiciones: implementarla sobre la base de amplificadores instrumentales de alta precisión del tipo AD620 para lograr la linealidad de la respuesta, utilizar una fuente estable de corriente de referencia con un circuito de compensación de temperatura para estabilizar el offset, emplear potenciómetros para el acondicionamiento funcional que permita variar el intercepto y la pendiente de la señal de salida, introducir un transductor para convertir las variables físicas en variable eléctricas y emplear un circuito integrado del tipo LM334 [13] para la compensación de temperatura.

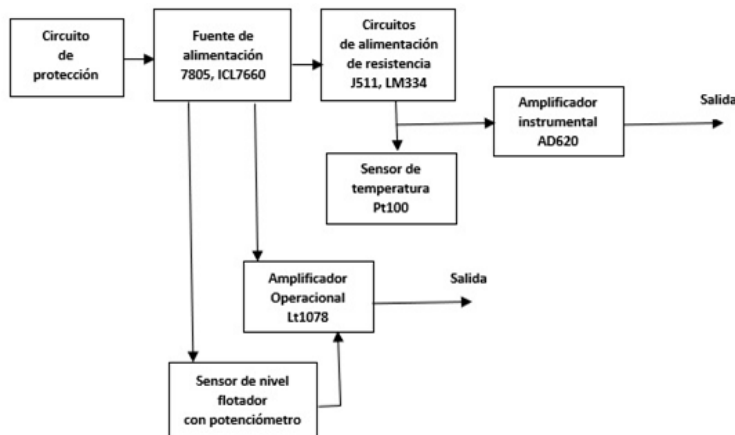


Figura 4. Diagrama en bloque de la tarjeta acondicionadora.

El diagrama que se muestra en la Figura 4 comprende los componentes de la tarjeta acondicionadora, estos son: circuito de protección, fuente de alimentación, circuito de alimentación, amplificador instrumental y amplificador operacional. El circuito de protección se diseñó de manera tal que pudiera proteger a la tarjeta contra la inversión de polaridad; además, el mismo elimina los picos transitorios mayores a de 18 V mediante los diodos P6KA18. La fuente de alimentación genera voltajes positivos mediante el regulador de voltaje 7805 y voltajes negativos mediante el circuito integrado ICL7660A [12]. Esta fuente fue seleccionada debido a la necesidad de obtener voltajes positivos (7805) y voltajes negativos (ICL7660), el circuito de alimentación de resistencia es el encargado de generar valores de corriente constante respecto a la temperatura del sensor de nivel PT100; así, cualquier variación de temperatura en el sensor se representa como variación de voltaje a la salida. Se seleccionó el J511 y el LM334 en tanto que en este circuito se manejan pequeños valores de corrientes, donde, para el caso del LM334, se realiza un ajuste de corriente positivo, y para el caso del J511 se realiza el ajuste de corriente negativo [13]. El amplificador instrumental AD620 fue elegido por su sensibilidad, lo que conlleva a una gran amplificación y también muestra una gran linealidad [14], exigencias que debía satisfacer la tarjeta diseñada. El amplificador operacional LT1078 [15] se emplea para amplificar la salida del sensor de nivel y brindar valores a la salida que correspondan con los valores de entrada del módulo Arduino, ya que el mismo trabaja con pequeños valores de corriente y voltaje, además de poseer una ganancia de 200 KHz que se acopla para el trabajo.

### 2.3. Microcontrolador Arduino UNO

A pesar de que en otros trabajos consultados para monitoreo remoto del nivel se emplean otros microcontroladores, como es el caso del microcontrolador de 8 bits PIC16LF886 [18], la plataforma Arduino ha sido empleada [17] arrojando muy buenos resultados.

La elección de la plataforma Arduino se debe a su empleo en diversas aplicaciones, simplificación del proceso de trabajo, su precio bajo en comparación con otras plataformas de microcontroladores, es una multiplataforma, un entorno de programación simple y clara y es un código libre y *software* extensible [18]–[21]. Dentro de Arduino será seleccionado el Arduino UNO, por ser una de las plataformas más sencillas, sus prestaciones son suficientes para la aplicación en concreta y es capaz de manejar el XBee fácilmente [22], [23]; esta plataforma cuenta además con un módulo interno analógico-digital y filtros encargados del acoplamiento de la señal obtenida de los sensores.

Para la programación del Arduino UNO se tuvieron en cuenta sus prestaciones y características. El diagrama de flujo presentado en la Figura 5, muestra cómo se concibió el software para poder monitorear los parámetros principales del sistema en el depósito.

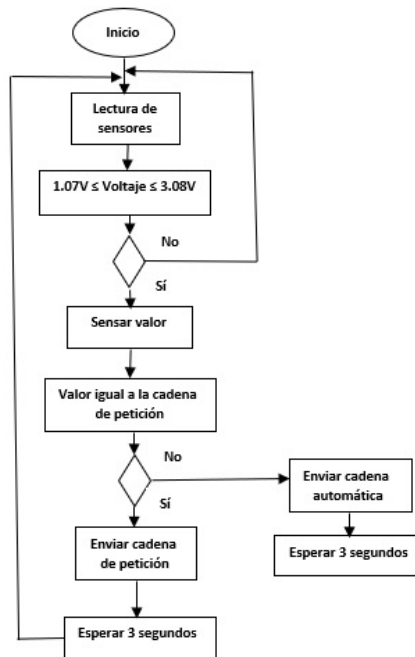


Figura 5. Diagrama de Flujo del programa en el depósito.

Los datos enviados por el transmisor son analizados y almacenados por el receptor. En la Figura 6 se muestra el diagrama de flujo que se implementó para la atención a este último en el punto de control.

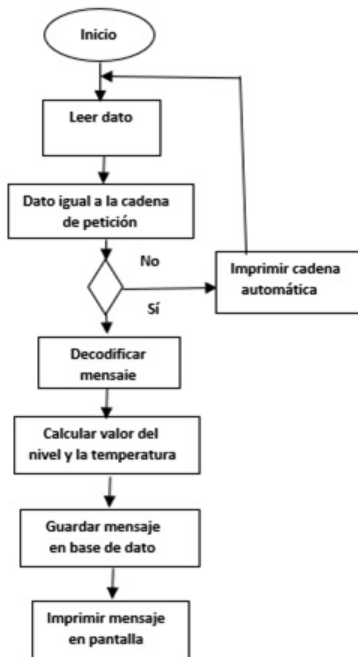


Figura 6. Diagrama de Flujo del programa en el punto de control.

## 2.4. Elección del transmisor XBee

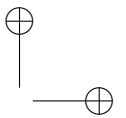
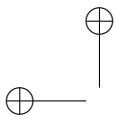
ZigBee es el protocolo de comunicaciones inalámbricas escogido para el desarrollo del sistema de medición de nivel, este ha sido seleccionado teniendo en cuenta la permisividad que el brinda a los dispositivos electrónicos de bajo consumo para que puedan realizar sus comunicaciones inalámbricas y su utilidad para redes de sensores en entornos industriales, médicos y, sobre todo, domésticos [22]; de manera concreta, dentro de ZigBee se han seleccionado los módulos XBee debido a que son económicos, potentes y fáciles de utilizar.

Las antenas que emplean los dispositivos XBee son de poca ganancia [22], lo que no garantiza las especificaciones planteadas en este trabajo; a pesar de esto, los módulos XBee permiten el acople con otros tipos de antenas exteriores a través de los conectores que se encuentran en su placa.

### 2.4.1. Diseño de la antena externa

Los problemas que presentan las antenas de XBee, y utilizando la facilidad de acople con otros dispositivos exteriores, propiciaron que se tuviera que diseñar una antena para utilizarla en el sistema de medición de nivel propuesto.

Para la selección de la antena se tuvieron en cuenta los siguientes requerimientos: directividad, ganancia mayor de 5 dB, compacta, robusta, de fácil diseño, acople de impedancia con los XBee,



cobertura mayor de 300 m y compatibilidad en la frecuencia de trabajo con los XBee. En la Figura 7 se muestra el diagrama de radiación de la antenna diseñada.

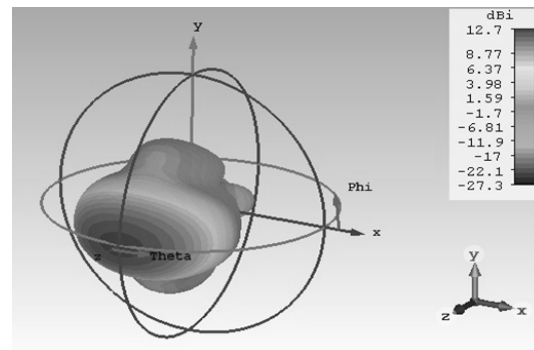


Figura 7. Diagrama de radiación de la antenna.

En el diagrama de radiación de la antenna que se muestra se puede notar que posee una ganancia de 12 dB, por lo que cumple con las exigencias que se tuvieron en cuenta para la selección y diseño de la antenna; se nota también el gran ancho de banda de la antenna, ideal para la aplicación en cuestión. La simulación de la antenna seleccionada y de los elementos que la componen se realizó en el software CST 2016.

La antenna que se seleccionó para el trabajo es la antenna doble biquad de cuatro elementos, como se muestra en la Figura 8, ya que este tipo de antenna brinda la posibilidad de ser compacta, de fácil construcción y opera en la banda de frecuencia de trabajo que es de 2.4 GHz.

Para el diseño de la antenna se tuvo en cuenta el procedimiento empleado en [24]. A través de la ecuación (1) se obtuvo la longitud de onda.

$$\lambda = \frac{c}{F} \quad (1)$$

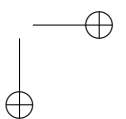
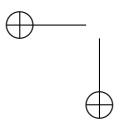
Donde  $c$  es la velocidad de la luz en el espacio libre y  $F$  es la frecuencia empleada que es de 2,437 GHz.

Con el dato que se obtuvo de  $\lambda = 123$  mm, se obtuvieron las ecuaciones (2) y (3) que representan los lados del cuadrado y la distancia entre el alimentador y el reflector, respectivamente.

$$L = \frac{1}{4}\lambda \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{8}\lambda \quad (3)$$

Con respecto a las dimensiones del reflector, se tomaron las que se recomiendan en [24], por lo que la altura y el largo del reflector fueron 105 mm y 235,4 mm respectivamente.



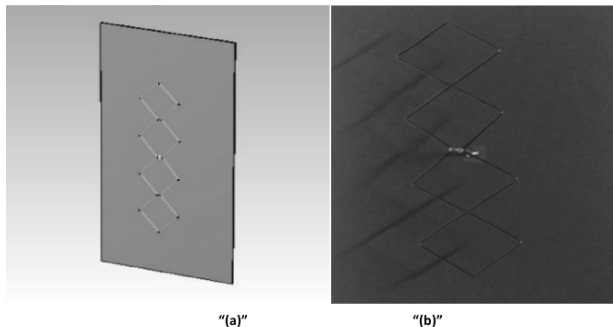
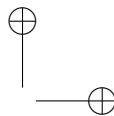
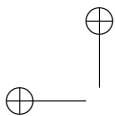


Figura 8. “(a)”, “(b)”. Simulación y construcción de la antena doble biquad.

### 3. Análisis e interpretación de los resultados parciales

El sistema propuesto estará finalmente conformado por los elementos siguientes: los sensores de temperatura y de nivel, la etapa acondicionadora de la señal, el microcontrolador Arduino, el transmisor XBee y la antena que se encarga de garantizar una correcta comunicación entre el área de los depósitos y el local de procesamiento de la información.

#### 3.1. Tarjeta acondicionadora de señales y sensores

La Figura 9 muestra la composición de la tarjeta, la cual presenta tres entradas denotadas por 1, 2 y 4, además de una salida representada como 3. El conector 1 representa la entrada de 12 VDC (voltaje de corriente directa) de alimentación de la tarjeta, donde el pin 1 es VCC y el pin 4 GND. El conector 2 es la alimentación del sensor de temperatura Pt100; en este conector se puentean los pines 1 y 2 (tensiones de alimentación), y los pines 3 y 4 (GND). Por su parte, el conector 3 constituye la salida de la tarjeta, la cual muestra la respuesta de los sensores de temperatura y nivel, esta debe ser menor de 4 VDC, donde el pin 1 es GND común, el pin 2 es la respuesta de salida del Pt100, el pin 3 es la salida del sensor de nivel y el pin 4 no se conecta. Por último, el conector 4 es la alimentación del sensor de nivel. En este conector se instala el potenciómetro que se alimentará en los pines de los extremos donde da su máximo valor, el pin del centro será la respuesta de salida del sensor de nivel.

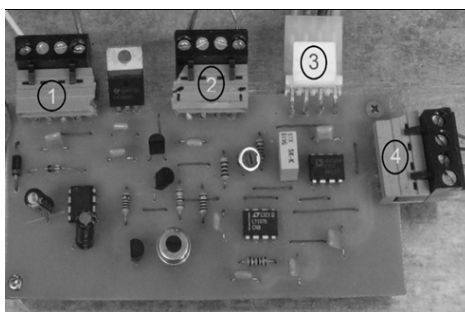
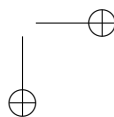
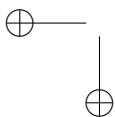


Figura 9. Tarjeta acondicionadora de señales.



Para comprobar el funcionamiento de la tarjeta se realizaron diferentes pruebas de laboratorio en hornos de calor, cámaras de temperatura para la compensación y su correspondencia con el valor de referencia y al aire libre; dentro de estas se encuentra la comprobación de la respuesta de salida con los sensores instalados, para lo cual se realizaron mediciones para la compensación de la temperatura y, en el caso del sensor de nivel, la selección de la zona de trabajo teniendo en cuenta la respuesta de salida del potenciómetro seleccionado. La tarjeta acondicionadora fue sometida a pruebas de laboratorio en hornos de calor y cámaras de temperatura para la compensación y su correspondencia con el valor de referencia.

En la Tabla I se pueden observar las mediciones realizadas para la compensación de la temperatura al aire libre, siendo este medio el que mayor repercusión pudiera tener en la medición.

**Tabla I.** Mediciones para la compensación de la temperatura.

Temperatura (grados Celsius)	Resistencia ( $\Omega$ )	Tensión del sensor (V)	Tensión de salida (V)	Tensión de salida a temperatura ambiente (V)	Compensación de la tensión de salida (V)	Tensión de salida compensada (V)
0	100	0,5	3,625	3,262	4,027	3,644
5	101,56	0,507	3,681	3,313	4,090	3,701
10	103,51	0,517	3,752	3,377	4,168	3,772
40	115,16	0,575	4,174	3,757	4,637	4,197
50	119,01	0,595	4,314	3,882	4,792	4,337
60	122,86	0,614	4,453	4,008	4,948	4,478
70	126,69	0,633	4,592	4,133	5,102	4,617
80	130,51	0,652	4,730	4,257	5,256	4,757
90	134,32	0,671	4,869	4,382	5,409	4,895
100	138,12	0,690	5,006	4,506	5,562	5,034

Como se puede apreciar con cada valor de temperatura medida con el sensor, teniendo en cuenta la tensión que se le suministra a este, se puede obtener en el conector de salida de la tarjeta valores de tensión que se encuentran dentro del rango de trabajo del microcontrolador Arduino.

Las pruebas realizadas al sensor de nivel y su acople a la tarjeta acondicionadora también fueron llevadas a cabo en varios entornos; la Tabla II muestra las variaciones de nivel mediante un dispositivo creado, donde se graficaron los ángulos de trabajo del sensor.

Como se muestra en la Tabla II, en este experimento la tensión de entrada no varía, manteniendo un valor igual a 5 V, es este el valor suministrado por la tarjeta acondicionadora; también se puede apreciar que a través del aumento de los ángulos se obtiene a la salida una disminución de los valores de tensión, no así con resistencia, lo cual demuestra el funcionamiento del potenciómetro. Aquí también se puede observar que los valores de tensión de salida corresponden al rango de trabajo del microcontrolador Arduino.



Tabla II. Caracterización del sensor de nivel.

Nº	Ángulo del flotador ( $\theta^\circ$ )	Tensión de salida (V)	Resistencia del potenciómetro ( $\Omega$ )
1	0	3.081	3.37
2	2	3.05	3.50
3	4	3.0	3.72
4	6	2.90	3.84
5	8	2.74	3.97
6	10	2.86	4.07
7	12	2.74	4.18
8	14	2.66	4.36
9	16	2.58	4.51
10	18	2.52	4.68
11	20	2.45	4.87
12	22	2.36	4.97
13	24	2.28	5.18
14	26	2.15	5.33
15	28	2.04	5.56
16	30	1.95	5.75
17	32	1.85	6.01
18	34	1.74	6.24
19	36	1.58	6.47
20	38	1.39	6.98
21	40	1.20	7.26

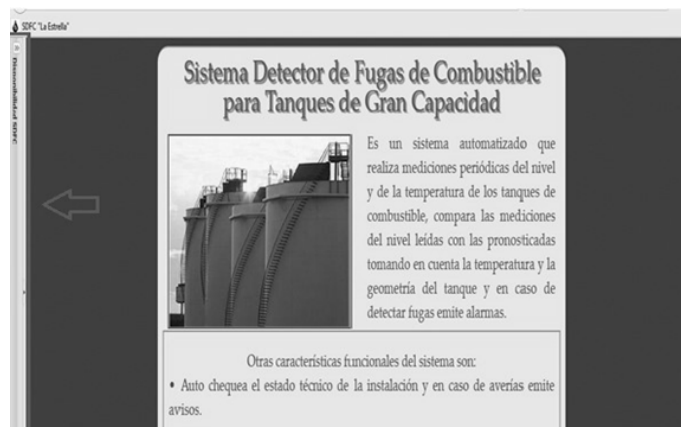
### 3.2. Aplicación de consola y aplicación web del sistema de medición de nivel

El *software* del sistema se inicia automáticamente al encender el equipo, basado en el lenguaje de programación Phython; este cuenta de dos partes: la aplicación de consola y la aplicación web. La aplicación de consola registra y muestra todos los mensajes entrantes y salientes, así como las otras notificaciones útiles para conocer el estado del funcionamiento del *software*; por su parte, la aplicación web constituye la interfaz de usuario. En esta última se muestra únicamente la información de interés para el usuario y contiene algunos botones para la interacción entre el servidor y el usuario.

La pantalla de inicio del *software* se muestra en la Figura 6, mientras que la información con la ubicación del grupo de tanques de combustibles que están siendo controlados y la información referente a cada tanque que está siendo supervisado se muestran en la Figura 10.

### 3.3. Análisis de la cobertura del sistema de medición de nivel

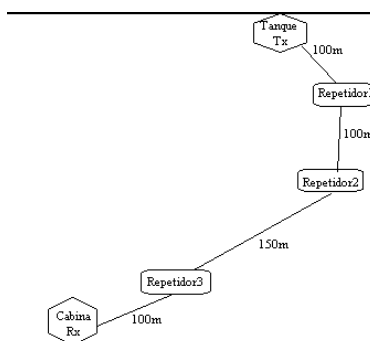
Con el objetivo de validar las pruebas de cobertura realizadas mediante simulación, se decidió realizar pruebas de cobertura en el terreno. Las pruebas de cobertura se realizaron con el *software*



**Figura 10.** Pantalla principal del sistema de medición.

XCTU [25], este realiza una exploración de 360° a su alrededor y muestra en pantalla los dispositivos conectados mediante una máscara de identificación personalizada, dicha máscara permite detectar la cobertura en tanto la información está llegando.

La zona donde se despliega el sistema se caracteriza por ser un terreno semiurbano con un área boscosa. Se decide, teniendo en cuenta las condiciones anteriores, la ubicación de tres estaciones repetidoras entre el transmisor y receptor. En la Figura 11 se muestra cómo queda el radioenlace en cuestión, mostrando la distancia que hay en cada una de estas estaciones.



**Figura 11.** Composición de los puntos del radioenlace.

En la Tabla III se muestran los resultados de cobertura entre el transmisor y el receptor, teniendo en cuenta los diferentes repetidores existentes entre ellos. Debido a la estructura empleada por el sistema de medición, se realizaron pruebas de cobertura entre el transmisor y el primer repetidor, entre el primer y el segundo repetidor, entre el segundo y el tercer repetidor y entre el tercer repetidor y el receptor, respetando las distancias existentes entre ellos.

**Tabla III.** Almacenamiento de las pruebas de cobertura.

Existencia de cobertura				
Distancia (m)	Transmisor-Repetidor1	Repetidor1-Repetidor2	Repetidor2-Repetidor3	Repetidor3-Receptor
10	Sí	Sí	Sí	Sí
30	Sí	Sí	Sí	Sí
50	Sí	Sí	Sí	Sí
70	Sí	Sí	Sí	Sí
90	Sí	Sí	Sí	Sí
100	Sí	Sí	Sí	Sí
110	Sí, pero necesita elevación la antena	Sí, pero necesita elevación la antena	Sí, pero necesita elevación la antena	Sí, pero necesita elevación la antena
120	Sí, pero necesita elevación la antena	No	Sí, pero necesita elevación la antena	No
130	No	-	Sí, pero necesita elevación la antena	-
140	-	-	Sí, pero necesita elevación la antena	-
150	-	-	Sí, pero necesita elevación la antena	-

Como se muestra en la Tabla III, la cobertura entre los diferentes elementos que conforman el sistema de medición, según lo esperado debido a los resultados de la simulación, resultó positiva; es válido destacar que en todos los casos siempre hubo cobertura a la distancia requerida, aunque en el tramo del segundo al tercer repetidor se hizo necesario levantar la antena para lograr la cobertura, pues los niveles de señal obtenidos eran bajos y no permitían la entrada de los datos al sistema.

#### 4. Resultados del monitoreo del nivel del líquido

En la Figura 12 se muestra cada vista del panel de grupo de tanques, el cual está compuesto por: (a) las gráficas de barra que muestran los indicadores de nivel y temperatura del tanque; (b) la barra de menú, que muestra el historial de nivel, temperatura y alarmas almacenadas en la base de datos; (c) se permite realizar una encuesta manual al tanque y la solicitud de los datos del mismo; (d) la barra de estado, que indica la conectividad del tanque; (e) la fecha y hora de la última medición registrada y almacenada en la base de datos constituye otro de los elementos que conforman el panel de grupo de tanques; (f) la barra de estado del grupo de tanques del sistema está compuesta por un indicador de estado del servidor; (i) también se encuentra la presencia de un indicador de alarmas; (g) en la misma se pueden realizar la modificación de las tablas de configuración de las variables del sistema; (h) el control manual del actuador y (j) el encendido y apagado manual de la aplicación de consola.

Como se ha descrito anteriormente, uno de los datos que puede brindar la aplicación web es la información sobre el historial, ella permite visualizar los datos almacenados en la base de datos donde se aprecia la fecha, la hora y el nivel que el tanque tenía en el instante de la medición. Un ejemplo de cómo se muestra dicha información se presenta en la Figura 13.

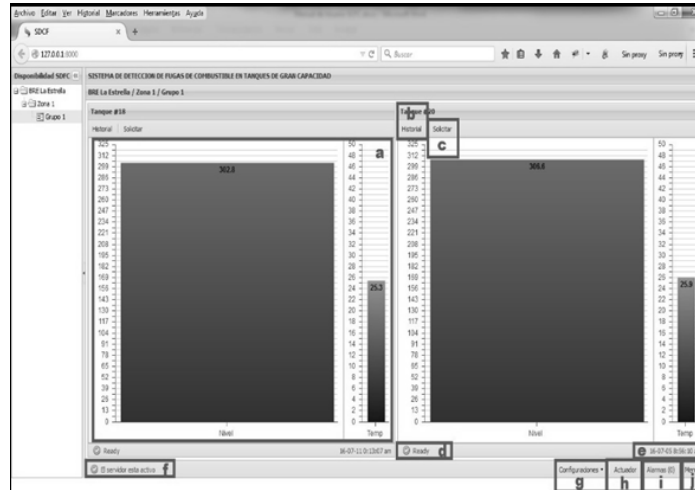


Figura 12. Componentes del sistema de medición.

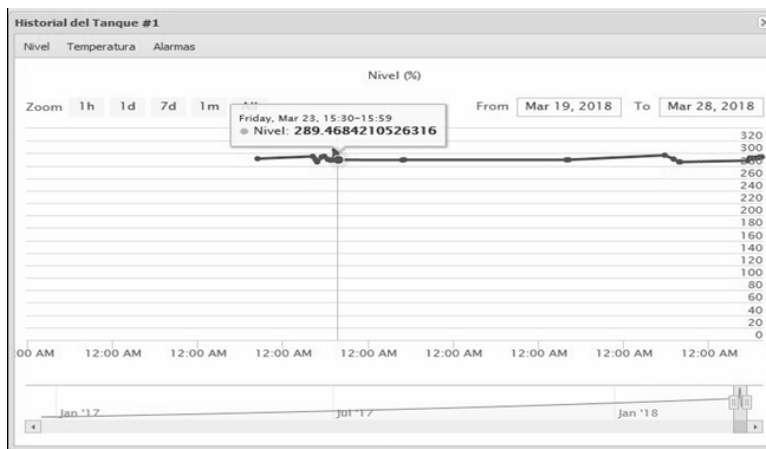


Figura 13. Historial del nivel del tanque.

La aplicación web también brinda información sobre los datos del tanque analizado con respecto a la temperatura, lo cual se puede ver en la Figura 14; también se muestran los mismos parámetros que para el caso de la medición de nivel. Los valores del nivel y de la temperatura mencionados anteriormente son guardados en el historial del tanque, donde además de estos se muestran las alarmas históricas ocurridas en el sistema durante el tiempo de trabajo. En el registro general del tanque se observan valores característicos como la fecha, la hora, la fuente y el destino de la información y los valores mínimos y máximos que podrá tomar el tanque.

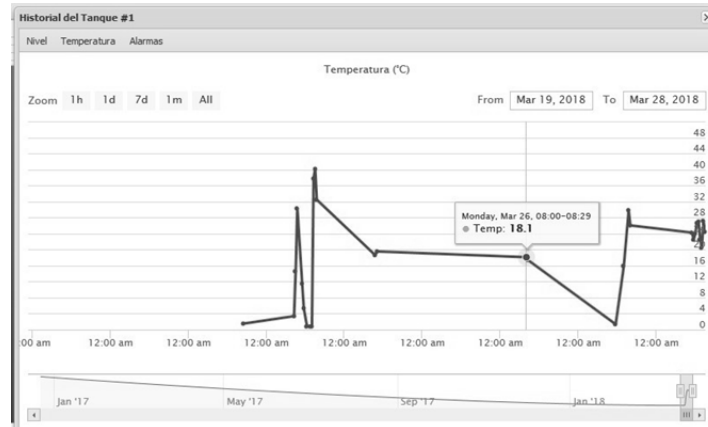


Figura 14. Historial de la temperatura del tanque.

## 5. Análisis económico del sistema de medición de nivel

El costo del sistema para un solo depósito conectado es de 1736.76 dólares, como se muestra en la Tabla IV; sin embargo, este precio no sería igual para la instalación de otro depósito en el mismo sistema. La instalación de un segundo depósito tendría un costo de 637 dólares, pues la compra de la PC, del cable de alimentación y de los módulos XBee ya no sería necesaria; lo anterior demuestra la disminución del costo del sistema comparado con otros en el mercado mundial, como es el caso de Siemens y Vega, los cuales tienen costos aproximados de 2339 y 2033 dólares respectivamente [2], [4], dichos montos no tienen en cuenta el precio de la PC, del receptor y de los repetidores. Además, el costo del sistema de medición de nivel propuesto es inferior, comparado con otros existentes en el mercado nacional como, por ejemplo, el de la empresa ECASA, el cual tiene un costo de 2094 dólares. Haciendo una comparación de precios del sistema propuesto con los mencionados, se puede arribar la siguiente conclusión: el costo del sistema de medición propuesto representa un ahorro de 296, 357.24 y 602.24 dólares con respecto al costo de los sistemas de Vega, ECASA y Siemens respectivamente. La solución propuesta brinda bondades similares a las brindadas por los sistemas profesionales, tal es el caso de Banner, solución para la medición y el monitoreo de nivel que puede proporcionar datos precisos en tiempo real de los activos desplegados en zonas remotas y de difícil acceso.

## 6. Conclusiones

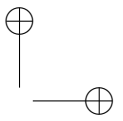
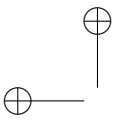
El objetivo fundamental de este trabajo fue cumplido de manera satisfactoria en tanto se logró realizar el monitoreo de manera continua, estable y remota al sistema, a través de una base de datos referente a los depósitos de combustible; además, la obtención de los parámetros de nivel y temperatura requeridos demostraron que el sistema constituye una herramienta útil para realizar el monitoreo de nivel en grandes depósitos. Los resultados anteriores posibilitaron que se pudiera llegar a las siguientes conclusiones:

**Tabla IV.** Almacenamiento de las pruebas de cobertura.

Descripción	U/M	Precio/ Aprox	Cantidad	Valor
Módulo Arduino	U	25.00 USD	1	25.00 USD
Componentes pasivos	U	313.00 USD	34	313.00 USD
Componentes activos	U	56.00 USD	18	56.00 USD
PC	U	592.00 USD	1	592.00 USD
Gasto mecánico	U	256.95 USD	1	256.95 USD
Antena	U	9.95 USD	1	9.95 USD
Cable	Rollo	234.20 USD	1	234.20 USD
Módulo XBee	U	25.95 USD	5	129.75 USD
Sensor de temperatura	U	89.24 USD	1	89.24 USD
Sensor de nivel	U	28.37 USD	1	28.37 USD
Potenciómetro de 10K	U	2.30 USD	1	2.30 USD
<b>Total</b>				<b>1 736.76 USD</b>

- La utilización de una antena externa permitió garantizar la entrega de la información de forma satisfactoria mediante una red wifi, aunque pudiese haber sido empleado otro transmisor que no requiriera la utilización de una antena externa.
- La comprobación de la cobertura del sistema fue realizada a través de establecer las similitudes entre las simulaciones y las mediciones en el terreno, aunque en algunos momentos la obtención de la cobertura dependía del lugar donde estuviese colocada la antena.
- El sistema de medición obtenido no solo fue capaz de realizar un monitoreo de forma continua y en tiempo real del nivel de líquido, sino que además brindó datos como la temperatura, siendo necesario para arribar a conclusiones sobre la fluctuación del nivel del líquido. Otro elemento atractivo de dicho sistema resultó ser la utilización de alarmas, lo cual le imprime gran capacidad de respuesta ante alteraciones de derrames o falta de comunicación durante su funcionamiento.
- El sistema de medición de nivel obtenido resulta menos costoso que los que se comercializan en el mercado internacional, contribuyendo así a la sustitución de importación.
- Con este sistema se logró obtener la información del nivel del líquido con una tasa de error comparado con la real de 0.1 mm, lo que resulta alto en comparación con algunos de los sensores que se comercializan en el mercado, pero provechoso para la aplicación que fue concebida.

Lo más interesante del trabajo es que pudo dotar a entidades cubanas como el Instituto Nacional de la Reserva del Estado de una herramienta automática que pudiera realizar la medición de nivel en tiempo real, el resultado obtenido ya está siendo utilizado por dicha entidad, proporcionándole mayor fiabilidad en el control del líquido.



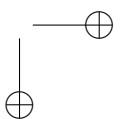
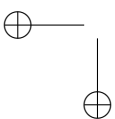
## 7. Trabajo Futuro

Teniendo en cuenta que el sistema de medición de nivel que en este trabajo se propone se encuentra desplegado a menor escala en dos unidades destinadas para el almacenamiento de combustible, sería conveniente reproducir el sistema en otras entidades que posean el mismo perfil de trabajo; lo anterior conllevaría a la formulación de las siguientes pautas para el desarrollo de trabajos futuros en esta línea de investigación:

- Aumentar la plataforma de comunicación, dotando al sistema de transmisores y repetidores con mayor potencia de salida.
- Constar con un sistema de alimentación fotovoltaico, permitiéndole al sistema una mayor autonomía.
- Aumentar la ganancia de las antenas empleada en el área de los depósitos, lo cual permitiría eliminar algunos de los repetidores del sistema y se lograría una mayor eficiencia en la comunicación.
- Explorar otras opciones de transmisores y de microcontroladores que sean compatibles para utilizarlo en el sistema de medición.

## Referencias

- [1] K. Loizou and E. Koutroulis, "Water level sensing: State of the art review and performance evaluation of a low-cost measurement system", *Measurement*, vol. 89, pp. 204-214, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.04.019> ↑30
- [2] Siemens, "Level measurement guide: for complete level solutions". [En línea]. Disponible en: <http://www.siemens.com/sensorsystems> ↑30, 44
- [3] P. Antunes, J. Dias, T. Paixão, E. Mesquita, H. Varum and P. André, "Liquid level gauge based in plastic optical fiber", *Measurement*, vol. 66, 238-243, 2015 <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.01.030> ↑30
- [4] Vega, "Measurement technology for level".. [En línea]. Disponible en: <http://www.vega-line.co.uk> ↑30, 44
- [5] K. Loizou, E. Koutroulis, D. Zalikas and G. Liontas, "A low-cost capacitive sensor for water level monitoring in large-scale storage tanks", in *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Sevilla, 2015. <https://doi.org/10.1109/ICIT.2015.7125295> ↑30
- [6] B. Jin, Z. Zhang and H. Zhang, "Structure design and performance analysis of a coaxial cylindrical capacitive sensor for liquid-level measurement", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 223, pp. 84-90, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2014.12.027> ↑30
- [7] H. Gong, H. Song, S. Zhang, K. Nia and X. Dong, "An optical liquid level sensor based on polarization-maintaining fiber modal interferometer", *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 205, 204-207, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.11.012> ↑30
- [8] C. W. Lai, Y. L. Lo, J. P. Yur, W. F. Liu and C. H. Chuang, "Application of Fabry-Pérot and fiber Bragg grating pressure sensors to simultaneous measurement of liquid level and specific gravity", *Measurement*, vol. 45, no. 3, pp. 469-473, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2011.10.026> ↑30
- [9] Lesman Instrument Company, "Level measurements instruments". [En línea]. Disponible en: <http://www.lesman.com> ↑31
- [10] F. A. López, R. A. Zurita, D. J. Cerven y E. C. Naranjo, "Medidor de Tipo Burbujeo". [En línea]. Disponible en: <http://instrumentacionuc.wixsite.com/facultad-ingenieria/copia-de-termistores-2> ↑32



- [11] J. A. Encinas, *Simulador de Temperatura de un Sensor RTD PT100 mediante MicroConvertidor ADuC812 e Interfaz de Usuario LabVIEW*, Tesis doctoral, Universidad Rovira i Virgili, España, 2011. ↑33
- [12] Divices Analog, "datasheets 7805". [En línea]. Disponible en: <http://www.farnell.com/datasheets/7805.pdf> ↑34
- [13] Divices Analog, "LM134, LM234, LM334". [En línea]. Disponible en: [www.ben.cz/\\_d/datasheet/lm334.pdf](http://www.ben.cz/_d/datasheet/lm334.pdf) ↑34
- [14] Divices Analog, "Low Cost, Low Power Instrumentation Amplifier AD620". [En línea]. Disponible en: <https://www.prome-lec.ru/pdf/ad620.pdf> ↑34
- [15] Divices Analog, "LT1078, LT1079". [En línea]. Disponible en: <http://www.farnell.com/datasheets/98087.pdf> ↑34
- [16] J. I. Vega, "Monitoreo remoto de nivel de agua usando el procesador de red Amber EM260", en *Congreso de Instrumentación*, México, 2014. ↑
- [17] M. B. Othón, A. Villalobos y A. García, "Diseño de sistema de monitoreo en tiempo real para aplicaciones hidrométricas y de calidad del agua", en *Ier Congreso Iberoamericano sobre Sedimentos y Ecología*, México, 2015 ↑35
- [18] A. Pérez, *Control y supervisión mediante un sistema microcontrolador de los parámetros de calidad de agua de un estanque*, Tesis de grado, Departamento de Ingeniería Electrónica, Universidad de Sevilla, España, 2017. ↑35
- [19] O. Pineño, "ArduiPod Box: A low-cost and open-source Skinner box using an iPod Touch and an Arduino microcontroller", *Behavior Research Methods*, vol. 46, no. 1, pp. 196-205, 2014. <https://doi.org/10.3758/s13428-013-0367-5> ↑35
- [20] A. D'Ausilio, "Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment", *Behavior Research Methods*, vol. 44, no. 2, pp. 305-313, 2012. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0163-z> ↑35
- [21] D. Diakopoulos and A. Kapur, "HIDUINO: A firmware for building driverless USB-MIDI devices using the Arduino microcontroller", in *Proceedings of the International Conference on New Interfaces for Musical Expression*, 2011. ↑35
- [22] R. Faludi, *Building wireless sensor networks: with ZigBee, XBee, arduino, and processing*. California: O'Reilly Media, Inc., 2010. ↑35, 36
- [23] V. Boonsawat, J. Ekchamanonta, K. Bumrunghet and S. Kittipiyakul, "Xbee wireless sensor networks for temperature monitoring", in *The second conference on application research and development (ECTI-CARD)*, Chon Buri, Thailand, 2010. ↑35
- [24] O. Rossell, "Manuales Fabricación Antenas Caseras". [En línea]. Disponible en: <http://www.qsl.net/cx1ddr//descargas/antenas-caseras-wifi.pdf> ↑37
- [25] M. G. López y D. González, "Proyecto de diseño de una red inalámbrica de sensores de bajo coste". [En línea]. Disponible en <https://upcom-mons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24385/4.%20Manual.pdf?sequence=4&isAllowed=y> ↑41

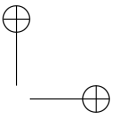
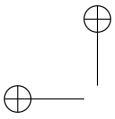
### Reinier Quiala Llorens

Nació en La Habana, Cuba. Es Ingeniero en Radioelectrónica, graduado del Instituto Técnico Militar "José Martí", de La Habana, Cuba. Obtuvo el título de magíster en Telecomunicaciones en la Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba en 2018. Se desempeñó como investigador en el CIDP "Grito de Baire" durante 4 años. Actualmente se desempeña como técnico de la calidad en la misma institución a Institución, cargo que ocupa hace 1 año. Correo electrónico: reinier@gb.reduim.cu.

### Fidel E. Hernández Montero

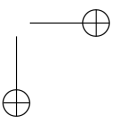
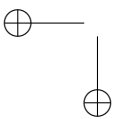
Nació en Pinar del Río, Cuba. Es Ingeniero en Telecomunicaciones y Electrónica de la Universidad de Pinar del Río, Cuba. Obtuvo su título de magíster en Sistemas Digitales en la Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba. Obtuvo su PhD en la Universidad Tecnológica de La Habana, La Habana, Cuba. Actualmente se desempeña como profesor en el área del procesamiento de señales en la Universidad Tecnológica de La Habana, Cuba, y pertenece como jefe del grupo de investigación sobre el monitoreo de marcha donde realiza estudios sobre el análisis de las señales de aceleración de la marcha humana. Correo electrónico: fhernandezh@tele.cujae.edu.cu

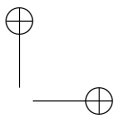
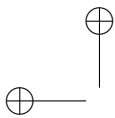




**Ailén Pérez Molinet**

Nació en Matanzas, Cuba. Es Ingeniera en Telecomunicaciones y Electrónica, graduada de la Universidad de la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba. En la actualidad desarrolla el proyecto destinado al monitoreo de la marcha empleando acelerómetro para pacientes con enfermedades neurodegenerativa y se desempeña como profesora en el área de las Comunicaciones Inalámbricas en la Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Cuba. Sus investigaciones están relacionadas a estudios sobre el envejecimiento y la marcha humana de pacientes con enfermedades neurodegenerativas. Correo electrónico: ailen@tele.cujae.edu.cu.





## Comparative Analysis of the Performance of Mono-crystalline and Polycrystalline PV modules in weather conditions of Fusagasugá

*Análisis Comparativo del Rendimiento de los Módulos Fotovoltaicos Monocristalino y Policristalino bajo Condiciones Climáticas de Fusagasugá*

**Luisa F. Sanabria Pérez<sup>1</sup> Luz A. Cruz Pardo<sup>1</sup> Yimy E. García Vera<sup>2</sup>  
Carlos H. Montufar Benavides<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Universidad de Cundinamarca Fusagasugá – Colombia, <sup>2</sup>Universidad de San Buenaventura Bogotá - Colombia.  
Correspondence: yegarcia@usbog.edu.co

Recibido: 24/08/2018. Modificado: 16/11/2018. Aceptado: 22/01/2019.

### Abstract

**Context:** To meet the world's energy demand, photovoltaic solar energy has emerged as a sustainable, environmentally friendly renewable energy, used as an alternative to mitigate climate change caused by the use of energy from fossil fuels. therefore, it is very important to study the behavior of these photovoltaic modules under real operating conditions.

**Method:** Two stand-alone photovoltaic systems were implemented, one of monocrystalline technology and another polycrystalline, each of data acquisition system of temperature, humidity, voltage and current, which are acquired in a synchronized manner over a period of 3 months, under local weather conditions of Fusagasugá.

**Results:** The temperature, humidity, irradiance, voltage and current data are used to obtain curves showing the energy performance of the polycrystalline and monocrystalline modules.

**Conclusions:** The results of this study can help predict the output characteristics of photovoltaic system, mainly when the weather conditions change such as temperature, humidity and irradiance. A better performance of the monocrystalline module in the polycrystalline is evidenced.

**Keywords:** Irradiance, monocrystalline, photovoltaic module, polycrystalline.

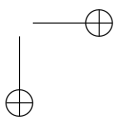
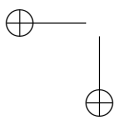
**Language:** Spanish

### Open access



Cite this paper as: L. F. Sanabria; L. A. Cruz; Y. E. García and C. H. Montufar, "Comparative Analysis of the Performance of Monocrystalline and Polycrystalline PV modules in wheater conditions of Fusagasugá", Ingeniería, Vol. 24, Num. 1, pp. 49-63, January-April 2019.

© The authors; reproduction right holder Universidad Distrital Francisco José de Caldas.  
DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13751>



### Resumen

**Contexto:** Para satisfacer la demanda de energía mundial, la energía solar fotovoltaica ha emergido como una energía renovable, sostenible y amigable con el medio ambiente, usada como alternativa para mitigar el cambio climático causado por uso de energías provenientes de los combustibles fósiles; pensando en ello, es muy importante estudiar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos en condiciones reales de funcionamiento.

**Método:** Se implementan dos sistemas fotovoltaicos autónomos similares, uno con módulo policristalino y otro monocristalino, cada uno con sistema de adquisición de datos de temperatura, humedad, voltaje y corriente, los cuales son adquiridos de forma sincronizada por un periodo de tres meses bajo condiciones climáticas locales de Fusagasugá.

**Resultados:** Los datos de temperatura, humedad, irradiancia, voltaje y corriente se utilizan para obtener curvas que muestran el rendimiento energético de los módulos policristalinos y monocristalinos.

**Conclusiones:** Los resultados de este estudio pueden ayudar a predecir el comportamiento de salida de un sistema fotovoltaico, principalmente cuando las condiciones climáticas como humedad, temperatura y radiación cambian. Se evidencia un mejor desempeño del módulo monocristalino que el policristalino.

**Palabras clave:** Irradiancia, módulo fotovoltaico, monocristalino, policristalino.

**Idioma:** Español

## 1. Introducción

En la actualidad, 6,6 billones del total de la población mundial disponen de energía eléctrica, sin embargo, cerca de 1 billón de personas no la tienen o tienen un acceso limitado a esta [1]; gran parte de esta energía es obtenida de combustibles fósiles como gas, carbón y petróleo, causantes de las emisiones de gases efecto invernadero y el calentamiento global.

Es evidente el aumento de la preocupación de muchos países por reducir la dependencia de combustibles fósiles, por lo cual muchos de ellos han optado por el uso de fuentes alternativas de energía que permitan, de alguna manera, asegurar su suministro energético, contribuyendo a la reducción de gases efecto invernadero y de forma paralela a la mitigación del cambio climático [2].

Una de las fuentes de energía alternativa y renovable que ha crecido de forma vertiginosa es la energía solar fotovoltaica, principalmente debido a la reducción de costos y aumento en su eficiencia, razones que la hacen una opción viable para producción de energía con el valor agregado de su bajo nivel de emisiones; su vida útil oscila entre unos veinte a veinticinco años, ha sido incluida como una energía viable para suministro de energía en las zonas interconectadas de países como Colombia, que debido a su posición geográfica presenta gran potencial para este tipo de energía renovable [3].

Las celdas solares son dispositivos que convierten los fotones en energía eléctrica de corriente continua, son fabricadas con películas finas a base de silicio, generando voltajes en rangos pequeños entre 0,5 y 0,8 voltios; sus eficiencias varían con la tecnología de fabricación, siendo las más comunes las de silicio policristalino y monocristalino, con eficiencias entre un 13% y 17% respectivamente. De la conexión serie paralelo de celdas se obtienen los módulos solares que son fabricados mediante pruebas de desempeño o condiciones estándar de prueba (STC, por sus siglas en inglés), los ensayos se realizan con una irradiación de  $1000 \text{ W/m}^2$ , una temperatura ambiente

de 25°C y una masa de aire de 1.5; sin embargo, estas condiciones no se cumplen en tanto que las condiciones de operación reales dependen del lugar geográfico donde se instalan y su eficiencia se puede ver afectada por las condiciones atmosféricas y climáticas [4].

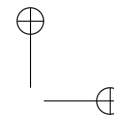
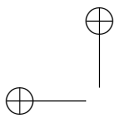
Este artículo evalúa el rendimiento energético de dos tecnologías de módulos fotovoltaicos comercialmente más usadas en el mercado colombiano, siendo estas la de silicio monocristalino y policristalino; las variables evaluadas son la temperatura y humedad; las pruebas se realizaron durante cerca de tres meses, a diferentes horas del día en la Universidad de Cundinamarca, Fusagasugá.

## 2. Antecedentes

El rendimiento de las celdas fotovoltaicas depende en gran proporción de las condiciones climáticas a las que se ven sometidas, debido principalmente a que estas en su fabricación son ensayadas bajo ambientes de laboratorio que se conocen como STC; no obstante, difieren de las condiciones en el sitio de instalación ya que muchas deficiencias en el rendimiento se debe principalmente a variaciones de condiciones ambientales como irradiación, temperatura y humedad [5], por lo tanto, el conocimiento y la comprensión del rendimiento del módulo fotovoltaico en las condiciones de operación de sitio de instalación es de gran importancia para la correcta selección del producto y la predicción de su rendimiento energético.

Se han realizado diferentes estudios para determinar de qué manera afectan las condiciones atmosféricas los módulos fotovoltaicos; así, en el caso de [6], los autores presentan un trabajo de análisis comparativo entre módulos solares, los resultados presentados concluyen que el más eficiente es el de película delgada respecto a los monocristalinos y policristalinos. Otros trabajos [7] incluyen comparación de más de tres tecnologías de celdas solares y estudian el funcionamiento de sistemas fotovoltaicos bajo diferentes condiciones climáticas, se comparan módulos fotovoltaicos policristalino, monocristalino, silicio amorfo y CIS (cobre, indio, selenio); este análisis realizado en Malasia concluye que, para esta latitud, las celdas CIS tuvieron un mejor desempeño. Por su parte, en [8] los autores evaluaron el desempeño de módulos policristalino y silicio amorfo en condiciones al aire libre, evidenciando que este último tiene mejor eficiencia y potencia en los meses de verano. En otras investigaciones presentadas [9] se comparan las tecnologías monocristalinas, policristalina y silicio amorfo, concluyen que las dos primeras muestran mejor eficiencia con alta irradiancia, mientras que las celdas del silicio amorfo presentan mayor razón de desempeño con baja irradiancia debido a su mejor capacidad de absorción de luz solar.

La temperatura es un parámetro importante en el rendimiento de una celda fotovoltaica, ha sido publicado por diferentes investigadores [10]–[12]. Se destaca el descenso de los voltajes de circuito abierto, lo que tiene como consecuencia una disminución del rendimiento; otros autores como [13] estudiaron el efecto de la temperatura ambiente, el desempeño de módulos fotovoltaicos en regiones tropicales, concluyendo que existe una relación de proporcionalidad entre la temperatura ambiente y la potencia de salida de un módulo fotovoltaico. Otros importantes factores que afectan el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos como temperatura ambiente y acumulación de polvo son analizados en [14], [15], en estos trabajos se destaca la importancia del mantenimiento en zonas desérticas donde la acumulación de polvo y partículas pueden afectar el desempeño de



los módulos solares. El viento es otro factor considerado en investigaciones como la presentada en [16], en este trabajo se estudian modelos de temperatura con balances energéticos, teniendo en cuenta la temperatura ambiente, la irradiación y la velocidad del viento.

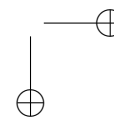
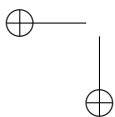
Muchos de los estudios realizados para verificar el comportamiento de los módulos solares se realizan teniendo en cuenta parámetros como irradiación y temperatura; en [17] se comparan las tecnologías policristalina y monocristalina, los resultados indican una relación directa entre la corriente generada por los módulos y la irradiación, además de una independencia de la temperatura, sin embargo, existe un decremento del voltaje por incremento de la temperatura. Otros estudios como el realizado en [18] muestran un mejor desempeño de los módulos monocristalinos sobre policristalinos para una latitud como la de Turquía.

El trabajo titulado “Estudio comparativo del rendimiento de tres diferentes tecnologías fotovoltaicas”, realizado por [19], es un proyecto que básicamente usa simulación mediante el *software Pvsyst*, realiza un análisis comparativo de diferentes tecnologías fotovoltaicas (PV), módulos de tipo policristalino, monocristalino y película delgada que fueron los elegidos para el desarrollo de las pruebas de modelamiento y simulación; los datos meteorológicos usados parten la base de datos de la Nasa, los resultados demuestran que para el lugar geográfico de instalación la tecnología de mejores prestaciones fue la policristalina.

Existen otros trabajos previos realizados en Colombia donde se comparan las tecnologías más comunes encontradas en el mercado, se subraya la tesis propuesta por [20], donde se realiza un estudio comparativo entre las tecnologías monocristalina y policristalina; no se presentan, sin embargo, resultados concluyentes sobre cuál de las dos tuvo mejor rendimiento energético salvo el comportamiento similar para condiciones de circuito abierto. Por otra parte, en [21] se realiza un estudio de eficiencia de módulos fotovoltaicos en la ciudad de Bogotá D.C., teniendo en cuenta variaciones climáticas como temperatura, humedad e irradiancia; se muestra un mejor desempeño de los módulos monocristalinos, no obstante, se encuentra que su rendimiento está por debajo del especificado por el fabricante.

Los trabajos anteriores relacionados con el rendimiento de los módulos solares de tecnologías comerciales como policristalina y monocristalina han servido de referencia para este estudio y potencian la importancia de conocer el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos en condiciones al aire libre; sin embargo, muchas de las investigaciones previas solo comparan funcionamiento de los módulos solares bajo condiciones de circuito abierto y corto circuito, que son pruebas habituales de laboratorio. Es necesario realizar análisis de las prestaciones de las celdas solares en condiciones reales, esto es, bajo condiciones climáticas del emplazamiento o sitio de instalación y bajo variaciones de carga que pueden afectar la tensión de salida.

Por lo anteriormente expuesto, es de gran importancia determinar la eficiencia de los diferentes tipos de módulos solares en condiciones reales de instalación, puesto que la eficiencia que dan los fabricantes es establecida en condiciones controladas de laboratorio y está demostrado que esta se ve afectada por variables ambientales tales como temperatura, irradiación y humedad.



### 3. Materiales y métodos

#### 3.1. Diseño experimental

Para este trabajo de investigación se han dispuesto dos módulos solares de potencia similar (20 W), cuyas especificaciones se pueden observar en la Tabla I, uno de tecnología monocristalina y otro policristalina.

**Tabla I.** Cuadro comparativo de módulos fotovoltaicos.

Características	Policristalino	Monocristalino
Potencia pico (W)	20	20
Corriente a la máxima potencia (A)	1.111	1.16
Voltaje a la máxima potencia (V)	18	17.2
Voltaje de circuito abierto (V)	22.50	21.50
Corriente de corto circuito (A)	1.202	1.25
Peso (Kg)	1.9	2.2
Dimensiones (mm)	440*350*25	510*290*25
Voltaje del sistema (VDC)	750	1000 V

Fuente: elaboración propia

La eficiencia de cada módulo fotovoltaico se calcula mediante la ecuación (1).

$$\eta = \frac{P_{max}}{G * A} * 100 \% \quad (1)$$

Donde  $P_{max}$  es la potencia máxima del módulo,  $G$  la Radiación estándar de  $1000W/m^2$  y  $A$  el Área del módulo en metros cuadrados.

$$\eta = 100 \% * \left( \frac{20w}{0,510m * 0,290m * \frac{1000W}{m^2}} \right) = 13,52 \% \quad (2)$$

Eficiencia del módulo Policristalino.

$$\eta = 100 \% * \left( \frac{20w}{0,440m * 0,350m * \frac{1000W}{m^2}} \right) = 12,98 \% \quad (3)$$

Comparando las áreas de los módulos, se observa una mayor eficiencia del módulo monocristalino para prácticamente la misma área de captación de irradiación. En la Figura 1 se observa una fotografía del sitio de instalación realizada en la tercera planta del auditorio Emilio Sierra de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá; para una captación óptima se tuvo en cuenta tanto la latitud del lugar ( $4^{\circ}20'14.1''$ norte  $74^{\circ}22'17.8''$  oeste) como la orientación hacia al sur, y se optó por una inclinación de  $15^{\circ}$  según lo recomendado por la UPME, teniendo en cuenta la latitud de  $4^{\circ}$  del lugar  $+10^{\circ}$  de inclinación para tener en cuenta factores como limpieza.

Para este estudio se han usado dos sistemas fotovoltaicos autónomos de baja potencia, cada uno con tecnología diferente, uno monocristalino y otro policristalino; cada sistema cuenta con módulo fotovoltaico regulador de carga, batería, y cargas variables en corriente directa. Para el dimensionado y autonomía se tuvieron en cuenta las bases de datos de radiación del IDEAM [22], el sistema

se dimensionó con el método del mes de peor radiación, que para el caso de Fusagasugá es el mes de noviembre o diciembre, para ambos meses se tiene un promedio más bajo de radiación [23].



Figura 1. Panorámica del sistema en funcionamiento.

En la Figura 2 se muestra un esquema completo donde se aprecian tanto los módulos fotovoltaicos como los reguladores de carga; el sistema de almacenamiento son baterías tipo Netion de 12V/12AH, esta es una batería seca de libre de mantenimiento, de ciclo profundo, de alto rendimiento y resistencia eléctrica contra descargas excesivas. Los reguladores de carga son de tipo PWM con un rango de corriente de 10 A/ 12 V.

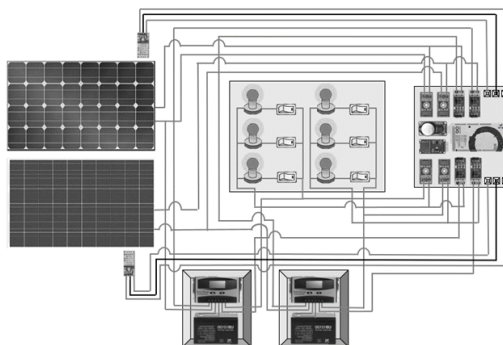


Figura 2. Esquema general del sistema implementado.

El cuadro de cargas de prueba usado son lámparas led de variable por medio de conmutación, cada uno con una variación entre 6 W mínimo y 20 W para cada módulo que se relacionan en la Tabla II.

Tabla II. Cuadro de cargas de prueba.

Carga/tipo	Potencia unitaria	Cantidad	Horas	Consumo
Led	6 W	1	3	18 Wh
Led	7 W	2	4	56 Wh
			<b>Total</b>	<b>74 Wh día</b>

Fuente: elaboración propia

Estableciendo un día de autonomía, teniendo en cuenta las pérdidas del sistema y usando como criterio de diseño un sobredimensionamiento de 25 % y una irradiancia de 4,6 kWh/m<sup>2</sup> día, como criterio de diseño para un sistema autónomo se ha elegido el mes de peor radiación, la tabla de radiación para el emplazamiento es obtenido de la herramienta SWERA [24].

Donde  $F_s$  es el factor de seguridad de un 25 %, consumo Wh y radiación 4.6 kW/ m<sup>2</sup> día.

$$P = \frac{F_s * Consumo}{Radiacion} \quad (4)$$

De la ecuación anterior, y teniendo en cuenta que la potencia del generador  $P$  debe ser de 20 W, se despeja el consumo obteniendo 73,6 Wh. día) (74 Wh. día). El factor de seguridad de un 25 % es para compensar las pérdidas en baterías y otros componentes. Se establece la capacidad de la batería mínima con la ecuación (5).

$$Cbateria = \frac{Consumo * diasdeautonomia}{PD * V} \quad (5)$$

Donde  $PD$  es la profundidad de descarga de la batería y  $V$  es el voltaje del generador

$$Cbateria = \frac{74 * 1}{0,8 * 12} = 7,7A/h \quad (6)$$

La batería obtenida para cada sistema es de 7.7 A/h, por lo que se ha seleccionado un valor comercial de 10 A/h cada una, cubriendo de esta forma la autonomía considerada de un día.

### 3.2. Sistema de adquisición de datos

Con el propósito de medir las variables de temperatura y humedad en cada uno de los módulos, al igual que los voltajes y corrientes suministrados a la carga (Figura 3) para estimar la potencia, se implementó un sistema de adquisición de datos [25] que permite guardar las variables medidas en un archivo *datalogger* con extensión CSV. En el sistema de adquisición de datos se empleó la tarjeta Arduino Mega 2560 R3, la cual cuenta con suficientes entradas analógicas y pines digitales, cuatro módulos sensores de voltaje con un rango de detección entre 0.02445V a 25V, cuatro sensores de corriente ACS712 de rango de medición disponible hasta 20 A y dos sensores de temperatura y humedad DHT11, estos sensores miden las corrientes y voltajes tanto del módulo como en la carga, y en el caso del sensor DHT11 proporcionó el dato de temperatura sobre cada módulo fotovoltaico.

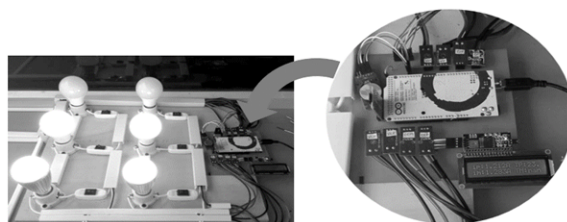
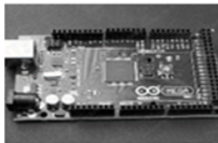
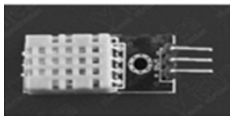





Figura 3. Vista del sistema en funcionamiento.



Con el fin de obtener mayor claridad en la medición de las variables, se utilizó un módulo reloj de la precisión RTC DS3231 para conocer la fecha y la hora exacta de la toma de los datos, así como también un módulo lector de micro SD para el almacenamiento de los registros en una base de datos que permitiera su posterior análisis; por otra parte, las mediciones de los niveles radiación y temperatura ambiente se hicieron de forma manual, los datos fueron adquiridos durante los meses de marzo, abril y mayo de 2018, con un promedio de ocho horas y en condiciones climáticas diferentes: días nublados y otros claros. Se ha incluido un solarímetro para medir la irradiación del lugar. En la Tabla III se resumen los instrumentos utilizados.

**Tabla III.** Dispositivos de medida usados en la etapa de instrumentación.

Equipo	Especificaciones	Vista
Arduino	Placa Arduino mega 2560 R3.	
Sensor de temperatura y humedad	Sensor DHT11. Sensor de temperatura: 100K 1 % termistor. Sensor de humedad: HR202 resistencia a la humedad. Voltaje de operación: 3V~5.5V.	
Sensor de voltaje	Rango de entrada de voltaje: 0V ~25V. Rango de detección de voltaje: 0.02445V ~25V. Resolución analógica de tensión: 0.00489V.	
Sensor de corriente	Voltaje de alimentación: 5V. Máximo voltaje inverso: 0.1V. Corriente de salida: 3mA (Fuente) 10mA (inversa). Voltaje de salida: 0V~5V. Rangos disponibles (Capacidad de corriente): 20 <sup>a</sup>	
Solarímetro	SM206. Medidor de radiación. 0.1-399.9 W/m <sup>2</sup> , 1-3999 W/m <sup>2</sup> .	

Fuente: elaboración propia

## 4. Resultados y Discusión

Dentro de este estudio se ha tenido en cuenta el rendimiento energético de dos módulos, uno monocristalino y otro policristalino, bajo diferentes condiciones de carga y con condiciones climáticas al aire libre; los dos sistemas son de igual potencia pico (20 W). Para este análisis se han tenido en consideración los datos proporcionados por el IDEAM [26] sobre temperatura promedio en la ciudad de Fusagasugá (Figura 4). Se obtuvieron temperaturas medias entre los 15,2° mínimo y 21,8° máximo.

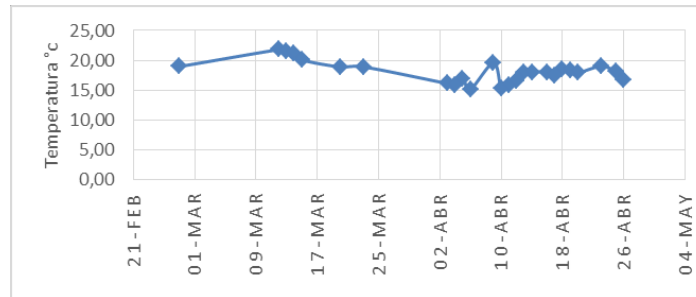


Figura 4. Temperatura promedio de Fusagasugá.

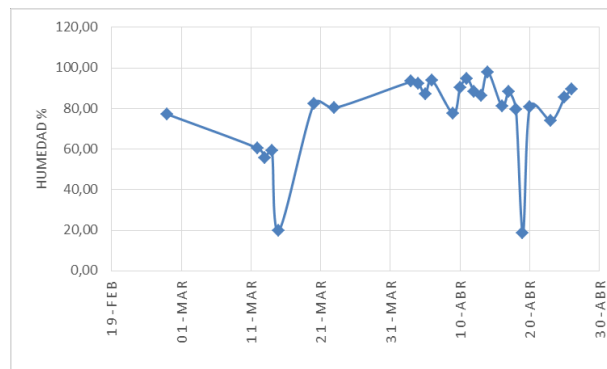


Figura 5. Humedad relativa promedio de Fusagasugá.

En cuanto a la temperatura del aire, esta se mantuvo en un promedio de 18,11°C, teniendo un máximo de temperatura de 21,8 °C y 19,61 °C los días 12 marzo y 9 de abril y una reducción durante el mes de abril con temperaturas mínimas de hasta 15,2 °C los días 6 y 10 de abril.

En cuanto a datos de humedad relativa, se pueden observar en la Figura 5; los datos para el municipio de Fusagasugá durante el tiempo de toma de datos tienen un promedio del 77 %, en la gráfica se pueden evidenciar dos días de baja humedad que son los días 15 de marzo y 19 de abril, con un valor de 19,98 % y 18,48 % respectivamente, y el de mayor humedad el día 14 de abril con 97,80 %.

La variación de la temperatura de cada módulo y la temperatura ambiente se diferencian en forma notoria debido a la producción de calor generada por el proceso fotovoltaico (Figura 6); como se expone en [9], la mayoría de radiación que impacta sobre una celda solar no es convertida a electricidad, sino que se convierte en calor, aumentando de esta manera la temperatura propia del módulo, tal y como ha sido expuesto por otros autores en [27].

Algunos estudios preliminares muestran la relación inversa entre la humedad relativa y la eficiencia de los módulos fotovoltaicos [28], el aumento de los niveles de humedad disminuye la corriente y el voltaje de salida de los módulos y, en consecuencia, la potencia de salida, lo anterior se debe a que entre mayor sea la cantidad de humedad en el aire, mayor será la cantidad de vapor de agua presente; las partículas del vapor de agua producen absorción, reflexión (difusa y no difusa), refracción y colisión de las partículas de radiación solar, esto puede resultar en la reducción de la radiación solar [29].

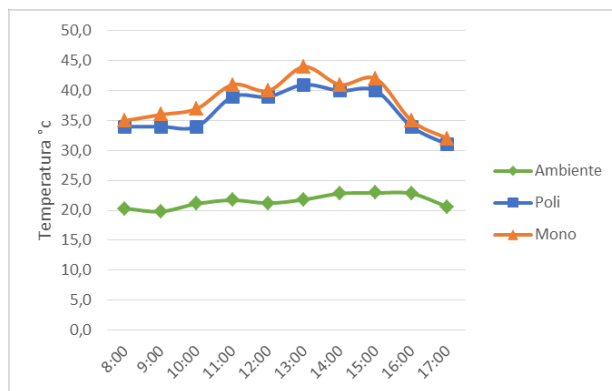


Figura 6. Comparativo de temperatura alcanzada por cada módulo vs temperatura ambiente (5 de abril).

En la Figura 7 se observa cómo la potencia de los módulos fotovoltaicos disminuye cuando los niveles de humedad aumentan, el caso del día 15 de marzo donde la humedad fue de 19,9 %, la potencia del módulo monocristalino fue de 10,4 W y del policristalino de 13,1 W, en tanto que el día 14 de abril, cuando la humedad estaba en 97,8 %, la potencia de los módulos disminuyó en 4,87 W y 3,13 W en el módulo policristalino y monocristalino respectivamente.

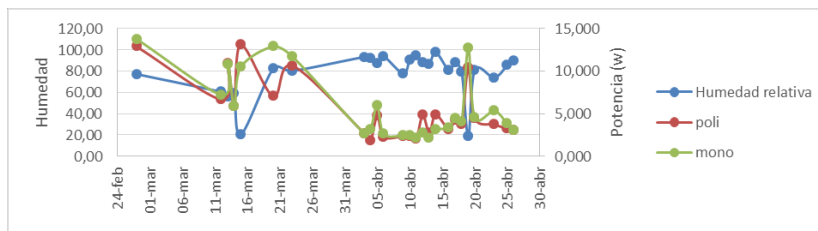
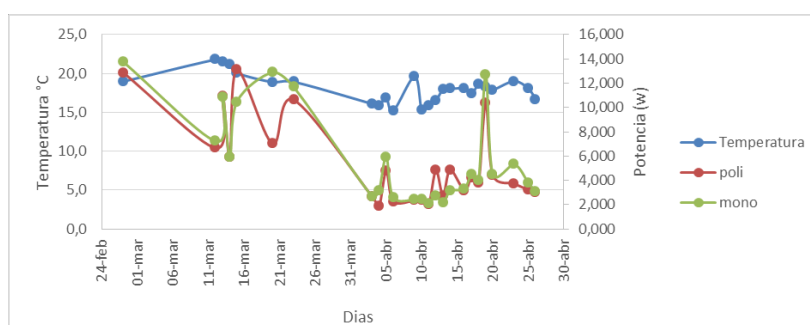


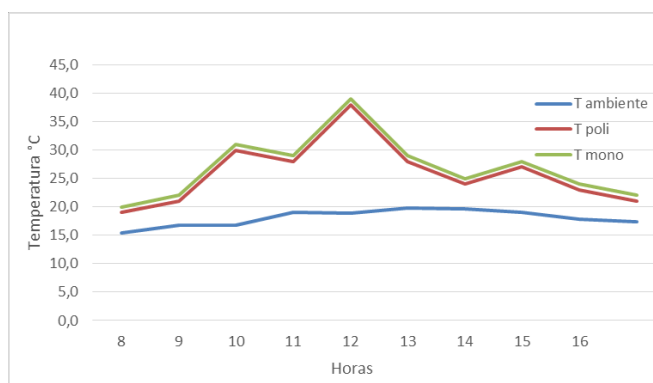
Figura 7. Humedad relativa vs potencia entregada por cada módulo.

En la Figura 8 se observa la potencia generada por los dos sistemas con respecto a la temperatura ambiente, sin embargo, es claro que todas las celdas solares tienen un coeficiente de pérdidas por temperatura, los resultados muestran un desempeño similar para el mes observado.



**Figura 8.** Temperatura ambiente vs potencia entregada por cada módulo.

En la Figura 9 se ha seleccionado el día 25 de abril para observar la variación de temperatura del módulo es solares y la temperatura ambiente, la temperatura de los módulos es fue obtenida desde las 8 am hasta las 16 pm, con una frecuencia de tres segundos, es decir, veinte muestras por minuto. Se observan temperaturas cercanas a los 40°, ambos módulos son en horas cercanas a medio día.



**Figura 9.** Comparativa temperatura de los módulos y temperatura ambiente.

La irradiancia es otro parámetro que se tuvo en cuenta para evaluar el desempeño de ambos módulos, en la Figura 10 se presenta una curva comparativa de la potencia entregada versus irradiancia para el día 26 de abril, con una carga nominal de 7 W se observa un mejor desempeño de la tecnología monocristalina, salvo en el intervalo entre la 1 y 2 pm donde presentó prácticamente los mismos resultados de potencia para un caso de irradiancia muy baja.

Para verificar el funcionamiento de los módulos fotovoltaicos con carga se obtuvo la Figura 11, en este caso la prueba se hizo con una carga led de 7 W, en los resultados se subrayan mejores prestaciones del módulo monocristalino en el intervalo de tiempo analizado. Esta mayor de potencia

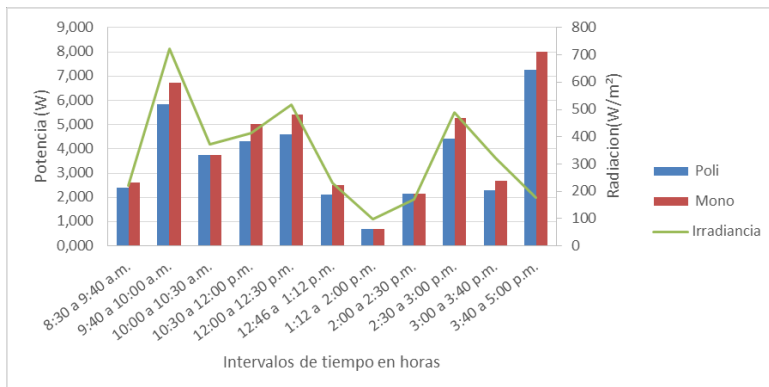


Figura 10. Curva de potencia suministrada para una carga de 7 W.

de salida también se traduce en mayor eficiencia, ya que ambos paneles solares tienen la misma área y potencia teórica al ser la eficiencia igual,  $n = P_{sal} / P_{ent}$ , para una misma potencia de entrada el factor de conversión a potencia útil  $P_{sal}$  hace que la eficiencia sea mayor.

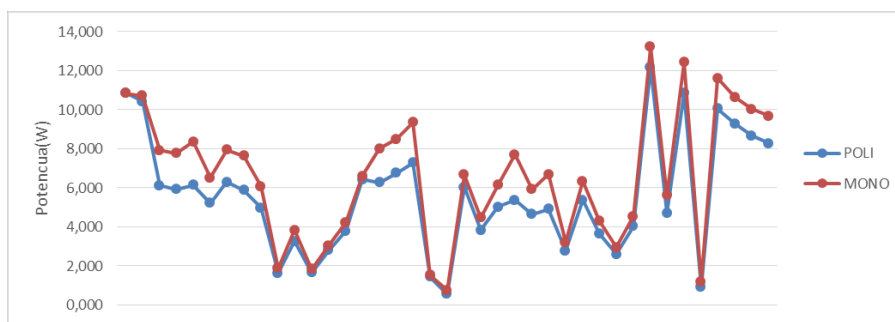
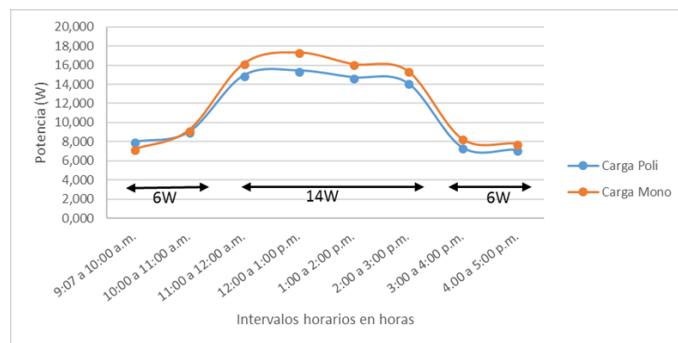


Figura 11. Curva característica de potencia con carga de 7 W (mes de abril).

Para comparar variaciones de carga y salida de potencia de los dos sistemas se realizaron variaciones de carga, se obtuvo una gráfica como la presentada en la Figura 12 para un día soleado como fue el 9 de abril, donde se observa un mejor desempeño del módulo monocristalino, esto se diferencia de forma notoria al aumentar la potencia demandada por la carga (14 W), la diferencia es de 1,9 W.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo de se ha estudiado en forma comparativa el desempeño de dos módulos fotovoltaicos, uno monocristalino y otro policristalino, bajo las condiciones climáticas de Fusagasugá. La comparación ha sido realizada implementando dos sistemas fotovoltaicos autónomos de similares características de carga.



**Figura 12.** Curva característica de potencia con carga de 7 W (mes de abril).

En cuanto a la temperatura de los módulos, esta estuvo casi siempre por encima de la temperatura ambiente debido al calor producido durante el proceso fotovoltaico; sin embargo, la temperatura decae en las horas de la tarde, de igual manera que la salida de potencia de los módulos, aunque no se observaron pérdidas importantes por temperatura.

Se demostró que la humedad relativa tiene una influencia en el desempeño de los módulos fotovoltaicos, esto debido a factores de reflexión y refracción que afectan los niveles de radiación, trae como consecuencia una disminución de la potencia que entrega cada módulo fotovoltaico. Los resultados evidencian una correlación inversa entre los valores de humedad relativa y corriente suministrada por cada módulo fotovoltaico, los incrementos en los valores de humedad relativa causan una disminución en la corriente y, por ende, en la potencia de salida.

Se evidencia un mejor desempeño del módulo monocristalino ante variaciones de carga con una diferencia cercana las 2 W respecto al módulo policristalino, esta diferencia se hizo más notoria cuando la carga fue de 14 W nominales y menos notoria para cargas de 6 W.

Al presentar el módulo monocristalino mayor potencia de salida para una misma potencia de entrada que el panel policristalino, la eficiencia que relaciona la potencia de salida sobre la potencia de entrada también es mayor.

Se observa un rendimiento energético con características similares en las dos tecnologías ante variaciones de irradiancia y temperatura, esta tendencia se marca de forma notoria al aumentar la carga conectada a los dos sistemas. Los resultados de este estudio pueden ayudar a predecir las características de salida del sistema fotovoltaico autónomo, principalmente cuando cambian las condiciones atmosféricas, como la temperatura, humedad y la irradiancia, las cuales permitirán a los ingenieros mejorar sus diseños en términos técnicos, operativos y financieros.

Los resultados presentados en este trabajo corresponden a una comparación preliminar de las tecnologías monocristalina y policristalina en módulos fotovoltaicos comerciales, por consiguiente, se recomienda para trabajos similares realizar pruebas durante periodos más prolongados de tiempo en latitudes similares a la del municipio de Fusagasugá, con mediciones más exactas y teniendo en

cuenta variaciones importantes de radiación solar que permitan resultados concluyentes respecto a este parámetro.

## Referencias

- [1] International Energy Agency, "Energy Access Outlook 2017. From Poverty to Prosperity" Paris, 2017. ↑50
- [2] International Energy Agency, "IEA sees great potential for solar, providing up to a quarter of world electricity by 2050", 2010. ↑50
- [3] Ministerio de Minas y Energía, "Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia", 2015. ↑50
- [4] M. Fuentes, G. A. J. Nofuentes, D. Talavera and M. Castro, "Application and validation of algebraic Methods to predict the behavior of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates", *Solar Energy*, vol. 81, no. 11, pp. 1396-1408, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.12.008> ↑51
- [5] P. Villar, *Energía solar fotovoltaica*. Madrid: Ediciones Roble S.L, 2010. ↑51
- [6] J. Perko, M. Znidarec and D. Topic, "Comparative Analysis of Electricity Production from Different Technologies of PV Modules", in *10TH International Conference on Sustainable Energy and Environmental Protection*, Bled, 2017. <https://doi.org/10.18690/978-961-286-061-5.33> ↑51
- [7] N. Amin, C. W. Lung and K. Sopian, "A practical field study of various solar cells on their performance in Malaysia", *Renewable Energy*, vol. 34, no. 8, pp. 1939-1946, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.005> ↑51
- [8] K. Akhmad, A. Kitamura, F. Yamamoto, H. Okamoto, H. Takakura and Y. Hamakawa, "Outdoor performance of amorphous silicon and polycrystal- line silicon PV modules", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 46, no. 3, pp. 209-218, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00003-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00003-2) ↑51
- [9] M. Anser Bashir, M. A. Hafiz, S. I Khalil, A. Muzaffar and A. Maryam Siddiqui, "Comparison of performance measurements of photovoltaic modules during winter months in Taxila, Pakistan", *International Journal of Photoenergy*, vol. 2014, 2014. ↑51, 58
- [10] P. Singh, S. N. Singh, Lal and M. Husain, "Temperature dependence of I-V characteristics and performance parameters of silicon solar cell", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 92, no. 2, pp. 1611-1616, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.07.010> ↑51
- [11] S. Rehman and I. El-Amin, "Performance evaluation of an off grid photovoltaic system in Saudi Arabia", *Energy*, vol. 46, pp. 451-458, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.08.004> ↑51
- [12] C. Wen, C. Fu, J. Tang, D. S. Liu and Z. Xing, "The influence of environment temperatures on single crystalline and polycrystalline silicon solar cell performance", *Physics, Mechanics and Astronomy*, vol. 55, no. 2, pp. 235-241, 2012. <https://doi.org/10.1007/s11433-011-4619-z> ↑51
- [13] Y. K. Sanusi, G. R. Fajinmi and E. B. Babatunde, "Effects of ambient temperature on the performance of a photovoltaic solar system in a tropical area", *The Pacific Journal of Science and Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 176-180, 2011. ↑51
- [14] M. Mani y R. Pillai, "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: research status, challenges and recommendations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3124-3131, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065> ↑51
- [15] H. Jiang, L. Lu and K. Sun, "Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) module", *Atmospheric Environment*, vol. 45, no 25, pp. 4299-4304, 2011. ↑51
- [16] M. M. N. G. C. Muselli M y P. P. P. «Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance, » *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 553-567, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.03.010> ↑52
- [17] D. M. K. Mustapha I., M. B. U. and M. Abbagana, "Performance evaluation of polycrystalline solar photovoltaic module in weather conditions of Maidiuguri, Nigeria", *Arid Zone Journal of Engineering, Technology and Environment*, vol. 9, pp. 69-81, 2013. ↑52
- [18] A. Taşçıoğlu and O. V. A. Taşkın, "A Power Case Study for Monocrystalline and Polycrystalline Solar Panels in Bursa City, Turkey", *International Journal of Photoenergy 2016*, 2016. ↑52

- [19] C. Kalu, I. A. Ezenugu and A. Mfonobong Umoren, “Comparative Study of Performance of Three Different Photovoltaic Technologies”, *Mathematical and Software Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 19-29, 2016. ↑52
- [20] J. Barbosa Urbano, *Estudio comparativo entre variables fotovoltaicas de dos sistemas de paneles solares (monocristalino y policristalino) en Bogotá*, Tesis de maestría, Universidad Sergio Arboleda, Bogotá, 2013. ↑52
- [21] B. R. Martínez, *Estimación de la eficiencia de un sistema de energía eléctrica basado en paneles solares considerado variables ambientales en la ciudad de Bogotá*, Tesis de maestría, Universidad Santo Tomás, Bogotá, 2017. ↑52
- [22] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Atlas Interactivo. [En línea]. Disponible en: <https://atlas.ideam.gov.co/visorA-tlasRadiacion.html> ↑53
- [23] NASA Power, “Prediction of Worldwide Energy Resources”, [En línea]. Disponible en: <https://power.larc.nasa.gov/> ↑54
- [24] Powered by Open EI, “Solar and Wind Energy Resource Assessment” 2018. [En línea]. Disponible en: <https://openei.org/apps/SWERA/> ↑55
- [25] B. Soumiaa, M. K. Nallapanenib and T. Alia, “Data acquisition system: On the solar photovoltaic module and weather parameters monitoring”, *Procedia Computer Science*, vol. 132, pp. 873-979, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.05.099> ↑55
- [26] Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/> ↑57
- [27] S. Benlebna, N. M. Kumar and A. Tahri, “Data acquisition system: On the solar photovoltaic module and wheatear parameters monitoring”, in *International Conference on Computational Intelligence and Data Science (ICCIDIS)*, Gurgaon, 2018. ↑58
- [28] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, H. S. Al-Saidi, H. S. Al-Rubkhi and A.-R. Jamila, “Effect of Humidity on the PV Performance in Oman”, *Asian Transactions on Engineering*, vol. 2, 2014. ↑58
- [29] J. Amajama y D. E. Oku, “Effect of Relative humidity on Photovoltaic panels’ Output and Solar Illuminance/Intensity”, *Journal of Scientific and Engineering Research*, vol. 3, no. 4, pp. 126-130, 2016. ↑58

---

### Luisa Fernanda Sanabria Pérez

Nació en Ciudad de Bogotá D.C. Es ingeniera electrónica de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá. Semillerista del semillero SIAMEL del grupo de investigación GIGATT del programa de Ingeniería electrónica. Correo electrónico: lfsanabria@ucundinamarca.edu.co

---

### Luz Angela Cruz Pardo

Nació en Ciudad de Fusagasugá. Es ingeniera electrónica de la Universidad de Cundinamarca, sede Fusagasugá. Pertenece al semillero SIAMEL del grupo de investigación GIGATT del programa de Ingeniería electrónica. Correo electrónico: langelacruz@ucundinamarca.edu.co

---

### Yimy Edisson García Vera

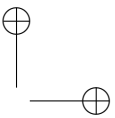
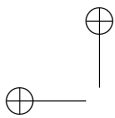
Nació en Ciudad de Manizales. Es ingeniero electricista de la Universidad Nacional sede Manizales. Magíster en Energías Renovables de la Universidad San Pablo CEU de Madrid España, y candidato a doctor en energías renovables eficiencia energética de la Universidad de Zaragoza (España). Actualmente es profesor asociado del programa de Ingeniería Electrónica de la Universidad de San buenaventura, sede Bogotá. Correo electrónico: yegarcia@usbog.edu.co

---

### Carlos Humberto Montufar Benavides

Nació en Ciudad de Bogotá D.C. Es ingeniero electrónico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de Bogotá D.C. Magíster en Docencia Universitaria de la Universidad de La Salle. Actualmente se desempeña como profesor del programa de Ingeniería electrónica y es investigador del grupo GIGATT. Correo electrónico: cmontufar@ucundinamarca.edu.co





Research paper

REVISTA  
Ingeniería

## Optimized Hierarchical Control for an AC Microgrid Under Attack

*Control Jerárquico Optimizado para una Microrred de CA Bajo Ataque*

Vladimir Toro<sup>\*1</sup>, Eder Baron-Prada<sup>1</sup>, Eduardo Mojica-Nava<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional de Colombia

\* Correspondence email: [bwtorot@unal.edu.co](mailto:bwtorot@unal.edu.co)

Received: 30-08-2018. Modified: 09-11-2018. Accepted: 22-01-2019

### Abstract

**Context:** An inverter-based microgrid working in islanded mode can suffer cyber-attacks, these can be done against either the local controller or the communication links among the inverters. Secondary control is able to reject those attacks, however, a tertiary control action is necessary in order to stabilize the power flow among the microgrid.

**Method:** Confidence factor technique allows to reject attacks in a microgrid acting directly over the secondary control, however, this technique omits other factor related to the power available. In this case, secondary control was complemented with a tertiary control that includes optimization criteria.

**Results:** An inverter-based microgrid is simulated in Matlab for different scenarios and under cyber-attack, this allows checking the correct response of the controller under attacks and the effective power-sharing among inverters.

**Conclusions:** The tertiary control allows stabilizing the active power of the system after the rejection of a cyber-attack by the secondary control. Each inverter supplies active power according to its maximum power rating without affecting the stability of the whole system.

**Keywords:** Microgrid, cyber-attack, distributed control, hierarchical control

**Language:** English.

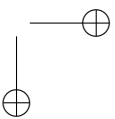
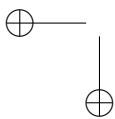
Open access



Cite this paper as: V. Toro, E. Baron-Prada, E. Mojica-Nava.: Optimized Hierarchical Control for an AC Microgrid Under Attack, Vol. 24, Num. 1 pp. 64-82, Jan-Apr 2019 .

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

DOI: <https://doi.org/10.14483/23448393.13760>



### Resumen

**Contexto:** Una microrred de CA (corriente alterna) basada en inversores y que funciona en modo isla puede ser víctima de ciberataques, estos pueden ir contra el controlador o contra el sistema de comunicaciones entre los nodos; el control secundario puede rechazar el ataque, sin embargo, la acción de un controlador terciario es necesaria para estabilizar el flujo de potencia en la microrred.

**Método:** La técnica basada en factores de confianza permite repeler ataques a la microrred actuando directamente sobre el controlador secundario, sin embargo, esta técnica omite factores de optimización; en este caso, las señales de control generadas a partir de los factores de confianza fueron complementadas en un controlador terciario para incluir criterios de optimización.

**Resultados:** Se simula una microrred en Matlab para diferentes escenarios y ataques, permitiendo verificar la acertada respuesta del controlador ante ataques cibernéticos.

**Conclusiones:** El control terciario permite estabilizar la potencia del sistema ante el rechazo de un ciberataque por parte del control secundario. Cada inversor entrega potencia de acuerdo con su rango máximo de potencia, sin afectar la estabilidad de todo el sistema.

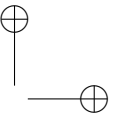
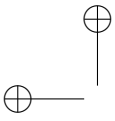
**Palabras clave:** Ciberataque, control distribuido, control jerárquico, microrred

## 1. Introduction

A microgrid consists of a set of distributed generators and energy storage devices connected to a common DC or AC bus, where loads can be connected with the distributed generators or directly to the common bus [1]. Additionally, a microgrid can work either connected to a distribution network or in an islanded mode. A microgrid, based on inverters, is controlled by a three-level hierarchical scheme, usually, assuming a decoupling between active and reactive power, and a highly inductive output impedance at each inverter. Thus, a direct relation between active power and frequency can be assumed [2]. Primary control is usually decentralized and based on droop control, this allows to avoid high circulating current and the power-sharing condition (the condition in which each inverter supply power according to its maximum power rating) is guaranteed [3]. Secondary control is in charge to return voltage and frequency to its reference values, this can be done either in a centralized or distributed manner [4]. Finally, tertiary control is generally centralized and allows solving optimization problems and economic dispatch [5].

A microgrid controlled in a distributed way can be prone to cyber-attacks. Those can be done over an inverter controller or actuator, and attacks over a communication link [6]. Attacks can be repelled including a variable gain term in the frequency secondary control which includes reliability factors such as *confidence factor* related with the information measured at each inverter, and *trust factor* related with the reliability of the data received from the other inverters. These factors use a distance measure through a Euclidean norm given by the error between the measured frequency and the frequency of reference, compared with an already defined threshold value.

Dynamic gains are included directly over the secondary control of each inverter. However, those factors do not consider the power availability of each one, and there is not an optimization criteria to repeal the cyber-attack without saturating some of the inverters. These optimal references not only guarantee that the cyber-attack is repelled but also, keep the signal inside the limits allowed by the system.



This document is organized as follows: Section 2 presents the equation for primary and secondary control and the equations for attack rejection. Section 3 presents the basics of tertiary control, the economic dispatch problem and the design of the controller based on the population games approach. Simulation results are presented in Section 4, and finally, conclusions are shown in Section 5.

## 2. Hierarchical Control and Cyber-Attacks Over an AC Microgrid

This section shows the design of primary and secondary controllers for an AC microgrid. Assuming a linear relationship between frequency and active power secondary control is designed following a distributed scheme in which two consensus equations are used: one for achieving power sharing, and the other for synchronization purposes. Next, the equation for cyber-attack rejection [6] is considered.

### 2.1. Distributed frequency control

An inverter based AC microgrid is controlled following a hierarchical frame. In the first level, the primary control avoids the appearing of high circulating currents when inverters are connected in parallel. Primary control drops the frequency according to the active power demanded by loads [3], this linear relation is represented by (1)

$$f_i = f_{ref} - m_i(P_i - P_i^*) \quad (1)$$

where  $f_{ref}$  is the frequency of reference in Hz,  $m_i$  is the droop coefficient,  $P_i$  is the medium power at inverter  $i$ , and  $P_i^*$  is the active power reference for inverter  $i$ .

The power reference value  $P_i^*$  can be modified based on the requirements of each inverter or some programmed event. However, reference values cannot be achieved only by primary control, because in an isolated microgrid not always the power generated equals the power demanded [7]. In fact, those values are better generated by a tertiary control capable of optimize them according to power availability criteria.

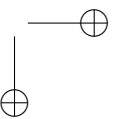
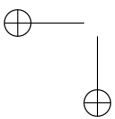
Primary control also assures that each inverter supplies power according to its maximum active power value, a condition known as power-sharing presented in (2)

$$mp_1 = mp_2 = mp_i = \dots = mp_j \quad (2)$$

Then, the equation that represents the frequency for inverter  $i$  in an a.c microgrid with primary droop control, and secondary frequency control [4] is given by

$$f_i = f_{ref} - m_i P_i + \delta f_i \quad (3)$$

where  $\delta f_i$  is the secondary control term.



The secondary control shifts the droop control function returning the frequency to its reference value. Secondary frequency control can include a leader node (not necessarily unique) that knows the reference value. So, consensus problem changes into a synchronization problem. Secondary control is given by (4)

$$\delta f_i = \sum_{N_{ij}} a_{ij}(mp_j - mp_i) + \sum_{N_{ij}} a_{ij}(f_j - f_i) + g_i(f_{ref} - f_i) \quad (4)$$

where  $N_{ij}$  is the set of neighbors of agent  $i$ ,  $a_{ij}$  represents the  $ij$ -th elements of the adjacency matrix,  $f_i$  y  $f_j$  are the frequencies measured in the inverters  $i$  and  $j$ , respectively.  $g_i$  represent the elements of the pinning vector, and  $f_{ref}$  represents the frequency reference value.

## 2.2. Cyber-attacks over an AC microgrid

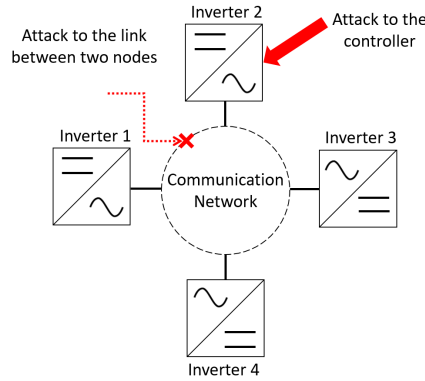


Figure 1. Types of attacks in a microgrid

A distributed control gathers data from neighbors through a local communication system, because of this is more susceptible to cyber-attacks. According to Figure 1 attacks can be classified as attacks to local controllers, and attacks to the communications links between nodes [8].

If the attack occurs over the controller of the  $i$ -th inverter, the frequency at inverter  $i$  is given by (5)

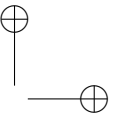
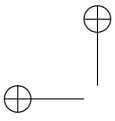
$$f_i^c = f_i + \eta_i f_i^a \quad (5)$$

where  $f_i^c$  is the corrupted frequency at inverter  $i$  after the attack,  $\eta_i$  indicates if there is an attack or not, and  $f_i^a$  is a perturbation injected by the controller.

Similarly, if the attack occurs in the link between two nodes this is model as it is shown in (6)

$$f_i^j = f_i + \eta_i f_i^a \quad (6)$$

where  $f_i^j$  is the frequency measured between inverters  $i$  and  $j$ , and  $\eta_i$  indicates the presence of the attack [8].



The error in inverter  $i$  is given by (7)

$$e_i = \sum_{N_{ij}} a_{ij}(\hat{f}_j - \hat{f}_i) + g_i(f_{ref} - \hat{f}_i) \quad (7)$$

where the values  $\hat{f}_i$  and  $\hat{f}_j$  correspond to the observed values in the nodes  $i$  and  $j$ , respectively.

So, it is defined as the norm of the error (7) as

$$\varepsilon_i = \|e_i\| \quad (8)$$

and the sum of the norms of the errors as

$$\sigma_i = \sum_{N_{ij}} a_{ij}\|\hat{f}_j - \hat{f}_i\| + g_i\|f_{ref} - \hat{f}_i\| \quad (9)$$

Then, the following factor is defined

$$d_i(t) = \frac{\Delta_i}{\Delta_i + \|\sigma_i(t) - \varepsilon_i(t)\|} \quad (10)$$

where  $\Delta_i$  represents a threshold value that considers the effect of other factors rather than attacks. Having into account this factor, the confidence factor is defined as

$$\dot{C}_i(t) = \alpha d_i(t) - \alpha C_i(t) \quad (11)$$

The confidence factor only can take values between zero and one ( $0 \leq C_i \leq 1$ ).

The control of frequency is modified as it is shown in (12)

$$\dot{\hat{f}}_i = \sum_{N_{ij}} a_{ij}C_j(t)(\hat{f}_j - \hat{f}_i) + g_i(f_{ref} - \hat{f}_i) \quad (12)$$

The trust factor is another coefficient that determines the reliability of the measures that a node received from its neighbors. The measurements that exceed the threshold value are rejected. First, it is calculated the factor defined in (16)

$$s_{ij} = \frac{\Theta_i}{(\Theta_i + \|\hat{f}_j(t) - \frac{1}{|N_i|} \sum_{N_i} \hat{f}_k(t)\|)} \quad (13)$$

where  $\Theta_i$  corresponds to a threshold value, and  $|N_i|$  is the number of neighbors of the inverter.

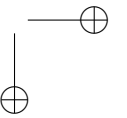
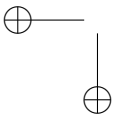
The trust factor is defined as

$$\dot{b}_{ij}(t) = \xi s_{ij}(t) - \xi b_{ij}(t) \quad (14)$$

$$T_{ij} = \max(C_i(t), b_{ij}(t)) \quad (15)$$

where  $0 \leq T_{ij} \leq 1$ .

The control of frequency is modified as it is shown in (16)



$$\dot{f}_i = \sum_{N_{ij}} a_{ij} C_j(t) T_{ij}(t) (\hat{f}_j - \hat{f}_i) + g_i (f_{ref} - \hat{f}_i) \quad (16)$$

Assuming an AC microgrid with predominantly inductive transmission lines, the instantaneous active power exchange is given by the following expression

$$p_i = \sum_{j \in N_i}^n |Y_{ij}| E_i E_j (\theta_j - \theta_i), \quad (17)$$

where  $|Y_{ij}|$  is the magnitude of the line admittance between inverter  $i$  and  $j$ ,  $V_i$  and  $V_j$  are the bus voltages at inverters  $i$  and  $j$ , respectively.

Taking the first derivative of  $p$  along time, and considering the relation  $\frac{d\theta_i}{dt} = \omega_i$ , expression (17) becomes

$$\dot{p}_i = \sum_{j \in N_i}^n |Y_{ij}| E_i E_j (f_j - f_i), \quad (18)$$

Taking the first derivative of (3) along time expression is written as

$$\dot{f}_i = -m_i \dot{P}_i + \delta f_i \quad (19)$$

Then replacing (18), and (16) in (19) the following expression is obtained

$$\dot{f}_i = -m_i \left[ \sum_{j \in N_{ij}} b_{ij} |Y_{ij}| E_i E_j (f_j - f_i) \right] + C_j(t) T_{ij}(t) \left[ \sum_{j \in N_{ij}} a_{ij} (f_j - f_i) + (f_{ref} - f_i) \right] \quad (20)$$

Expression (20) is written in matrix form as follows

$$\dot{\Delta} F = -M L_c F - C T (L + G) F, \quad (21)$$

where  $M$  is a diagonal matrix with the droop coefficients,  $L_c$  is a Laplacian matrix for the physical connection among inverters whose values are given by  $\omega_{ij} = E_i E_j |Y_{ij}|$ ,  $F$  is the vector that contains the frequency measured at each inverter,  $C$  and  $T$  are diagonal matrices whose values are the coefficient and trust parameters, respectively.  $L$  is the Laplacian matrix who represents the connections among agents.  $G$  is the diagonal matrix that determines if an agent is a leader or not.

Expression (21), can be written as  $\dot{\Delta} F = -(M L_c + C T (L + G)) F$ , the solution of this differential equation is of the form  $F(t) = A e^{-t(M L_c + C T (L + G))}$ . This expression is asymptotically stable if term  $M L_c + C T (L + G)$  remains positive. Notice that, Laplacian matrices are positive defined, as matrices  $M$ ,  $C$ ,  $T$ , and  $G$  are diagonal matrices whose values are real and positive, the product of those matrices is positive defined too, then the expression holds.

### 3. Tertiary Control for Active Power Control

In this section, the design of the tertiary control is presented. The economic dispatch problem is introduced, and then a population game approach is studied. Tertiary control gathers information of power consumption from the whole microgrid, and based on this data, generates the signal for each inverter according to optimization criteria.

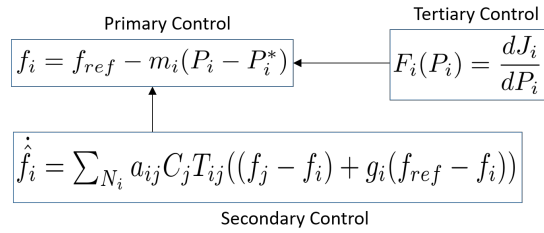


Figure 2. Hierarchical control layers

Tertiary control sends the set-point values for primary control at each inverter. As it is shown in Figure 2 primary control uses the frequency droop control with power reference  $P_i^*$ , this value is sent by tertiary control after an optimization process represented by functional  $F_i(P_i)$ . Additionally, secondary control sends the frequency reference value to the droop control and receive the information of frequency and active power value from each inverter.

Next, an economic dispatch control strategy is presented. This control algorithm sets the optimal power values for each generator based on economic criteria. Then some basics concepts of the proposed population games approach are shown.

#### 3.1. Economic Dispatch Problem

Tertiary control is considered the last layer in hierarchical control, and it is related with the optimization of the dispatch of the resources available in the power system, which is also called economic dispatch [9], [10]. Economic dispatch is a highly studied problem, some approaches use convex optimization methods, principally derived from the work of Nedić et al. in [11], based on this work several approaches have been made [12]–[14]. Moreover, other approaches using game theoretical approaches have been made [15]–[18] proving the effectiveness of game theory to handle economic dispatch problems. Tertiary control can be either centralized or distributed, distributed controllers are used in large-scale systems where centralized controllers often suffer from computation and communication overheads. However, instead of several advantages of distributed controllers, centralized controllers are highly used due to their robustness and easily configured and maintained under operation.

Economical dispatch denotes the problem of determining the optimum output power of a set of generators in a power system in order to satisfy loads and fulfill power system requirements. Economic dispatch problem consists of minimizing the total generation cost [18], [19]. Here, the cost of the power supplied by each generator is minimized using an utility function based on a

quadratic function [12], [13], [20] such as

$$F(p_i) = \frac{\alpha_i}{2} p_i^2 + \beta_i p_i + \zeta \quad (22)$$

where  $F(p_i)$  is the utility function of generator  $i$ ,  $p_i$  is the power generated by generator  $i$ . Moreover,  $\alpha_i, \beta_i, \zeta \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  are utility coefficients. Using the utility function of all agents in the power system we can formulate the economic dispatch problem as follows

$$\begin{aligned} & \underset{p_i \forall i \in G}{\text{minimize}} && \sum_{i=0}^N F(p_i) \\ & \text{subject to} && \sum_{i=0}^N p_i = P_L \\ & && \bar{p}_i \geq p_i \geq \underline{p}_i \quad \forall i \in G \end{aligned} \quad (23)$$

where  $P_L$  is the power demanded by the load in the system,  $N$  is the number of generators in the power system,  $\bar{p}_i$  and  $\underline{p}_i$  are the maximum and minimum power capacity respectively. Economic dispatch problem in (23) is solved when constraints (23) and (23) are fulfilled, moreover the economic dispatch criterion states that all agents should operate with the same marginal utilities as follows

$$\theta = \frac{\partial F(p_1)}{\partial p_1} = \frac{\partial F(p_2)}{\partial p_2} = \dots = \frac{\partial F(p_N)}{\partial p_N} \quad (24)$$

where  $\theta \in \mathbb{R} > 0$ . In order to solve (23) a game theoretical method based on population games is used, specifically, replicator dynamics solve iteratively the economic dispatch problem using criterion (24). The before statement can be summarized in the following lemma

**Lemma 1** *A solution of problem (23),  $P^*$  belonging to the feasible set  $\Delta$ , is an optimal solution if and only if  $\nabla_i S_W(P_i^*) = \nabla_j S_W(P_j^*)$  for all  $i, j$ .*

### 3.2. Population Games Approach

One of the main contributions of this work is to optimize, through a tertiary control, the response of a microgrid against an attack. In order to reach this contribution, a centralized population dynamics control based on game theory is proposed. Population dynamics represent how a pure population strategy progress over time. In population games, replicator dynamics have been used in several engineering applications such as economic power dispatch, lighting systems, and urban drainage systems [18]. These applications have been made considering some implementation benefits, such as robustness to dynamic environmental uncertainties.

The replicator dynamics solves the economic dispatch problem as a resource allocation problem. Replicator dynamics considers  $G = \{1, 2, 3 \dots N\}$  finite number of generators, who adopt a  $i$ -th strategy from a finite set of pure strategies. Accordingly, to achieve an appropriate performance in the steady state, the power demanded by the load should be the sum of all power set points. The



payoff function ( $F_i$ ) is associated with the chosen strategy, therefore, a continuous time implementation is also used. In its general form, the replicator dynamics can be represented as

$$\dot{p}_i = \beta(F_i - \bar{F}(\mathbf{p}))p_i \quad (25)$$

where  $\beta$  is a parameter that permits modify the convergence speed [21]. The average payoff in the population  $\bar{F}(\mathbf{p})$  is given by

$$\bar{F}(\mathbf{p}) = \frac{1}{P_L} \sum_{i=0}^N p_i F_i \quad (26)$$

The results in [22] are used to guarantee the power balance, the choice of (26) guarantees the invariance of the constraint set  $\Delta$  defined as

$$\Delta = \left\{ p_i \in \mathbb{R}_{\geq 0}^N : \sum_{i=0}^N p_i = P_L \right\} \quad (27)$$

This result ensures that if  $p_i(0) \in \Delta$ ,  $\forall i \in G$ , all  $p_i(t) \in \Delta$  with  $t \geq 0$ . In other words, the power demanded by the loads in the system always is dispatched i.e, the replicator dynamic algorithm guarantees a perfect balance between the power demanded and the power generated. One of the characteristics of the replicator dynamics algorithm is that in the stationary state the fitness function of all agents is equal to the average fitness ( $\bar{F}$ ). This condition allows solving the problem of economic dispatch through the replicator dynamics since the fitness function is derived from the utility function. In order to include the constraints in (23), we use Lagrange Multipliers as

$$L(p, \mu) = \sum_{i=0}^N F(p_i) + \mu(\mathbf{R}p - r) \quad (28)$$

where  $\mu$  is the Lagrange Multipliers, the fitness functions are defined as

$$\nabla_p L(p, \mu) = \nabla \sum_{i=0}^N F(p_i) + \mathbf{R}^T \mu = F(p) \quad (29)$$

$$\nabla_\mu L(p, \mu) = -\mathbf{R}p + r = F(\mu) \quad (30)$$

Finally, the fitness functions for this replicator dynamics are

$$F(p_i) = \alpha_i p_i + \beta_i + \mu_i \quad \forall i \in G \quad (31)$$

$$F(\mu) = -\sum_{i=1}^N p_i + r \quad \forall i \in G \quad (32)$$

Notice that  $\nabla$  stands for the Jacobian of a function. Now, we state the following theorem in order to characterize the optimality of the proposed algorithm

**Theorem 1** Assume a convergence constant  $\beta \in \mathbb{R}$ . Furthermore, let  $P_i(k)$ , with  $i \in \mathcal{N}$ , being the set points generated by executing (25), with fitness functions defined as in (31) and (32). Then,  $P_i(k)$  with  $i \in \mathcal{N}$  converges to the optimal solution  $P_i^*$  that belongs to the feasible set of power, that is

$$\lim_{k \rightarrow \infty} P_i(k) = P_i^*.$$

**Proof.**

Since we have defined fitness functions as (31) and (32), by definition a potential function for the population game (25) is  $h(P, \mu) = \mathcal{L} = S_W(P) - \mu^\top(\mathbf{R}P - r)$  and considering the form of the economic dispatch in (23), it can be shown that the game satisfies the external symmetry (24). When the optimality condition in Lemma 1 is reached then  $F_i(p_i) = F_j(p_j)$  for all  $i, j$  and it is noticed that in the replicator dynamics (25) we have

$$\beta \left( F_i - \frac{1}{P_L} \sum_{i=0}^N p_i F_i \right) p_i = \beta \left( F_j - \frac{1}{P_L} \sum_{i=0}^N p_i F_i \right) p_j \quad (33)$$

To reach optimality, both sides of the equation must be equal. At the optimal point, this only can be equal to zero. It is possible to see through Lemma 1, that

$$F_i = F_j \dots \forall i, j \in \mathcal{N} \quad (34)$$

Then, it is possible to see that

$$F_j = \frac{1}{P_L} \sum_{i=0}^N p_i F_i \quad (35)$$

Then, (33) is

$$\beta(0) p_i = \beta(0) p_j \quad (36)$$

$$= 0 \quad (37)$$

which implies that (25) reaches an optimal point. ■

## 4. Simulation Results

A five inverter-based microgrid is simulated using Simulink®, inverters are considered as controlled three-phase voltage sources. Each inverter is connected to a common bus in parallel as it is shown in Figure 3. Three different scenarios are simulated: the first one shows the performance of tertiary control without any attack; the second one shows the performance of controllers when the controller of inverter one is attacked, and finally, the third one shows the performance of the system when false data is added to the measured frequency at inverter one.

Microgrid parameters are presented in Table I. Each inverter has a different nominal active power value, and a different low-pass filter constant. Transmission lines among inverters are considered similar to visualized clearly the changes introduced by tertiary and secondary control.

The five inverter microgrid has a communication system defined by an undirected graph with its related adjacency matrix as it is shown in Figure 4.

The nominal power for each inverter is set at the tertiary control:  $P_{nom_1} = 1000\text{W}$ ,  $P_{nom_2} = 2000\text{W}$ ,  $P_{nom_3} = 4000\text{W}$ ,  $P_{nom_4} = 6000\text{W}$ ,  $P_{nom_5} = 7000\text{W}$ .

*First case* A load  $P_{load} = 20000\text{W}$  is connected at  $t = 1\text{s}$  and a similar load is connected at  $t = 4\text{s}$ .

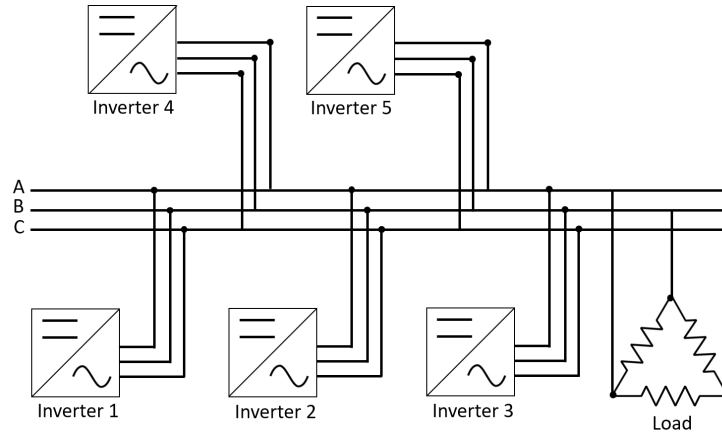


Figure 3. Microgrid Schematic

Table I. Microgrid Parameters

	$P_{max}(kW)$	$m = \frac{\Delta f}{P_{max}}$	$\tau(s)$	$R(\Omega)$	$L(mH)$
Inverter 1	2	$5 * 10^{-5}$	0,01	0.1	1
Inverter 2	4	$2,5 * 10^{-5}$	0,02	0.1	1
Inverter 3	5	$2 * 10^{-5}$	0,03	0.1	1
Inverter 4	8	$1,25 * 10^{-5}$	0,04	0.1	1
Inverter 5	10	$1 * 10^{-5}$	0,05	0.1	1

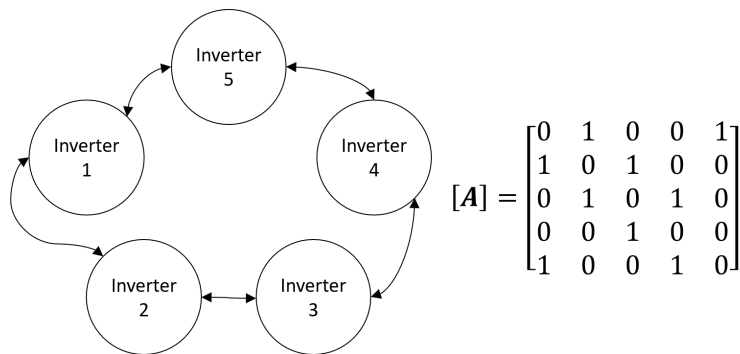


Figure 4. Graph representation and adjacency matrix of the communication links between nodes

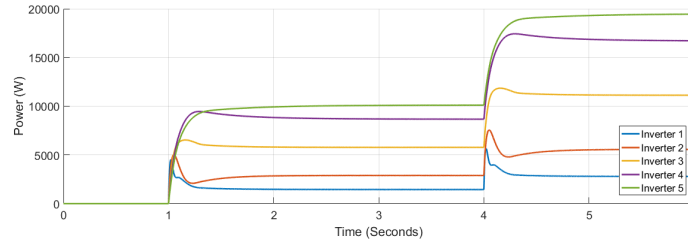


Figure 5. Active power for each inverter

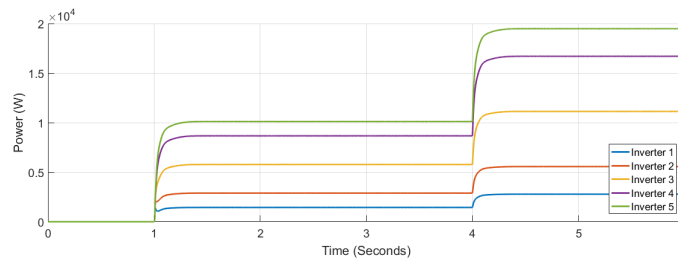


Figure 6. Output from tertiary controller

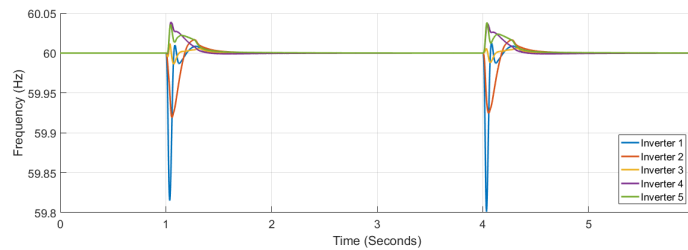


Figure 7. Frequency measured at each inverter

Figure 5 shows the power at each inverter when loads are connected at  $t = 1s$  and  $t = 4s$ . The action of tertiary control is implicit in the behavior of power-sharing at each inverter, so its power capacity is taken into account. Tertiary control action is depicted in Figure 6 while Figure 7 shows the behavior of frequency at each inverter, notice that the changes at  $t = 1s$  and  $t = 4s$  when loads are connected are similar, and frequency reference value is achieved in steady state. Figure 8 and Figure 9 show the behavior of confidence and trust values when the microgrid is not under attack. Trust and confidence values drop to less than 0.2 when their threshold values are set at 0.9.

*Second case* A load  $P_{load} = 20000W$  is connected at  $t = 0,5s$  and a false data signal is introduced controller of inverter 1 between  $t = 2s$  and  $t = 4s$ .

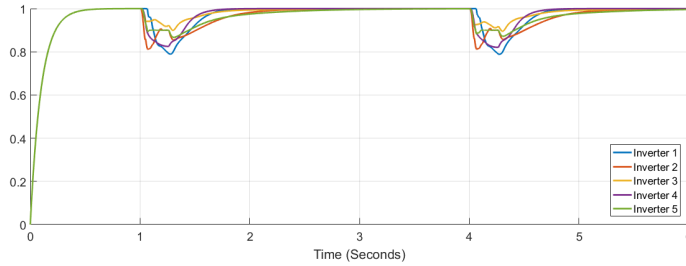


Figure 8. Confidence factor

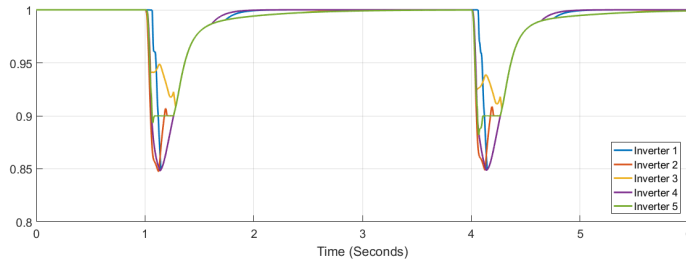


Figure 9. Trust factor

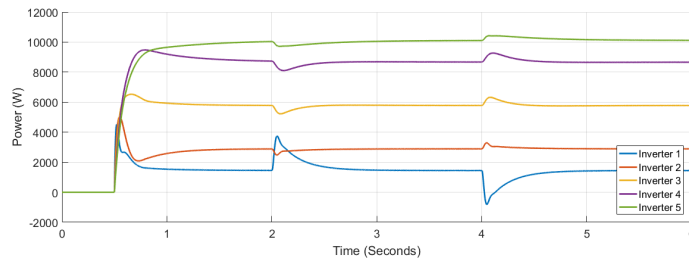


Figure 10. Active power for each inverter under attack in case 2

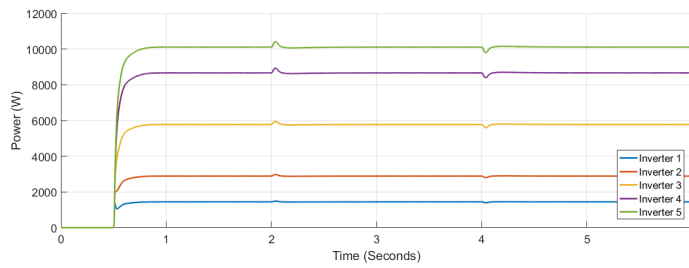


Figure 11. Output from tertiary controller when is under attacks in case 2

Figure 10 and Figure 11 show the active power supplied by each inverter, and the tertiary control response, respectively. Inverter 1 is able to supply or to absorb active power. At Figure 12 frequency variations appears at  $t = 0,5s$  when the load is connected, and at  $t = 2s$  and  $t = 4s$  when false data is introduced at the controller of inverter one. Finally, in Figure 13 and Figure 14 a variation of less than 0.2 for confidence and 0.1 for trust is shown. Notice that only for the trust coefficient the threshold value of 0.9 is achieved.

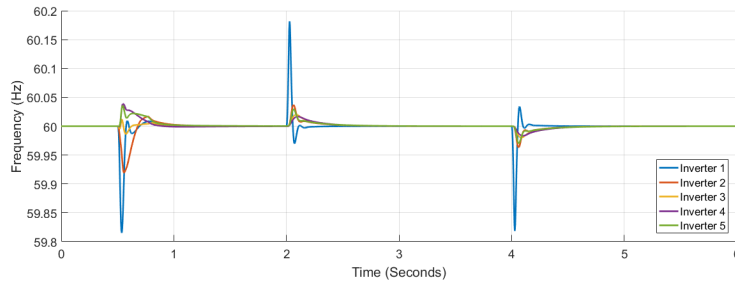


Figure 12. Frequency measured at each inverter when under attack

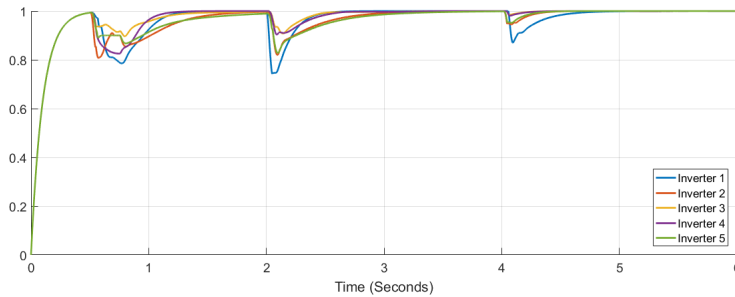


Figure 13. Confidence factor when inverter 1 is under attack

*Third case* A load  $P_{load} = 20000W$  is connected at  $t = 0,5s$  and a false data signal is introduced at the communication channel of inverter at  $t = 2s$ .

Figure 15 and Figure 16 present the power variation at each inverter after the attack, there is a little variation in the power at each inverter, and no much variation at the tertiary controller response. In Figure 17 the frequency response is shown, notice the attack over the frequency measurement at inverter one; a constant signal of 0.2 Hz is added at  $t = 2s$ . Figure 18 shows the frequency at inverter one, the variation of frequency after a load variation is larger than the variation after the attack. Figure 19 shows the confidence factor variation after cyber-attack, this factor drops below 0.4 for inverter five, while Figure 20 shows the variation for trust factor, trust factor drops below 0.75 for inverter five while other inverters do not drop below the threshold value of 0.9.

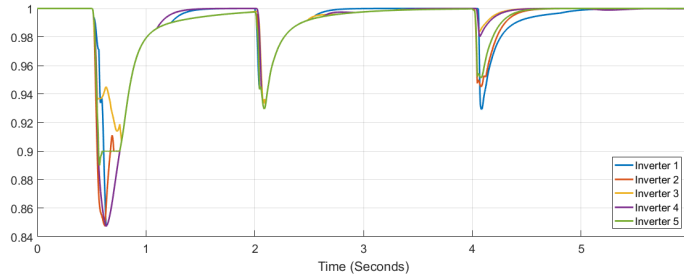


Figure 14. Trust factor when inverter 2 is under attack

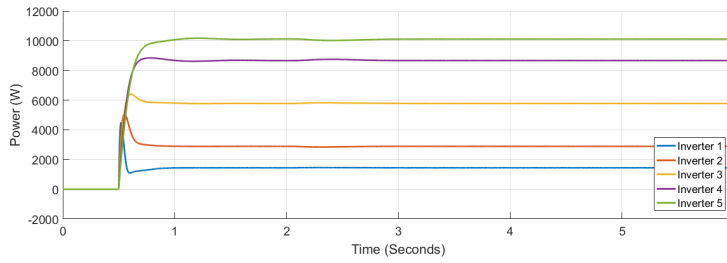


Figure 15. Active power for each inverter under attack in case 3

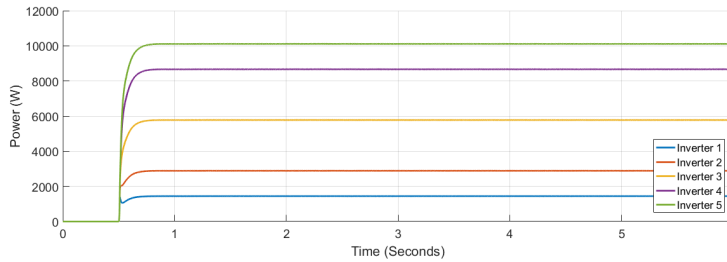


Figure 16. Output from the tertiary controller when is under attacks in case 3

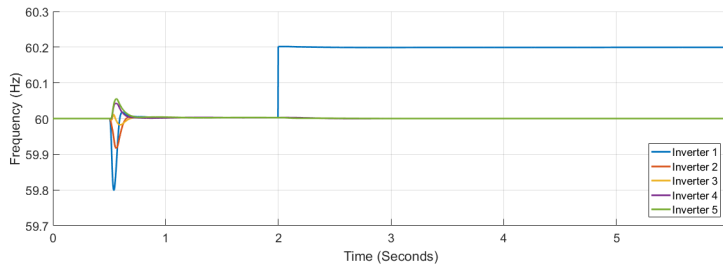
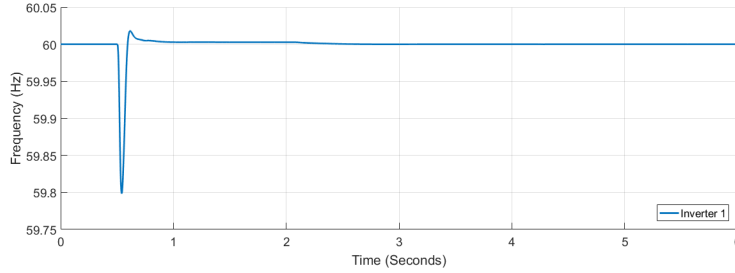
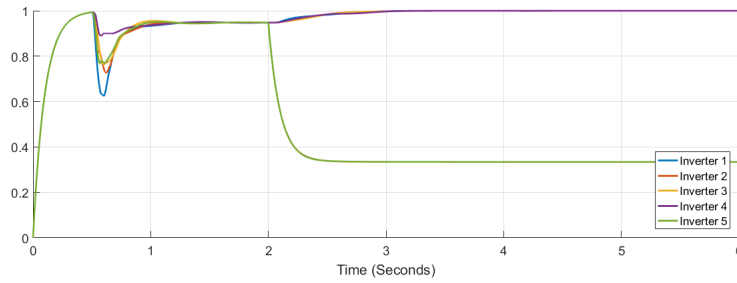


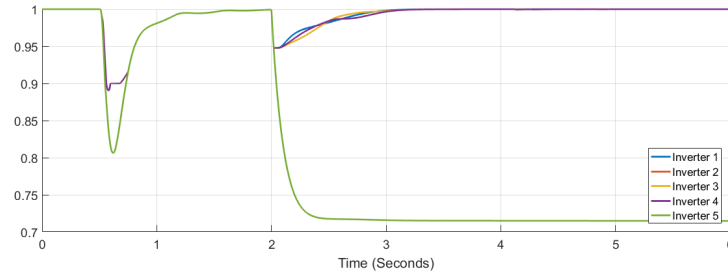
Figure 17. Frequency measured at each inverter when under attack



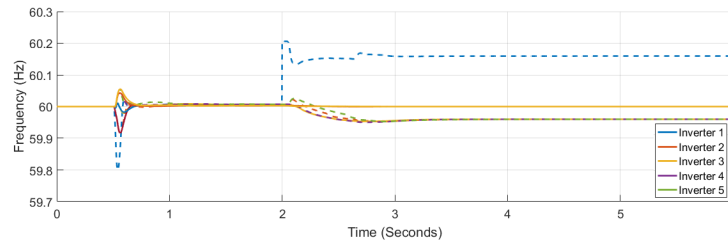
**Figure 18.** Frequency measured at inverter 1 under attack



**Figure 19.** Confidence factor when inverter 1 is under attack

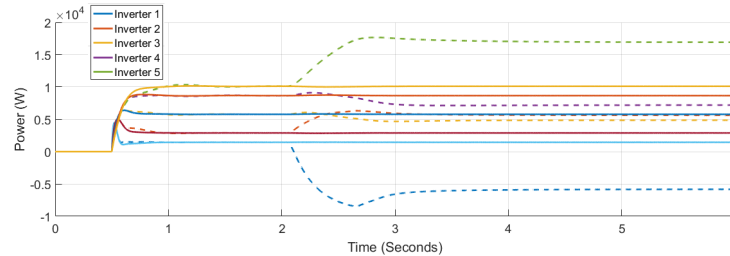


**Figure 20.** Trust factor when inverter 3 is under attack



**Figure 21.** Frequency response of the system with (complete line) and without (dash line) trust and confidence factors





**Figure 22.** Active power response of the system for all the inverters with (complete line) and without (dash lines) trust and confidence factors

Finally, the comparison between the active power and frequency responses with and without confidence and trust factors are presented in Figure 21, and Figure 22. The frequency without those factors deviates from the reference value, not only in the inverter that suffers the attack but in all the other inverters. The active power varies abruptly when the system is under attack. Notice that the inverter that is attacked change from supply to absorb power. In contrast, active power has not changed when confidence and trust factors are used.

## 5. Conclusions

The distributed tertiary control is able to stabilize the active power flow in the microgrid after the cyber-attack. The power references for the primary control are modified to overcome the perturbation created by the cyber-attack without changing the frequency at steady state. Attacks on local controller and communication channels are simulated and the effectiveness of attack rejection is proved. The tertiary control shows its effectiveness to avoid inverters saturation and to keep the necessary conditions for optimal economical dispatch; such as maximum active power ratings, and maximum frequency deviation.

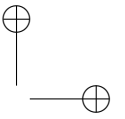
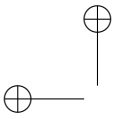
## References

- [1] R. H. Lasseter, "Microgrids," in *IEEE Power Engineering Society winter Meeting*, pp. 305–308, 2002 ↑. 65
- [2] J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, J. Matas, L. G. De Vicuña, and M. Castilla, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158–172, 2011 ↑. 65
- [3] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, and R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone ac supply systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 1, pp. 136–143, 1993 <https://doi.org/10.1109/28.195899> ↑. 65, 66
- [4] F. L. Lewis, Z. Qu, A. Davoudi, and A. Bidram, "Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 7, pp. 822–831, 2013 <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2012.0576> ↑. 65, 66
- [5] F. Dörfler, J. W. Simpson-Porco, and F. Bullo, "Breaking the Hierarchy : Distributed Control and Economic Optimality in Microgrids," vol. 3, no. 3, pp. 241–253, 2016 ↑. 65
- [6] S. Abhinav, H. Modares, F. L. Lewis, F. Ferrese, and A. Davoudi, "Synchrony in networked microgrids under attacks," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 6, 2017 <https://doi.org/10.1109/TSG.2017.2721382> ↑. 65, 66

- [7] J. M. Guerrero, M. Chandorkar, T. Lee, and P. C. Loh, "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids; Part I: Decentralized and Hierarchical Control," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1254–1262, 2013 <https://doi.org/10.1109/TIE.2012.2194969> ↑. 66
- [8] F. Pasqualetti, F. Dorfler, and F. Bullo, "Attack detection and identification in cyber-physical systems," *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 58, pp. 2715–2729, Nov 2013 <https://doi.org/10.1109/TAC.2013.2266831> ↑. 67
- [9] J. M. Guerrero, P. C. Loh, T. L. Lee, and M. Chandorkar, "Advanced control architectures for intelligent microgrids Part II: Power quality, energy storage, and AC/DC microgrids," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 60, no. 4, pp. 1263–1270, 2013 ↑. 70
- [10] M. S. Mahmoud, M. Saif Ur Rahman, and F. M. A.L.-Sunni, "Review of microgrid architectures – a system of systems perspective," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 8, pp. 1064–1078, 2015 <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0171> ↑. 70
- [11] A. Nedić and A. Ozdaglar, "Subgradient methods for saddle-point problems," *Journal of Optimization Theory and Applications*, vol. 142, no. 1, pp. 205–228, 2009 <https://doi.org/10.1007/s10957-009-9522-7> ↑. 70
- [12] F. Guo, C. Wen, J. Mao, J. Chen, and Y. Song, "Hierarchical decentralized optimization architecture for economic dispatch: A new approach for large-scale power system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, pp. 523–534, Feb 2018 <https://doi.org/10.1109/TII.2017.2749264> ↑. 70, 71
- [13] F. Guo, C. Wen, J. Mao, J. Chen, and Y.-D. Song, "Hierarchical Decentralized Optimization Architecture for Economic Dispatch: A New Approach for Large-scale Power System," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2017 ↑. 70, 71
- [14] E. Baron-Prada, C. A. Uribe, and E. Mojica-Nava, "A Method for Distributed Transactive Control in Power Systems based on the Projected Consensus Algorithm," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, pp. 379–384, Jan 2018 <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.12.065> ↑. 70
- [15] C. A. Macana and H. R. Pota, "Optimal energy management system for strategic prosumer microgrids: An average bidding algorithm for prosumer aggregators," in *2017 11th Asian Control Conference (ASCC)*, pp. 705–710, Dec 2017 <https://doi.org/10.1109/ASCC.2017.8287256> ↑. 70
- [16] C. A. Macana, S. M. Mohiuddin, H. R. Pota, and M. A. Mahmud, "Online energy management strategy for islanded microgrids with feedback linearizing inner controllers," in *IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT-Asia)*, pp. 1–6, Dec 2017 ↑. 70
- [17] E. Mojica-Nava, S. Rivera, and N. Quijano, "Distributed dispatch control in microgrids with network losses," in *IEEE Conference on Control Applications (CCA)*, pp. 285–290, Sep. 2016 <https://doi.org/10.1109/CCA.2016.7587850> ↑. 70
- [18] N. Quijano, C. Ocampo-Martinez, J. Barreiro-Gomez, G. Obando, A. Pantoja, and E. Mojica-Nava, "The role of population games and evolutionary dynamics in distributed control systems: The advantages of evolutionary game theory," *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 37, pp. 70–97, Feb 2017 <https://doi.org/10.1109/MCS.2016.2621479> ↑. 70, 71
- [19] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power generation, operation, and control*. New Jersey: J. Wiley & Sons, 1996 ↑. 70
- [20] Z. Li, C. Zang, P. Zeng, H. Yu, and S. Li, "Agent-based distributed and economic automatic generation control for droop-controlled AC microgrids," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 10, no. 14, pp. 3622–3630, 2016 <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0418> ↑. 71
- [21] J. N. Webb, *Game theory: decisions, interaction and Evolution*. Berlin: Springer, 2007 ↑. 72
- [22] J. Hofbauer and K. Sigmund, *Evolutionary Games and Population Dynamics*. Cambridge University Press, 1998 <https://doi.org/10.1017/CBO9781139173179> ↑. 72

### Vladimir Toro

Received the B.S. degree in electronics engineering from the Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia, in 2009; the M.Sc. degree in electrical engineering from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia in 2018. He is currently pursuing the Ph.D degree at Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. His current research interests include microgrid's control, optimization, and control of multi-agent systems.



---

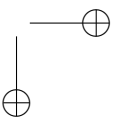
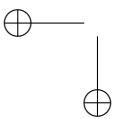
**Eder Baron-Prada**

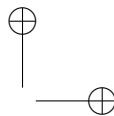
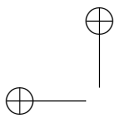
Received the B.S. degree in electrical engineering from the Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, in 2016; He is currently pursuing the master degree in Industrial Automation at National University of Colombia, Bogotá. His current research interests include microgrid control, optimization, and control of multi-agent systems.

---

**Eduardo Mojica-Nava**

Received the B.S. degree in electronics engineering from the Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia, in 2002; the M.Sc. degree in electronics engineering from the Universidad de Los Andes (UAndes), Bogotá, Colombia; and the Ph.D. degree in automatique et informatique industrielle from the Ecole des de Nantes, Nantes, France in co-tutelle with UAndes in 2010. He is currently an associate professor with the Department of Electrical and Electronics Engineering, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. His current research interests include optimization and control of complex networked systems, switched and hybrid systems, and control in smart grids applications.





## Instrucciones para los Autores

### Introducción

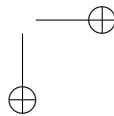
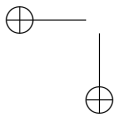
La Revista INGENIERÍA es una publicación de carácter científico con una periodicidad cuatrimestral editada por la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. La Revista está dirigida a la comunidad académica, investigadores, egresados, sectores productivos y en general al público interesado en los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

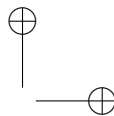
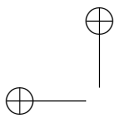
Todo artículo es evaluado de manera doble-ciega por pares revisores antes de ser calificado como candidato para publicar. El Comité Editorial, tomando en cuenta los conceptos emitidos por los evaluadores y el cumplimiento de las políticas editoriales de la Revista, decide la publicación del artículo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

### Clasificación de los artículos

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

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





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

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

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

## Procedimiento para el envío de artículos

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

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

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5087/11961> (Formato PDF)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/11486/12242> (Formato Word)

La finalidad de la carta es certificar que el artículo es inédito, que no está sometido a otra publicación y que aceptan las normas de publicación de la Revista.

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

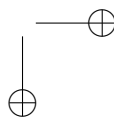
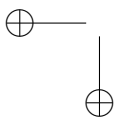
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/4979/11816> (Formato PDF)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5233/11815> (Formato Word)  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/9539/10775> (Formato Latex)

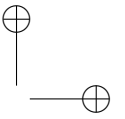
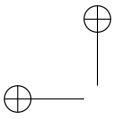
- Los autores relacionarán en el correo de postulación del artículo dos posibles evaluadores que cumplan las siguientes condiciones:

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

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

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





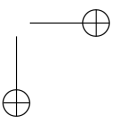
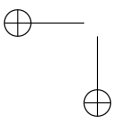
Se puede consultar la guía rápida para autores en la plataforma OJS en el enlace:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/5540/7070>

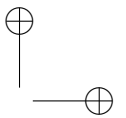
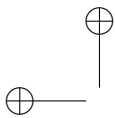
### **Aspectos a tener en cuenta**

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

### **Derechos de autor**

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





## Instructions for authors

### Aim and scope

INGENIERÍA Journal is a scientific publication with a periodicity published every four months by Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Its main goal is to disseminate and discuss advances in research and development in the different areas of engineering through the publication of original unpublished papers.

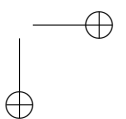
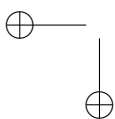
The intended audience of the Journal is the academic community, researchers, graduates, productive sectors and in general the public interested in all engineering disciplines.

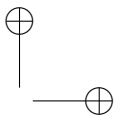
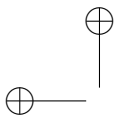
Submitted papers are double-blind peer-reviewed by at least two experts in the field, before being qualified as a candidate to be published. The Editorial Board grounds its acceptance decision on the basis of the recommendations given by the experts and the fulfillment of the editorial policies of the Journal. All papers submitted to INGENIERÍA Journal must be unpublished and not submitted to publication to other journal, although papers previously published in conference proceedings may be considered if substantial extensions are included.

### Types of papers

Papers published in INGENIERIA Journal are classified according to the nature of the new knowledge it reports, as follows:

- **Research:** These are papers that address a question about a theoretical or applied disciplinary aspect, usually through a scientific study of the behaviour of a phenomenon or a situation under certain control conditions.
- **Methodology:** These are papers focusing on presenting a new method of solution for a particular category of problems, demonstrating favorable results compared to the state of the art or technique. They are investigations specifically dedicated to validate the advantages and disadvantages of the method proposed or to perform comparative characterisations of several methods in dissimilar or unexplored domains.
- **Review:** These are papers that present critical, systematic, delimited and exhaustive analyzes on the progress, trends, positive and negative results, gaps and future research routes found in the current state of the art or technique.
- **Perspective:** These are papers that, using original bibliographical sources and argumentative and controversial discourse, question the current state of art or technique, propose alternative visions to dominant currents of thought, criticise the vanguard of the discipline or call for the attention towards research topics abandoned or disregarded by the scientific community. Usually more than a personal reflection, they seek to establish a collective (scientific community) position, based on a discussion that combines introspective, retrospective and prospective on the subject in question.
- **Case Report:** These are papers intending to disclose a novel finding found during or after a particular case of technological development, which could eventually be generalised by a more extensive investigation (applied to more cases) and which therefore deserve to be known by the community. In other words, rather than emphasising on





technological development or innovation per se, they focus on characterising preliminary knowledge discovered in the respective case study.

- **Editorials:** Letters to the Editor, Guest Article: These are the only contributions that do not report new knowledge, but discuss topics of interest for the Journal, for its editorial line or for its community, with an informed opinion style.

## Procedure for the submission of papers

Authors should submit to the Editor the following documents using our Open Journal System (OJS) platform:

- Cover letter and originality statement: a template can be downloaded from:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5087/11961> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/11486/12242> (Word format)

- The manuscript formatted according to the template and style of the instructions to authors:

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/4979/11816> (PDF Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5233/11815> (Word Format)

<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/9539/10775> (Latex Format)

- (Optional) Suggestions of two candidate experts for peer review, complying with:

– Must have a PhD. Degree

– Must belong to an institution other than the authors'

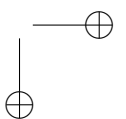
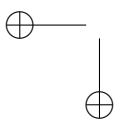
– Have publications in recognised journals in the last two years

- If accepted for publication, the authors must agree with and submit a copyright form that transfers rights for publication. This form can be downloaded from:

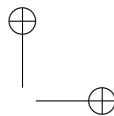
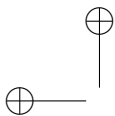
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/article/view/5091/6711>

## Additional considerations

- Recommended paper length is ten (10) pages. If authors require more pages, they should inform the Editor in advance during the submission process.
- The result of the review process and the reviewers comments would be notified to the authors through the OJS platform and by email to the correspondence author. The result can be “Major correction”, “Minor corrections” or “Rejected”. When corrections are required, authors should resubmit a corrected anonymous manuscript and a companion document explaining the changes made in reply to what comments. Usually, a submitted manuscript would undertake at least two rounds of review. Statistics of average review and production times and other Journal indicators can be seen at:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reviving/index>
- When a submission does not meet the conditions defined for the journal, the Editorial







Committee may decide not to publish it. In this case, the authors will be notified of the decision within two (2) weeks from the date of submission.

### **Copyright and publishing cost**

INGENIERÍA Journal distributes the full content of its printed and digital version under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License. No publication costs are charged to the author or author's institutions, nor any payment are made to expert peer reviewers or associated or adjunct editors. INGENIERÍA Journal is funded by Universidad Distrital Francisco José de Caldas, its School of Engineering and its Central Research Office.

### **Code of good conduct in scientific publishing**

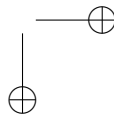
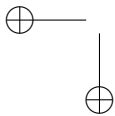
INGENIERÍA Journal advocates and defends the universal principles of good conduct in scientific publication, in particular, those referring to respect for the community, respect for the selfless and voluntary work of peer reviewers and editors, as well as respect to intellectual property. Regarding the latter, INGENIERÍA Journal does not tolerate behaviours related to plagiarism of previously published material and strives to honor to the maximum extent the copyrights and patents and reproduction rights. Likewise, the Journal seeks to observe the moral rights of third parties, in addition it will establish the necessary processes to avoid and to resolve the possible conflicts of interest that can exist in the publications.

### **Inappropriate behaviour not tolerated by the journal**

1. Wrongly addressed submission intended to other journal different to INGENIERIA Journal.
2. Plagiarism or self-plagiarism.
3. Simultaneous submission of a manuscript to several journals.
4. Unjustified withdraw of a submitted manuscript due to unfavourable reviews.
5. Unjustified abandonment of submission at any stage of the process: verification of submission conditions, peer-review process or layout and final proof adjustments.

### **Penalties for inappropriate behaviour**

1. Official communication sent to the authors indicating the misconduct, requesting a letter of apology addressed to the Editorial Committee, Scientific and/or peer reviewers.
2. Notification sent to the Colombian Network of Engineering Journals (Red Colombiana de Revistas de Ingeniería) reporting the case of misconduct with evidences.
3. Official communication sent to author's affiliated or financing institutions informing about the misconduct.
4. Retraction of the paper in case it has been published, notifying this decision publicly in the editorial pages of the Journal and in an official letter addressed to the entities of institutional affiliation of the authors.





5. Application of a publication veto to the authors in the Journal during a period determined by the Editorial Board according to the seriousness of the misconduct.

6. Notification of the case and the result of the investigation to the competent authorities, in case the good will of the Universidad Distrital FJC or the INGENIERIA Journal is compromised.

### **Procedure in case of suspicion of plagiarism and duplicate publication**

INGENIERIA Journal will follow the guidelines established by the Publications Ethics Committee (COPE) to handle unethical issues or behaviours:

Suspicion of plagiarism in a submitted manuscript  
<http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20A.pdf>

Suspicion of plagiarism in a published paper  
[http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B\\_0.pdf](http://publicationethics.org/files/u7140/plagiarism%20B_0.pdf)

Suspicion of duplicate publication in a submitted manuscript  
<http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20A.pdf>  
Suspicion of a duplicate publication in a published paper  
[http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B\\_0.pdf](http://publicationethics.org/files/u7140/redundant%20publication%20B_0.pdf)

For more information on non-ethical conduct and/or penalties please see:  
<http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/reving/article/view/7784/11818>

