



TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN

FRENTE A LOS DESAFÍOS
DE UN SIGLO EN CURSO

Colección: Coediciones Actualidad y Perspectivas para un desarrollo sustentable

2021



**Universidad
Israel**



**EDITORIAL
UNIVERSIDAD
ISRAEL**

Tecnología e innovación frente a los desafíos de un siglo en curso /

Edgar Emanuel González Malla [y otros]; compiladores y editores
Paúl Baldeón Egas, Grisel Pérez, Julio C. Riascos, Brigitte González, Eduardo José Campechano, Bertha Ulloa Rubio, Ruth Elena Cuasialpud, Cristian Samir Ulloa y Jonnathan Opazo Hernández - Ecuador: Editorial UISRAEL, agosto 2021.

284 páginas; 21,0 x 29,7 cm.

Libro digital - PDF

ISBN (digital): **978-9942-8945-1-9**

© Editorial UISRAEL, 2021 Francisco Pizarro E4-142 y Marieta de Veintimilla, Quito, Ecuador,
editorial@uisrael.edu.ec <https://uisrael.edu.ec/>

© Editorial Uniagustiniana, 2021 Av. Ciudad de Cali # 11B-95, Bogotá, D.C., Colombia
coor.publicaciones@uniagustiniana.edu.co <https://www.uniagustiniana.edu.co/>

© Fondo Editorial UCV, 2021 Av. Alfredo Mendiola 6232, Los Olivos - Lima, Perú, f
ondoeditorial@ucv.edu.pe <https://www.ucv.edu.pe/>

© EDICIONES UCM, 2021 Av. San Miguel 3605, Talca, Chile
ediciones@ucm.cl cgonzal@ucm.cl <https://ediciones.ucm.cl>

© Universidad de Nariño, 2021 Calle 18 Cr 50 Ciudadela Universitaria Torobajo, Pasto, Nariño, Colombia
editorial@udenar.edu.co <https://www.udenar.edu.co/>

Katherine Del Cisne Ayala Camacho
Lidice Lorena Álvarez Román

La Editorial UISRAEL se adhiere a la iniciativa de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons
Atribución 4.0, por lo que permite compartir, consultar y descargar libremente siempre y cuando se haga
la atribución correspondiente.

© La Universidad Tecnológica Israel declara que este libro ha sido sometido a revisión por pares

TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN FRENTE A LOS DESAFÍOS DE UN SIGLO EN CURSO

Varios Autores
ISBN: **978-9942-8945-1-9**

Agosto de 2021

COMITÉ ORGANIZADOR

Grisel Pérez Falco

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Paúl Francisco Baldeón Egas

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Patricia Alexandra Albuja Mariño

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Renato Mauricio Toasa Guachi

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Esteban Celi Paredes

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Rosario del Carmen Coral Herrera

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Ana Lucia Tulcán Pastás

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Carolina Paola Jaramillo Bayas

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Ruth Elena Cuasialpud

Universidad Agustiniana, Colombia.

Cristian Samir Ulloa

Universidad Agustiniana, Colombia.

Brigitt González Muñoz

Universidad de Nariño, Colombia.

Julio C. Riascos

Universidad de Nariño, Colombia.

Eduardo José Campechano Escalona

Universidad César Vallejo, Perú.

Bertha Ulloa Rubio

Universidad César Vallejo, Perú.

Jonnathan Opazo Hernández

Universidad Católica del Maule, Chile.

COMITÉ CIENTÍFICO UISRAEL

Norma Molina Prendes

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Erika Sofía Escobar Redín

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Patricia Alexandra Albuja Mariño

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Paúl Francisco Baldeón Egas

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

René Ceferino Cortijo Jacomino

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Grisel Pérez Falco

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Fidel David Parra Balza

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Carolina Paola Jaramillo Bayas

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Rosario del Carmen Coral Herrera

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Ana Lucia Tulcán Pastás

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Esteban Celi Paredes

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Renato Mauricio Toasa Guachi

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Miguel Ángel Aizaga Villate

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Yolvy Javier Quintero Cordero

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Maryory Urdaneta Herrera

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Mayra Alejandra Bustillos Peña

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

William Fernando Ortega Naranjo

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

Luis Fernando Aguas Bucheli

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador.

CORRECCIÓN DE ESTILO**Lcda. Carla Florez**

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

**DISEÑO, MAQUETACIÓN Y
DIAGRAMACIÓN****Mg. José Vergelin**

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

CONTENIDO

CAPÍTULO 1: ALCANCES DE LA ELECTRÓNICA Y LAS COMUNICACIONES

13 VISIÓN GENERAL DE REDES 5G, INTERNET DE LAS COSAS Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES: UN ESTUDIO DE CASOS DE USO Y APLICACIONES

Edgar Emanuel González Malla
Flavio David Morales Arévalo
Rosario del Carmen Coral Herrera
Renato Mauricio Toasa Guachi

29 ANTENAS FLEXIBLES Y SU DESEMPEÑO EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN LA BANDA DE MICROONDAS

Andry Contreras
Maryory Urdaneta Herrera

47 SISTEMA INTELIGENTE DE DETECCIÓN DE CO2 PARA VEHÍCULOS

Tannia Cecilia Mayorga Jácome
Fidel David Parra Balza
René Ernesto Cortijo Leyva
Alexis Ruben Asqui Zuñiga

67 FILTROS ADAPTATIVOS Y ESTRUCTURA LATTICE EN EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

María Fernanda Rivera Sanclemente

103 **SISTEMA INTEGRAL DE HOGAR INTELIGENTE BASADO EN HOME ASSISTANT Y RASPBERRY PI**

Manuel Asdrual Montaña Blacio
Johana Elizabeth Briceño Sarmiento
Oscar Geovany Jiménez Sarango
Edgar Emanuel González Malla

129 **SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE REQUERIMIENTOS, EVENTOS E INCIDENTES PARA LOS CLIENTES DE LA EMPRESA TELCONET S.A EN LA CIUDAD DE QUITO**

Santiago Quilachamín Simbaña
Fidel Parra Balza
Juan Chimarro Amaguaña
Maryorie Urdaneta Herrera

145 **ALGORITMO DE VISIÓN ARTIFICIAL APLICADA A ROBOTS COLABORATIVOS PARA EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS**

Francisco X. Jurado
Iveth C. Proaño
Erika S. Escobar

163 **LÍNEA DE CERVEZA ARTESANAL CON CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO DE TEMPERATURA EN MACERACIÓN Y FERMENTACIÓN**

Fernando Pesántez Bravo
César Carrión Aguirre
Leydi Mingo Morocho
Edgar Emanuel González Malla

CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍAS PARA LA SOCIEDAD

187 BARRERAS PARA APLICAR INDUSTRIA 4.0 EN LAS PYMES

Juan Camilo Gutiérrez
John William Vásquez Capacho
Sebastián García Méndez

201 ESTUDIO SOBRE LAS REDES COMUNITARIAS Y OPERADOR MÓVIL DE INFRAESTRUCTURA Y SU VIABILIDAD DENTRO DEL MARCO REGULATORIO DE LAS TELECOMUNICACIONES EN EL ECUADOR

José Javier De la Torre Guzmán
Martha Elizabeth Salazar Jácome
Nancy del Rocío Velasco Erazo

231 DECRETOS DE MEDIDAS CAUTELARES PRIVATIVAS DE LA LIBERTAD EN EL PROCESO JUDICIAL COLOMBIANO: ESTUDIO DEL MODELO EVALUATIVO DE PREDICCIÓN DE RIESGOS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Johan Sebastián Lozano Parra
Sergio Andrés Caballero Palomino
Katerin Yulieth Cruz Cadena
Nancy Edith Ochoa Guevara

253 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE METODOLOGÍAS DE DESARROLLO DE SOFTWARE EN APLICACIONES MÓVILES

Luis Aguas Bucheli
Mario Pérez Cargua
Henry Recalde Araujo
Renato M. Toasa

273 **CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA INDUSTRIA 4.0 EN ECUADOR 2021**

Pablo Recalde Varela
Ivan Andocilla Oleas
Henry Recalde Araujo
Luis Fernando Aguas Bucheli

PRÓLOGO

Enfrentamos en la actualidad problemáticas que requieren de soluciones tecnológicas innovadoras. Para nadie es un secreto que el mundo se divide en un antes y un después con la pandemia consecuente del COVID-19. Los países tuvieron que crear adaptaciones para la cotidianidad, además de hacer frente a situaciones que generaban una nueva normalidad, en la cual el reinventarse ahora es parte esencial para la innovación y emprendimiento.

Además de la ciencia y tecnología, las ingenierías tienen un alto componente humano y es aquello que también gracias a la pandemia del COVID-19 el mundo se ha humanizado. Por lo que, con estas, se conlleva a la creación de dinámicas transformadoras en las estructuras públicas y privadas de la sociedad. Porque si bien, algunas veces estas tecnologías pueden ser parte del problema actual de globalización, son muchas más las veces en que esta funge como parte principal de la solución.

En este sentido, la Universidad Tecnológica de Israel (Ecuador), junto a la Universidad Agustiniana (Colombia), Universidad César Vallejo (Perú), Universidad Católica del Maule (Chile) y la Universidad de Nariño (Colombia), se complace en compartir con toda la comunidad académica el libro “Tecnología e innovación frente a los desafíos de un siglo en curso”, texto que recopila los resultados científicos de docentes e investigadores que participaron en la Convocatoria de capítulos de Libros de América Latina.

En la primera parte se presentan ocho trabajos investigativos que se centran en el *Capítulo 1: alcances de la electrónica y las comunicaciones*. En este se evidencia un estudio de casos de uso y aplicaciones de redes 5G, internet de las cosas y tecnologías emergentes, finalmente, se comenta sobre el desempeño de antenas flexibles.

En este capítulo también podrán encontrar sistemas inteligentes implementados en hogares, automóviles, línea de cerveza artesanal, además de filtros adaptativos y un algoritmo aplicado a robots colaborativos.

Dentro de la segunda parte, intitulada: “*Tecnologías para la sociedad*”, los lectores podrán encontrar cinco artículos científicos creados de igual manera, con alta rigurosidad académica, metodológica y científica. En este apartado se presenta sobre la Industria 4.0, que busca una mayor eficiencia en los procesos y optimización de los sistemas en la era del conocimiento basado en la cuarta revolución industrial.

Este libro investigativo está dirigido a docentes, investigadores, profesionales y estudiantes que estén interesados en la actualización, innovación y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica del área de ciencias de las ingenierías, por lo que dejamos a disposición para su consulta.

Paúl Francisco Baldeón Egas

pbaldeon@uisrael.edu.ec

Director de la Gestión Integral de las Funciones Sustantivas.

Universidad Tecnológica Israel. Quito, Ecuador.

CAPÍTULO 1: ALCANCES DE LA ELECTRÓNICA Y LAS COMUNICACIONES

VISIÓN GENERAL DE REDES 5G, INTERNET DE LAS COSAS Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES: UN ESTUDIO DE CASOS DE USO Y APLICACIONES

5G NETWORKS, INTERNET OF THINGS AND EMERGING TECHNOLOGIES OVERVIEW: A
STUDY OF USE CASES AND APPLICATIONS

Edgar Emanuel González Malla

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

eegonzalez@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3485-8649>

Flavio David Morales Arévalo

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

fmorales@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5258-8529>

Rosario del Carmen Coral Herrera

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

rcoral@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0157-325X>

Renato Mauricio Toasa Guachi

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

rtoasa@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-2138-300X>

RESUMEN

En la actualidad, las tecnologías emergentes permiten el desarrollo de nuevos casos de uso y aplicaciones que con el rendimiento de las redes y tecnologías existentes no son eficientes cuando se trata de racionalizar los procesos. En el presente documento se propone realizar un estudio sobre la relación entre las redes de 5G y las nuevas tecnologías emergentes como la IoT, la computación en nube y la inteligencia artificial, mediante la revisión de los estándares y documentos relacionados. Por lo tanto, en este trabajo se presentan diferentes arquitecturas que integran las tecnologías mencionadas anteriormente en un entorno controlado, considerando los requerimientos de las diferentes aplicaciones y escenarios. Como estudio de caso se muestran arquitecturas específicas para aplicaciones de agricultura inteligente y sistemas de transporte inteligente. Tras el análisis realizado, se concluye que las redes de 5G se adaptan eficientemente a los nuevos escenarios que, junto con las tecnologías emergentes, ofrecen nuevos servicios y aplicaciones que mejoran la productividad, la calidad de vida y la seguridad de las personas.

PALABRAS CLAVE

5G, IoT, tecnologías emergentes, V2X

ABSTRACT

Currently, emerging technologies allow the development of new use cases and applications, which with the performance of existing networks and technologies are not efficient when it comes to streamlining processes. This paper proposes to carry out a study on the relationship between 5G networks and new emerging technologies such as IoT, Cloud Computing and Artificial Intelligence, by reviewing standards and related papers. Therefore, in this work different architectures are presented that integrate the technologies mentioned above, in a controlled environment, considering the requirements of the different applications and scenarios. As a case study, specific architectures for smart agriculture and intelligent transport systems applications are presented. After the analysis carried out, it is concluded that 5G networks adapt efficiently to new scenarios, which together with emerging technologies, offer new services and applications that improve productivity, quality of life and safety of people.

KEYWORDS

5G, IoT, emerging technologies

INTRODUCCIÓN

Con la incorporación de nuevas tecnologías de comunicaciones inalámbricas se han identificado nuevos casos de uso y escenarios de aplicación. Los escenarios de aplicación para las redes móviles de quinta generación (5G – *Fifth Generation*) (ITU-T, 2015) son: Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB - *enhanced Mobile Broadband*), Comunicaciones Masivas de Tipo Máquina (mMTC - *massive Machine Type Communications*) y Comunicación Ultra Fiable de Baja Latencia (uRLLC- *Ultra Reliable Low Latency Communications*). Las aplicaciones relacionadas con el Internet de las cosas (IoT - *Internet of Things*) tienen una estrecha relación con los tres escenarios indicados anteriormente: eMBB requiere que los dispositivos conectados a Internet sean capaces de transmitir y/o recibir grandes cantidades de información, mMTC permite una alta densidad de dispositivos conectados por kilómetro cuadrado, así como un consumo eficiente de energía de los dispositivos conectados a la red, y uRLLC garantiza una alta fiabilidad de la red y una baja latencia para aplicaciones críticas.

El Internet de las cosas es un concepto general utilizado para referirse a las redes de objetos físicos (cosas), vehículos, máquinas, etc. conectados a Internet. Para permitir esta interconexión es necesario que las “cosas” tengan sensores incorporados que permitan obtener información o datos del entorno, actuadores para ejercer una acción sobre el mismo, y APIs (*Application Programming Interfaces*) que permitan recibir y transmitir datos a Internet. En este sentido, una red 5G garantiza la conexión e intercambio de información entre cientos/miles de dispositivos e Internet. Adicionalmente, otras tecnologías integrales como el *big data*, los sistemas predictivos, la Inteligencia Artificial (IA), el aprendizaje automático (ML - *Machine Learning*), la computación en la nube (*Cloud Computing*), etc. permiten el análisis y el procesamiento de esta información de forma eficiente (Rao & Prasad, 2018).

El impacto del 5G y del Internet de las cosas es prometedor. Los pronósticos indican que para el 2025 habrá hasta 25 mil millones de dispositivos IoT, 11.4 mil millones de consumidores de tecnologías IoT y 13.7 mil millones de dispositivos IoT industriales (5G Americas, 2020). Por lo tanto, para hacer frente a esta alta densidad de dispositivos conectados y a la gran cantidad de información disponible, es esencial operar y gestionar adecuadamente tanto la red móvil, como las plataformas en la nube.

El presente estudio se encuentra organizado de la siguiente manera: en la sección 2 se describe la metodología utilizada, en la sección 3 se exponen los resultados derivados de la investigación. Así, se hace una breve revisión del proceso de estandarización de las redes 5G, se analiza la relación entre las redes 5G y las tecnologías emergentes, y se presentan dos casos de uso con su correspondiente arquitectura de red genérica. Finalmente, en la parte 4 se presentan las conclusiones del trabajo.

Antecedentes

Chin, Fan & Haines (2014, p. 106-112) identifican varias tecnologías emergentes que cambiarán y definirán las futuras generaciones de estándares de telecomunicaciones y se afirma que estas tecnologías pueden mejorar la capacidad, la cobertura o la eficiencia energética.

Mientras que en Rao & Prasad (2018, p. 145-159) se muestra la evolución de la revolución industrial y las tecnologías que han impactado su crecimiento, se mencionan ciertas aplicaciones y usos de la industria 4.0 y las tecnologías emergentes, sugiriendo que esto permitirá un mayor desarrollo tecnológico a nivel mundial.

Los investigadores en Chen, Zhang, Hu, Taleb, & Sheng (2015, p. 704-712) proponen una arquitectura de red inalámbrica basada en la nube con cuatro componentes, es decir, la nube móvil, la red de acceso

radioeléctrica basada en la nube (Cloud RAN), la red reconfigurable y el centro de *big data*, y afirman que las principales contribuciones de este trabajo incluyen: una novedosa arquitectura de acceso a la red inalámbrica basada en la nube virtual, un esquema de colaboración entre la nube remota y los recursos locales, y una reasignación dinámica de recursos móviles basada en *big data*.

En Vilalta et al., (2017, p. 36-43) se propone una arquitectura denominada TelcoFog, cuyas principales ventajas son el despliegue dinámico de nuevos servicios distribuidos de baja latencia. La arquitectura consta de tres bloques principales: un nodo TelcoFog escalable que se integra perfectamente en la infraestructura de telecomunicaciones; un controlador TelcoFog, centrado en el aseguramiento del servicio y basado en el modelado de datos del servicio mediante YANG; y servicios TelcoFog, que pueden ejecutarse sobre el TelcoFog y la infraestructura de telecomunicaciones.

Y Peng, Li, Zhao & Wang (2015, p. 6-14) presentan la arquitectura del sistema H-CRAN definido por software para que sea compatible con las redes definidas por software y proporciona un resumen de los avances recientes en los escenarios de aplicación.

Los trabajos mencionados son la base científica y tecnológica que se utiliza en este trabajo, ya que demuestran que con la integración de varias tecnologías se pueden obtener grandes soluciones tecnológicas.

METODOLOGÍA

La metodología seguida en la redacción de este capítulo consiste en una revisión de información disponible en documentos científicos publicados en los principales repositorios y estándares para sistemas de comunicaciones móviles de quinta generación. Mediante la revisión de documentos científicos se filtraron distintos papers, *white papers*, e informes técnicos relacionados con la estandarización y desarrollo de las redes móviles de quinta generación, así como el Internet de las cosas y tecnologías emergentes. Con respecto a la revisión de estándares, se analizó la información técnica de especificaciones y reportes del 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*). Esta organización está conformada por varios grupos de trabajo del sector de las telecomunicaciones, pertenecientes a países de todo el mundo. El 3GPP publica diferentes series de especificaciones conforma avanza el proceso de estandarización. Así, en las series 38 se encuentran los reportes y especificaciones técnicas para las redes de quinta generación, los cuales se han revisado en este trabajo.

Luego de la revisión del estado de arte y estándares 3GPP se realiza un análisis de la relación entre los distintos indicadores de rendimiento de las redes 5G y los casos de uso definidos para el Internet de las Cosas y tecnologías emergentes.

Adicionalmente, con el fin de ofrecer al lector una visión general del uso de las redes 5G, el Internet de las cosas y distintas tecnologías emergentes, se proponen dos arquitecturas y se analizan con detalles los distintos elementos que lo conforman.

En el entorno científico y académico se han constatado varios trabajos que abordan las tecnologías emergentes y el 5G, pero lo hacen de forma genérica y no hacen ninguna propuesta con estas nuevas tecnologías, tal y como se propone en esta investigación. Para identificar los trabajos relevantes se consideraron algunos aspectos que garantizan su calidad. Inicialmente, se plantearon preguntas para la revisión, tales como: ¿Qué se ha hecho hasta ahora en relación con las tecnologías emergentes? ¿Cuáles han sido las publicaciones más relevantes? Además, se optó por utilizar bases de datos de alto impacto como Science Direct, IEEE, Google Scholar y trabajos publicados en los últimos 5 años.

RESULTADOS

Luego del estudio realizado mediante una revisión de estándares 3GPP, publicaciones científicas y reportes técnicos, a continuación, se presentan los resultados obtenidos y se analizan las prestaciones de las redes 5G en diferentes escenarios de uso.

Proceso de estandarización de las redes móviles de quinta generación

El 3GPP es una organización de grupos de trabajo encargada de la estandarización de tecnologías para redes móviles, incluyendo redes LTE Long Term Evolution (LTE) y 5G New Radio (NR). Así, el 3GPP, en sus diferentes grupos de trabajo, ha estandarizado nuevas tecnologías basadas en redes móviles. El proceso de estandarización del 5G es desarrollado en diferentes versiones y fases, denominadas “Releases”. Estas versiones se desarrollan en paralelo y añaden funcionalidades a las versiones anteriores: mejoras en la capa física, nuevas arquitecturas y servicios, nuevos escenarios y casos de uso, etc. Como se muestra en la *Figura 1*, el 3GPP Release 15 (también conocido como Fase 1 de 5G) se ha finalizado, en junio de 2018, la primera versión de la tecnología 5G NR. Esta versión se ha desarrollado a partir de la evolución de las redes LTE existentes. Por otro lado, el Release 16 (conocido como 5G Fase 2), se ha completado en marzo de 2020; sin embargo, algunas especificaciones de la capa física ya se han completado en diciembre de 2019. En cuanto a la Release 16, está en desarrollo y, según el plazo especificado por el 3GPP, se espera que se complete a finales de 2021 (3GPP, s.f.)

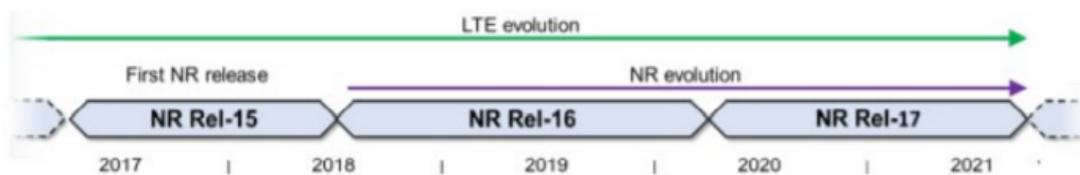


Figura1. Fecha límite para las versiones 15, 16 y 17 del 3GPP.
Fuente: 5G Americas (2020).

A pesar de que, desde el desarrollo de otras redes móviles, como LTE, los casos de uso y aplicaciones para IoT ya se han definido en las *Releases* 14 y 15, es en la *Release* 16 donde se incorpora un estudio de las redes 5G New Radio definidas para IoT Industrial, así nuevas aplicaciones y servicios podrán ser desarrollados gracias a las prestaciones de una red más robusta.

Redes 5G y el Internet de las cosas

En cuanto a las mejoras especificadas para las redes 5G y los nuevos casos de uso, IoT e Industrial IoT (IIoT) son tecnologías que mejoran el rendimiento de la red para aplicaciones, además de la Realidad Aumentada (AR) y la Realidad Virtual (VR), otros casos de uso como la automatización de fábricas, la industria del transporte, la distribución de energía, etc. Tal es el impacto que tendrán las redes 5G en la industria, que la fusión entre las tecnologías 5G NR e IoT se conoce como industria 4.0, que junto con otras tecnologías como el *edge computing*, la inteligencia artificial y el *machine learning* han pasado a considerarse como la cuarta revolución industrial (Tamsons, 2020). En las siguientes subsecciones se explica la importancia de aplicaciones basadas en realidad virtual, realidad aumentada, el IoT Industrial y la importancia de las redes 5G en nuevas aplicaciones del Internet de las cosas.

AR y VR

La AR, junto con la VR, son nuevas tecnologías que permiten a los usuarios experimentar nuevas aplicaciones de uso cotidiano. Por un lado, la realidad aumentada permite combinar imágenes reales y virtuales, de forma interactiva y en tiempo real. Por ejemplo, una aplicación de realidad aumentada permite a los usuarios que necesitan comprar muebles para su hogar elegir entre diferentes opciones de color, tamaño, tipo de material, etc. Así, a través de la realidad aumentada, se puede ver cómo los productos que se compran se adaptan al estilo del lugar donde se van a colocar. Por otro lado, la realidad virtual, como su nombre lo indica, es capaz de crear un mundo totalmente virtual creado por una computadora, algo similar a un videojuego o simulador. Un ejemplo de la aplicación de la realidad virtual es en la formación de los empleados de una empresa, donde pueden adquirir habilidades en la manipulación de maquinaria, antes de pasar a un escenario real.

Tanto las aplicaciones de realidad virtual, como las de realidad aumentada, requieren estrictos requisitos de latencia y ancho de banda de red para funcionar correctamente. Por un lado, para que una aplicación de VR/AR pueda utilizarse sin problemas de desorientación o mareo (cyber-sickness) la latencia o Round-Trip Time (RTT) debe ser inferior a 20 ms (Huawei Technologies, 2016). Es decir, considerando que del lado del usuario la latencia debida a la respuesta del sensor, la respuesta de la pantalla y el tiempo de actualización es de 13 ms, sólo la latencia ofrecida por la red debe ser inferior a 7 ms. Por otro lado, las aplicaciones de VR/AR requieren altas tasas de transmisión por usuario, por lo que se necesitan rendimientos de hasta 20 Mbit/s. Si se consideran varios usuarios conectados a la red, las velocidades de transmisión requeridas son del orden de Gbit/s (Huawei Technologies, 2016).

Las tecnologías 5G se enfrentan hoy en día a obstáculos, especialmente con los teléfonos inteligentes, donde las aplicaciones de AR y VR presentan limitantes para su uso práctico debido a su complejidad y a su escaso aprovechamiento por parte de los desarrolladores de aplicaciones. El uso de 5G permite una mayor flexibilidad para los casos de uso de realidad aumentada debido a las velocidades proporcionadas por esta red, esto permitirá presentar entornos virtuales en vivo en exteriores sin el uso de redes Wi-Fi. El mayor costo actual del uso de este tipo de implementación es el consumo de datos en LTE, y esto es consecuencia de las limitaciones de los planes celulares, esto se solucionaría a menos que los proveedores de telefonía móvil ofrezcan datos ilimitados reales, en todo caso esto significa más costo en los planes celulares.

Un informe de Ericsson's Consumer Lab (2019) revela que las ventajas de utilizar la tecnología 5G son indispensables para garantizar el funcionamiento de los servicios y aplicaciones de AR/VR. Esto se debe a las mejores prestaciones de este tipo de redes y a su adecuada adaptación con los requerimientos potenciales de nuevos casos de uso. Con la implementación del 5G se conseguiría un mejor ancho de banda móvil, y con ello una menor latencia y una mejor experiencia de usuario gracias a tasas de transferencia de datos más estables.

A los desafíos de conectividad para el negocio de la AR/VR se suma la necesidad de implementar defensas contra los ciberataques, especialmente después de conocerse que los dispositivos IoT han sufrido más de mil millones de incidentes de malware en 2016, según un informe de Malwarebytes Labs.

Huawei está animando a los desarrolladores de aplicaciones a utilizar tecnologías 5G de forma masiva, lo que denominó "5G+X" durante la conferencia inaugural de Web Summit 2019 (Guo Ping, 2019). Huawei alentó a los desarrolladores a utilizar el 5G+X industrialmente para ofrecer el uso de la AR para mejorar el trabajo de mantenimiento de las grandes empresas.

IOT industrial

El concepto de IoT industrial también se refiere a la conexión de maquinaria con plataformas que procesan grandes cantidades de datos. Sin embargo, el concepto de “industrial” puede extenderse a aplicaciones que no están necesariamente relacionadas con almacenes o fábricas, sino que también puede extenderse a aplicaciones en agricultura (agricultura inteligente), salud (salud inteligente), ganadería (ganadería inteligente), comercio, publicidad, etc. Básicamente, la IIOT es una subaplicación de la IOT orientada a aplicaciones relacionadas con el consumidor. Así, el IoT industrial puede aplicarse en el sector de la producción, la cadena de suministro, la gestión de edificios, la atención sanitaria, el comercio minorista, etc. IHS Economics & IHS Technology, a través del informe titulado “The 5G economy: How 5G technology will contribute to the global economy”, estima que para el año 2035 las diferentes aplicaciones del IoT industrial representarán un mercado de más de 5 trillones de dólares: 3.364 billones de dólares en la industria manufacturera, 659 billones de dólares en la industria del transporte, 742 billones de dólares en la industria de la construcción, 273 billones de dólares en el sector de los servicios públicos y 249 millones de dólares en el sector minero (Campbell et al., 2017).

¿Qué papel desempeñan las redes 5G en las aplicaciones de IoT?

Las redes 5G juegan un papel fundamental en la generación de nuevos servicios y aplicaciones, ya que ofrecen mejores indicadores clave de rendimiento (KPI - *key performance indicator*) que otras redes predecesoras. Como se muestra en la *Figura 2*, las redes 5G NR pertenecen a las redes consideradas dentro del proyecto de Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2020 (IMT-2020), y ofrecen mejores prestaciones que las redes del proyecto IMT-Advanced (por ejemplo, las redes LTE-A). En la *Figura 2* también se indican los tres escenarios de uso definidos para las redes pertenecientes al proyecto IMT: mMBB, mMTC y uRLLC (ITU-R, 2015).

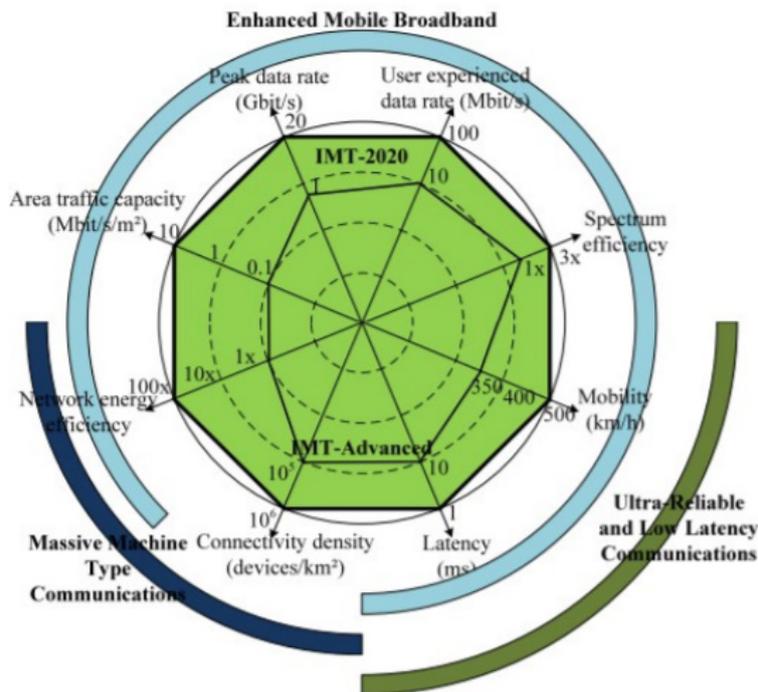


Figura 2. Escenarios de uso y KPI de 5G para IMT-2020 frente a IMT-Advanced (ITU-R, 2015). Fuente: elaboración propia

A continuación, se describen los escenarios de uso determinados para el proyecto IMT-2020 (ITU-R, 2015).

- **eMBB (banda ancha móvil mejorada):** este caso de uso se refiere a los servicios que requieren ciertos parámetros de ancho de banda para funcionar de manera eficiente. Es posible mencionar, por ejemplo, las aplicaciones que requieren la transmisión de información multimedia en alta definición, por lo que la red debe ofrecer un ancho de banda suficiente. Es importante indicar que los requisitos de ancho de banda son relativos al entorno o zona donde se ofrecerá el servicio (en entornos urbanos densos los requisitos de ancho de banda son mayores que en zonas abiertas o rurales). Las características de las redes 5G en comparación con las redes IMT-A son: aumento de las tasas de transmisión máxima (Gbits/s) hasta 20 veces, mejora de la capacidad de tráfico por área (Mbit/s/m²) hasta 10 veces, mejoras en la eficiencia espectral (bits/s/Hz) hasta 3 veces, velocidades de transmisión por usuario (Mbit/s) hasta 10 veces.
- **mMTC (comunicaciones masivas entre máquinas):** este caso de uso se define para permitir la conexión de una alta densidad de dispositivos a la red. Una característica de este caso de uso, además de soportar la conexión de un gran número de dispositivos, es que proporciona un bajo consumo de energía a los dispositivos. Para este caso de uso, las redes 5G permitirán conectar hasta 10 veces más dispositivos y mejorarán la eficiencia energética de la red hasta 100 veces, en comparación con las redes IMT-A. Es importante señalar que la necesidad de reducir el consumo de energía está orientada tanto del lado de la red como del lado del usuario.
- **uRLLC (comunicaciones ultra fiables y de baja latencia):** este caso de uso está referido para aplicaciones que requieren estrictos parámetros de latencia y fiabilidad de la red para funcionar correctamente. Así, las prestaciones de las redes 5G en comparación con las redes IMT-A son un mayor soporte de movilidad (km/h) para los usuarios y la reducción de la latencia (ms) hasta 10 veces.

En la siguiente *Tabla 1* muestra el desempeño de las redes 5G planificadas como parte del proyecto IMT-2020.

Tabla 1.
KPIs para redes móviles en el proyecto IMT-2020

KPI	Projected value
Peak data rate	20 Gbit
User experienced data rate	100 Mbit/s
Mobility	500 km/h
Latency	1 ms
Connectivity density	1000000 devices/km ²
Area traffic capacity	10 Mbit/s/m ²

Fuente: ITU-R (2015)

Los requisitos para las diferentes aplicaciones pueden variar en función del servicio. En las aplicaciones para terminales portátiles los requisitos de latencia son inferiores a 10 ms, la disponibilidad de la red del 99,9999 % y las velocidades de transmisión del orden de kbit/s y Mbit/s. Para aplicaciones en la industria de la robótica los requisitos de latencia son inferiores a 1 ms, la disponibilidad de la red del 99,9999 % y las velocidades de transmisión del orden de kbit/s y Mbit/s. Para las aplicaciones que implican el uso de sensores los requisitos de latencia son inferiores a 100 ms, la disponibilidad de la red del 99,99% y las velocidades de transmisión del orden de kbps; en este último caso, el ahorro de energía de los dispositivos es fundamental (Qualcomm Technologies, Inc., 2019).

Al analizar el rendimiento de las redes 5G, se debe tener en cuenta que algunos servicios simplemente no podrían funcionar correctamente con otras redes. En cuanto al rendimiento de las redes 5G previstas, garantizarán bajas latencias (submilisegundos), velocidades de transmisión del orden de Gbit/s, fiabilidad de la red de hasta el 99,999 %. Los 3 escenarios de uso revisados anteriormente están directamente relacionados con el IoT; sin embargo, depende de la aplicación específica en la que se utilizará. A continuación, se presentan un par de ejemplos en los que se requieren diferentes KPI de red para que una aplicación funcione correctamente: una aplicación que se encuentra actualmente en fase de desarrollo está relacionada con los sistemas de transporte inteligente (ITS); tecnologías conocidas como Cellular - Vehicle to Everything (C-V2X). En esta aplicación se pueden establecer conexiones entre vehículos (V2V), vehículo a peatones (V2P), vehículo a infraestructura (V2I) y vehículo a conexión de red (V2N). Este servicio, que forma parte del Internet de las cosas, requiere una baja latencia, soporte para altas velocidades, altas tasas de transmisión, etc. Otra aplicación que se puede mencionar es el uso del 5G en las fábricas, donde la red debe soportar una alta conexión de dispositivos que transmiten datos simultáneamente, el bajo consumo de energía es importante, y es indispensable que la red garantice la fiabilidad y el bajo retardo, para que todas las líneas de producción trabajen de forma sincronizada.

Áreas de aplicación

Con el fin de proporcionar un análisis específico de la aplicación de 5G IoT en diferentes escenarios, se proponen a continuación un par de ejemplos.

A. IoT y agricultura inteligente

Una de las aplicaciones donde el uso de redes 5G es sustancial es en los sistemas agrícolas inteligentes (Akpakwu, Silva, Hancke, & Abu-Mahfouz, 2017). En estos sistemas, las redes de sensores y actuadores inalámbricos (WSAN - Wireless Sensor and Actuator Network) se distribuyen en el campo para monitorear y controlar la evolución de los diferentes cultivos. Las redes de sensores, como se muestra en la *Figura 3*, están conectadas a un nodo que actúa como puerta de enlace que se encarga de procesar y enrutar los datos a la nube, a través de una red 5G. Utilizando tecnologías de computación en la nube, *machine learning*, IA, *big Data*, etc., la información será procesada, filtrada y podrá ser utilizada para desarrollar aplicaciones que permitan a los usuarios obtener información sobre los cultivos, así como enviar señales para controlar un proceso manualmente, entre otras funciones. En este escenario se pueden integrar otras tecnologías existentes (Akpakwu et al., 2017, pp 3619-3647), por ejemplo, Lora, Zigbee, Wi-Fi, ZigFox, etc.

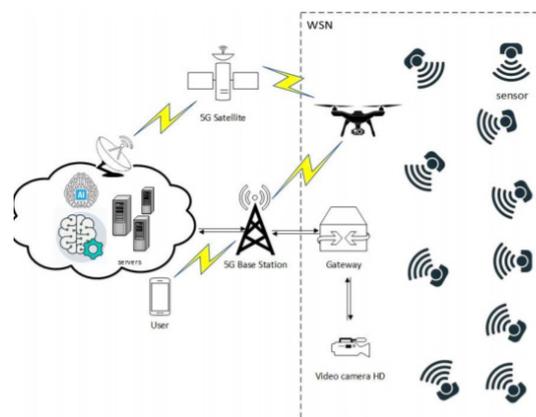


Figura 3_5G IoT y arquitectura de agricultura inteligente.
Fuente: elaboración propia

La importancia de una red 5G para este tipo de aplicación se puede evaluar en los siguientes aspectos:

- Un escenario de uso definido para las redes 5G y que fue analizado previamente, es el mMTC. A través de este escenario de uso es posible que la red permita la conexión e intercambio de información de cientos de miles de dispositivos a la nube. Por otro lado, dentro del mismo escenario de uso, la red 5G garantiza una alta eficiencia energética de la red, lo cual es crucial en redes de sensores con un alto número de dispositivos conectados en red.

- Dentro del escenario de uso de uRLLC y teniendo en cuenta que la red IoT consta de dispositivos UAV (vehículos aéreos no tripulados), una red 5G proporciona comunicaciones de baja latencia y soporta la transmisión de video en tiempo real.

- Adicionalmente, se contempla el uso de redes híbridas junto con satélites 5G (Kota & Giambene, 2019). Este tipo de red resuelve los problemas de cobertura que surgen al implementar sistemas agrícolas inteligentes en zonas rurales.

Existen alternativas adicionales a la topología de red mostrada en la *Figura 3*, incluidas las redes de inteligencia artificial, que rompen con los paradigmas existentes de procesamiento de la información. Así, es posible optar por topologías: IA (Inteligencia Artificial) parcialmente distribuida e IA totalmente distribuida (Crawshaw, Smee, & Hou, 2020). La IA centrada en la nube representa una arquitectura tradicional en la que los dispositivos envían los datos de medición a través de una puerta de enlace de red. En este caso, la puerta de enlace de red simplemente recibe los datos y los envía de vuelta a la nube, sin ningún tipo de procesamiento previo. Por tanto, es en la nube donde se realiza todo el entrenamiento de una red de IA y se determinan las inferencias a partir de los datos.

Por otro lado, en las arquitecturas de IA parcialmente distribuidas, son los sensores los que determinan las inferencias a partir de los datos medidos; es decir, realizan un preprocesamiento de los datos antes de enviarlos a la nube. Finalmente, la arquitectura de IA totalmente distribuida, como se muestra en la *Figura 4*, es una arquitectura de aprendizaje distribuido sobre 5G en la que cada dispositivo obtiene los datos para realizar un entrenamiento en el dispositivo. A continuación, los dispositivos envían la información procesada a la nube, a través de la red 5G. Está claro que esta arquitectura representa un entrenamiento de datos a pequeña escala, a diferencia de la arquitectura de IA centrada en la nube, en la que se realiza un entrenamiento a gran escala, que es computacionalmente costoso.

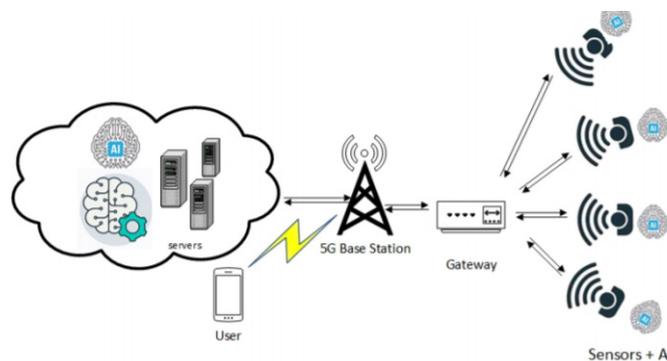


Figura 4. 5G IoT and Arquitectura de Agricultura Inteligente
Fuente: elaboración propia

La arquitectura totalmente distribuida es posible, por un lado, por el rendimiento mejorado de las redes 5G y, por otro, por los avances en nuevos algoritmos y software que pueden integrarse en los dispositivos.

Las ventajas de estas arquitecturas son múltiples: escalabilidad, personalización y privacidad. La escalabilidad tiene que ver con el hecho de que el procesamiento puede extenderse a muchos dispositivos. La personalización permite la incorporación de modelos de IA personalizados dependiendo de la naturaleza de los datos medidos. Estos modelos se actualizan periódicamente a través de la red 5G. La privacidad de los datos se mantiene, ya que los datos sin procesar permanecen en los dispositivos; es decir, no se envían a la nube. Para mejorar aún más la privacidad de los datos, los nuevos modelos de IA permiten que cada dispositivo realice la compresión y el cifrado de los datos antes de enviarlos a la nube. Esto último, además de mejorar la privacidad de la información enviada a la nube, permite preservar el ancho de banda de la red, ya que la información ha sido comprimida.

En este caso de uso vale la pena destacar la importancia de la red para el transporte de los datos. Por un lado, se encuentran dispositivos como sensores, que miden distintas variables en el entorno. Por otro lado, se encuentran las distintas tecnologías emergentes que normalmente funcionan en la nube. Por consiguiente, la necesidad de poder enviar esa información en tiempo y con alta fiabilidad es fundamental, lo que hace necesario el uso de redes de altas prestaciones como tecnologías móviles 5G. Adicionalmente, es necesario que dispositivos reciban datos desde servidores o entidades de red ubicadas remotamente.

B. 5G IoT y sistemas inteligentes de transporte

Los sistemas inteligentes de transporte (ITS - *Intelligent Transportation Systems*) son un conjunto de tecnologías de comunicación para vehículos que mejoran la seguridad vial, reducen el consumo de combustible de los vehículos y permiten incorporar nuevos servicios y aplicaciones (Naik, Choudhury, & Park, 2019). Para que esto sea posible, los vehículos tienen incorporado un conjunto de sensores y dispositivos que pueden recibir o transmitir información a Internet a través de la red celular. Como se indicó anteriormente, la tecnología que está en proceso de estandarización para los sistemas de transporte inteligente a través de la red celular se conoce como C-V2X (*Cellular vehicle-to-everything*). Así, permite la conexión de un vehículo a la red (V2N – *Vehicle to Network*), la conexión de un vehículo a una infraestructura (V2I – *Vehicle to Infrastructure*), la conexión de un vehículo a un peatón (V2P- *Vehicle to Pedestrian*) y la conexión de un vehículo a otro vehículo (V2V – *Vehicle to Vehicle*).

En la *Figura 5* se muestra una arquitectura de red para este servicio. Mediante el modo de comunicación V2V, dos vehículos pueden establecer una comunicación para enviar mensajes de alerta en distintas situaciones en la carretera. Por ejemplo, un vehículo que sufrió un accidente de tránsito puede enviar un mensaje de alerta a los vehículos circundantes en la carretera, con el fin de que el conductor tome alguna precaución o, de ser el caso, reaccione de forma automática ante esa situación. Las comunicaciones V2V puede realizarse mediante dos modos: no asistido o asistido por la red celular. En el primer modo, los equipos a bordo del vehículo están configurados para gestionar una asignación de recursos automática en función del número de vehículos que se encuentran en la carretera. En el segundo modo, las comunicaciones entre vehículos pueden gestionarse mediante la red celular, ya sea LTE o 5G.

De modo similar, un vehículo puede establecer una comunicación con dispositivos de usuario que soporten esa tecnología C-V2X. Un ejemplo sería el caso en el que en una intersección un peatón que se dispone a circular por un paso cebra envía un mensaje de alerta a los vehículos cercanos que transitarán por esa vía. De ese modo, se pueden prevenir accidentes debidos a la distracción, tanto de peatones, como de conductores de vehículos. El modo de comunicación V2N está muy relacionados con la combinación de redes 5G y el Internet de las cosas. Esto debido a que un vehículo es propiamente un objeto que tiene incorporado sensores, actuadores, radares, cámaras de video en alta resolución, etc. Por lo tanto, con el fin de posibilitar servicios avanzados de seguridad vial y control de tráfico en las carreteras se requiere enviar hacia Internet

todo ese volumen de información que genera un vehículo, garantizando una latencia, fiabilidad, ancho de banda adecuados.

El modo de comunicación entre vehículos con infraestructuras (V2I) es similar al modo V2N, con la diferencia de que en una infraestructura no necesariamente es una estación base de telefonía móvil que tiene conexión a Internet. En este caso, las infraestructuras pueden ser nodos de red específicos para servicios de comunicaciones vehiculares que se usan con el fin de mejorar las distancias de cobertura, así como también el envío de datos hacia servidores locales.

En el caso del servicio para el control del pelotón de vehículos, la conexión de los camiones puede ser directamente a un nodo de la red 5G, o bien puede establecerse una conexión por satélite para zonas remotas. Es importante indicar que para que este servicio funcione de forma armónica, tantos vehículos, semáforos y equipos de usuario deben tener incorporada la tecnología C-V2X. Además, es imprescindible que la comunicación pueda establecerse independientemente del operador de red móvil (MNO - *Mobile Network Operator*) al que estén suscritos los usuarios. Además, se requiere compatibilidad entre distintas tecnologías para comunicaciones vehiculares, ya sea basadas en redes IEEE 802.11p o 3GPP.

En el escenario de uso de la *Figura 5*, la importancia de una red 5G puede analizarse en los siguientes aspectos:

- -Escenario de uso mMTC: al igual que la aplicación 5G IoT para el servicio de agricultura inteligente, la red 5G permite la interconexión de cientos de usuarios simultáneamente. Si imaginamos un entorno con autopistas por las que circulan cientos de vehículos, la red debe garantizar la conexión de los vehículos que incorporan el servicio C-V2X, manteniendo parámetros de calidad de servicio adecuados.
- -Escenario de uso uRLLC: este caso de uso definido para las redes 5G, permite a la red ofrecer parámetros de bajo retardo en las comunicaciones. Así, en un entorno donde lo que se necesita es enviar alertas a los conductores de los vehículos para evitar un posible accidente, una baja latencia de la red es fundamental. Mirando un poco más allá, el servicio de control de vehículos autónomos es otra aplicación en la que se requiere un alto rendimiento de la red para garantizar una alta fiabilidad y disponibilidad. En este caso, todos los requerimientos y prestaciones de la red son más exigentes.
- -Escenario de uso de eMMB: los vehículos y otros sistemas de video vigilancia requieren altas velocidades de transmisión a la nube. La red 5G garantiza un ancho de banda suficiente para la transmisión de vídeo de alta resolución que puede utilizarse para implementar sistemas de previsión de tráfico, sistemas de alerta de accidentes de tráfico, etc., utilizando tecnologías en la nube.

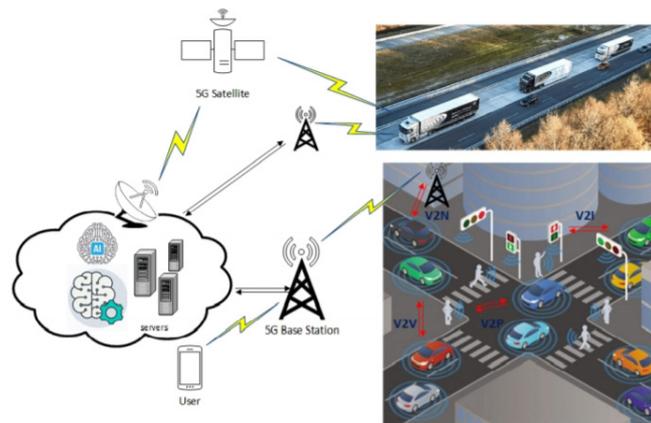


Figura 5. Arquitectura de IA totalmente distribuida y 5G IoT.
Fuente: elaboración propia

Al igual que en la aplicación del 5G IoT en la agricultura inteligente, se puede utilizar una arquitectura de inteligencia artificial totalmente distribuida en la aplicación de 5G IoT en sistemas inteligentes de transporte. En este caso, es posible incorporar sistemas de inteligencia artificial en los vehículos que procesen la información obtenida por los sensores, antes de enviarla a la nube. Además, sofisticados algoritmos de inteligencia artificial en un vehículo pueden tomar decisiones con la información obtenida de su entorno, sin necesidad de enviar esa información a Internet.

CONCLUSIONES

Este documento proporciona una visión general de diferentes aplicaciones y servicios basados en redes 5G y tecnologías emergentes. Tras una revisión del estado del arte, y según los requisitos establecidos para los diferentes casos de uso, se proponen arquitecturas genéricas que permiten la interoperabilidad y el rendimiento eficiente de las diferentes aplicaciones. Así, se concluye que las redes 5G, que están en proceso de desarrollo, cumplen con los requisitos técnicos para permitir servicios basados en la nube, ya que ofrecen parámetros de latencia, fiabilidad, ancho de banda y calidad de servicio de red a altas velocidades de usuario. Por lo tanto, se pueden explotar las aplicaciones de IoT, VR, AR, AI, *cloud computing*, etc. No obstante, es importante señalar que ciertos servicios básicos, que no demandan de estrictos requerimientos potenciales, pueden ofrecerse sin problema con una red 4G LTE. Es decir, la importancia de una red 5G está enfocada en ofrecer servicios avanzados de comunicaciones vehiculares, por ejemplo, en vehículos autónomos.

Como trabajo futuro derivado de esta investigación, se propondrán arquitecturas para diferentes servicios específicos de C-V2X que se han definido en el estándar. Además, se realizarán simulaciones de enlaces End-To-End para estudiar los requisitos de latencia, Calidad de Servicio (QoS) y ancho de banda de diferentes aplicaciones.

REFERENCIAS

- 3GPP. (s.f.). Releases. Recuperado el 02 de Abril de 2020, de <https://www.3gpp.org/specifications/releases>
- 5G Americas. (2020). The 5G Evolution: 3GPP Releases 16 - 17.
- Akpakwu, G. A., Silva, B. J., Hancke, G. P., & Abu-Mahfouz, A. M. (2017). A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. *IEEE Access*, 6, 3619–3647. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2779844>
- Campbell, K., Diffley, J., Flanagan, B., Morelli, B., O'neil, B., & Sideco, F. (2017). The 5G economy: How 5G technology will contribute to the global economy. *IHS Economics and IHS Technology*, 4, 16. <https://cdn.ihs.com/www/pdf/IHS-Technology-5G-Economic-Impact-Study.pdf>
- Chen, M., Zhang, Y., Hu, L., Taleb, T., & Sheng, Z. (2015). Cloud-based Wireless Network: Virtualized, Reconfigurable, Smart Wireless Network to Enable 5G Technologies. *Mobile Networks and Applications*, 20(6), 704–712. <https://doi.org/10.1007/s11036-015-0590-7>
- Chin, W. H., Fan, Z., & Haines, R. (2014). Emerging technologies and research challenges for 5G wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, 21(2), 106–112. <https://doi.org/10.1109/MWC.2014.6812298>
- Crawshaw, J., Smee, J., & Hou, J. (2020). 5G + AI: The Ingredients Fueling Tomorrow's Technology Innovations.
- Ericsson Consumer & IndustryLab Insight Report. (2019). 5G consumer potential. <https://www.ericsson.com/498f26/assets/local/reports-papers/consumerlab/reports/2019/5g-consumer-potential-report.pdf>
- Huawei Technologies. (2016). Empowering Consumer-focused Immersive VR and AR Experiences with Mobile Broadband. <https://www.huawei.com/minisite/hwmbbf16/insights/HUAWEI-WHITEPAPER-VR-AR-Final.pdf>
- ITU-R. (2015). IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/m/R-REC-M.2083-0-201509-I!!PDF-E.pdf
- Kota, S., & Giambene, G. (2019, March). Satellite 5G: IoT use case for rural areas applications. *In Proceedings of the Eleventh International Conference on Advances in Satellite and Space Communications-SPACOMM* (pp. 24-28).
- Malwarebytes Labs. (14 de diciembre de 2016). Security in 2017: Ransomware will remain king. <https://blog.malwarebytes.com/threat-analysis/2016/12/security-in-2017-ransomware-will-remain-king/>
- Naik, G., Choudhury, B., & Park, J.-M. (2019). IEEE 802.11bd 5G NR V2X: Evolution of Radio Access Technologies for V2X Communications. *IEEE Access*, 7, 70169–70184. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919489>
- Peng, M., Li, Y., Zhao, Z., & Wang, C. (2015). System architecture and key technologies for 5G heterogeneous cloud radio access networks. *IEEE Network*, 29(2), 6-14. <https://doi.org/10.1109/MNET.2015.7064897>

- Ping, G. (04 de noviembre de 2019). 5G+X will create a smart new era. Huawei Technologies. <https://www.huawei.com/en/press-events/news/2019/11/5g-x-will-create-a-smart-new-era>
- Qualcomm Technologies, Inc. (abril de 2019). How will 5G transform Industrial IoT? <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/how-5g-will-transform-industrial-iot.pdf>
- Rao, S. K., & Prasad, R. (2018). Impact of 5G technologies on industry 4.0. *Wireless personal communications*, 100(1), 145-159. <https://doi.org/10.1007/s11277-018-5615-7>
- Tamsons, Å. (14 de enero de 2020). How 5G and the Internet of Things can create a winning business. Ericsson. <https://www.ericsson.com/en/blog/2020/1/how-5g-and-the-internet-of-things-can-create-a-winning-business>
- Vilalta, R., López, V., Giorgetti, A., Peng, S., Orsini, V., Velasco, L., Muñoz, R. (2017). TelcoFog: A Unified Flexible Fog and Cloud Computing Architecture for 5G Networks. *IEEE Communications Magazine*, 55(8), 36–43. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600838>

ANTENAS FLEXIBLES Y SU DESEMPEÑO EN SISTEMAS DE COMUNICACIONES EN LA BANDA DE MICROONDAS

FLEXIBLE ANTENNAS AND THEIR PERFORMANCE IN MICROWAVE BAND COMMUNICATION SYSTEMS

Andry Contreras

Universidad del Zulia, Venezuela

acontreras@fing.luz.edu.ve

<https://orcid.org/0000-0002-7757-0680>

Maryory Urdaneta Herrera

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

murdaneta@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8773-5349>

RESUMEN

Las antenas son elementos cruciales en los sistemas inalámbricos que permiten realizar la transducción entre las ondas electromagnéticas y las señales eléctricas. Entre los tipos de antenas que han tomado relevancia en los últimos años están las flexibles, debido a su aplicación en propósitos que requieran curvaturas, para lo cual se ha empleado una diversidad de materiales. Sin embargo, esta área aún está en desarrollo, por lo que se requiere profundizar en el desempeño que se ha obtenido y así dar a conocer sus ventajas y los materiales que han originado mejores resultados. Para ello se propuso la comparación de los distintos tipos de antenas con sustratos flexibles y rígidos que funcionan en la banda de microondas, para determinar aspectos relevantes en sus parámetros técnicos.

Las antenas flexibles revisadas tuvieron un amplio rango de permitividad eléctrica relativa y distintos sustratos (papel, algodón, tereftalato de polietileno, politetrafluoroetileno, polímero cristalino líquido, poliamida, teslin, kapton, dianhídrido piromelítico oxidianilina, caucho de butadieno-nitrilo e híbrido). Los resultados obtenidos muestran que las curvaturas en las antenas flexibles producen una reducción en su desempeño, originada por la elongación o contracción de los materiales. Adicionalmente, las flexibles tienen como ventajas la miniaturización de la antena y la adaptación a curvaturas del lugar de instalación, pero presentaron menores niveles de ganancia y de magnitud S11, con respecto a las antenas rígidas. Las antenas flexibles tienen aún margen de mejora, mediante procesos de optimización que consideren la influencia de las curvaturas y otros factores que degradan su comportamiento.

PALABRAS CLAVE

Antenas flexibles, antenas rígidas, comparación de antenas, sistemas inalámbricos

ABSTRACT

Antennas are crucial elements in wireless systems that allow transduction between electromagnetic waves and electrical signals. Among the types of antennas that have gained relevance in recent years are the flexible ones, due to their application in purposes that require curvatures, for which a diversity of materials have been used. However, this area is still under development, so it is necessary to deepen in the performance that has been obtained and thus make known its advantages and the materials that have originated better results. For this purpose, a comparison of different types of antennas with flexible and rigid substrates operating in the microwave band was proposed in order to determine relevant aspects of their technical parameters.

The flexible antennas reviewed had a wide range of relative electrical permittivity and different substrates (paper, cotton, polyethylene terephthalate, polytetrafluoroethylene, liquid crystalline polymer, polyamide, teslin, kapton, pyromellitic oxydianiline dianhydride, butadiene-nitrile rubber and hybrid). The results obtained show that bends in flexible antennas produce a reduction in their performance, originated by the elongation or contraction of the materials. Additionally, flexible antennas have the advantage of miniaturization of the antenna and adaptation to curvatures of the installation site, but presented lower levels of gain and magnitude S11, with respect to rigid antennas. Flexible antennas still have room for improvement through optimization processes that consider the influence of curvatures and other factors that degrade their performance.

KEYWORDS

Flexible antennas, rigid antennas, comparison of antennas, wireless systems

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, las antenas flexibles han tenido de mayor importancia debido a la miniaturización de los dispositivos de los sistemas inalámbricos, los cuales tienen una aplicación en las redes de sensores corporales inalámbricos (*Wireless Body Sensor Networks, WBAN*) para el cuidado de la salud (Agbor et al., 2018; Kavitha y Swaminathan, 2018). Además, las aplicaciones de estas redes se han expandido en áreas no médicas para distintos sistemas, como las bandas industriales, científicas y médicas (*Industrial, Scientific and Medical, ISM*) 2,4 y 5 GHz y los sistemas de banda ultra ancha (*Ultra WideBand, UWB*) (Adami et al., 2018). Cabe mencionar que estos tipos de antenas tienen una serie de retos, los cuales abarcan desde su construcción, hasta su desempeño, con los materiales utilizados y las condiciones del ambiente donde se usen (Mohamadzade et al., 2019). Por consiguiente, se han realizado varias revisiones acerca de las antenas flexibles, cuyos resultados son descritos a continuación.

Algunas revisiones se han enfocado en las antenas flexibles con sustratos del tipo textil, como, por ejemplo, algodón y poliéster. En dichas investigaciones se analizó el desempeño del sustrato empleado y las pérdidas de absorción por humedad. Además, se mencionaron algunas técnicas de fabricación de las antenas flexibles. Las antenas textiles presentaron una permitividad eléctrica relativa baja (entre 1 y 2), lo cual reduce las pérdidas de ondas superficiales e incrementan la impedancia en el ancho de banda de la antena. La humedad es un factor que afecta significativamente el desempeño de las antenas flexibles con sustrato textil, ya que dicho sustrato absorbe el agua y produce un incremento en la permitividad (Salvado et al., 2012).

Adicionalmente, se han analizado la flexibilidad y la elasticidad de los materiales de construcción de las antenas flexibles, los cuales originan un inconveniente al momento de determinar la forma de los componentes, causando un desplazamiento de la frecuencia resonante de la antena y modificaciones en el ancho de banda (Salvado et al., 2012). Con respecto a las características del material conductor empleado en las antenas flexibles, éstos deben ser maleables y deben tener una baja y estable resistencia eléctrica, menor o igual a $1 \Omega/\text{cuadrado}$, para minimizar las pérdidas. Además, es importante analizar el desempeño de las antenas flexibles cuando éstas experimentan las curvaturas en sus estructuras (Rais et al., 2009).

Otra de las características evaluadas fue la técnica de fabricación de las antenas flexibles en función de distintos parámetros de la construcción, como, por ejemplo, la robustez a la humedad y el costo de fabricación. Las técnicas comparadas fueron antenas bordeadas en textil, incrustación de polímeros, microfluidas con inyección de aleaciones e impresión por inyección de tinta. En dicha investigación se obtuvo que las técnicas de incrustación de polímeros y microfluidas, con inyección de aleaciones, originan una alta robustez a la humedad, mientras que la impresión por inyección de tinta ocasiona una baja robustez. Con respecto al costo de fabricación, es alto para las antenas flexibles que han sido construidas con microfluidas con inyección de aleaciones, pero ha sido bajo para las antenas bordeadas en textil e impresión por inyección de tinta (Mohamadzade et al., 2019).

No obstante, una comparación del desempeño de estas antenas, con un mayor rango de permitividad en el sustrato flexible, no se ha realizado aún. Esta comparación es importante porque permitirá distinguir aquellas que tienen un mejor desempeño, y así contribuir con el desarrollo de criterios de selección del sustrato óptimo para una aplicación dada. Asimismo, permitirá encontrar oportunidades de mejora y brechas entre las antenas rígidas y flexibles.

De esta manera, en este trabajo se compararon distintos tipos de antenas con sustratos flexibles y rígidos para determinar los beneficios y desventajas en la implementación de las antenas flexibles, en función

de su desempeño en la ganancia, la magnitud S11 y el área. También se analizó el comportamiento de las antenas flexibles en un rango amplio de permitividad eléctrica relativa.

METODOLOGÍA

Esta investigación fue del tipo comparativa, ya que se contrastaron las principales características técnicas de las antenas flexibles que han sido usadas en la banda de microondas. Dichas características fueron el tipo de sustrato, la ganancia, el acoplamiento de impedancia y el efecto de las curvaturas. Además, se comparó el desempeño de dichas antenas con respecto a las antenas rígidas. Todo ello para detectar semejanzas y diferencias entre ellas mediante una revisión documental.

Misma que se basó en artículos originales, trabajos presentados en conferencias y simposios, más relevantes de los últimos cinco años, que están registrados en las bases de datos de *IEEE Xplore*, *Scopus* y *SCImago*. En dichos documentos se detectó que las antenas flexibles se han implementado en el sistema universal de telecomunicaciones móviles (*Universal Mobile Telecommunication System, UMTS*), las redes de área local inalámbrica (*Wireless Local Area Networks, WLAN*), las bandas de *ISM* y en los sistemas de *UWB*.

Para el análisis de los resultados se emplearon gráficas de barras, de dispersión y diagramas de caja y bigote, lo cual permitió determinar los aspectos relevantes de los parámetros técnicos de las antenas y comparar el desempeño entre las antenas flexibles y rígidas.

RESULTADOS

Las antenas flexibles diseñadas en los últimos años, en la banda de microondas, han sido de diferentes tipos y se han empleados varios materiales, tanto para el sustrato, como para el conductor del parche radiante y del plano de referencia o tierra. En la siguiente *Figura 1* se aprecia una muestra de dichas antenas en las cuales los autores han seleccionado materiales de bajo costo (*Abdel et al., 2019; Kumar et al., 2016*) o materiales de alto costo (*Al-Sehemi et al., 2017; Guo et al., 2017; Hamouda et al., 2018a; Krykpayev et al., 2017*) para lograr la flexibilidad de la antena y que éstas tengan un buen desempeño en la banda de diseño.

Entre las antenas flexibles de bajo costo se tienen las de sustrato de papel y conductor de grafito (*Figura 1a*), y con sustrato de *jeans* de algodón y conductor de cobre (*Figura 1b*). Mientras que entre las antenas flexibles de mayor costo tienen un sustrato de tereftalato de polietileno (*polyethylene terephthalate, PET*) y conductor de tinta nano-plateada (*Figura 1c*), un sustrato de una película de poliimida o Kapton y conductor de polianilina con nanotubos de carbón con barreras múltiples (*polyaniline/multiwalled carbon nanotubes, PANI/MWCNT*) (*Figura 1d*), un sustrato de caucho de butadieno-nitrilo (*nitrile butadiene rubber, NBR*) y conductor de cobre (*Figura 1e*), y un sustrato híbrido con 85% de poliéster y 15% de algodón y conductor de tinta nano-plateada (*Figura 1f*).

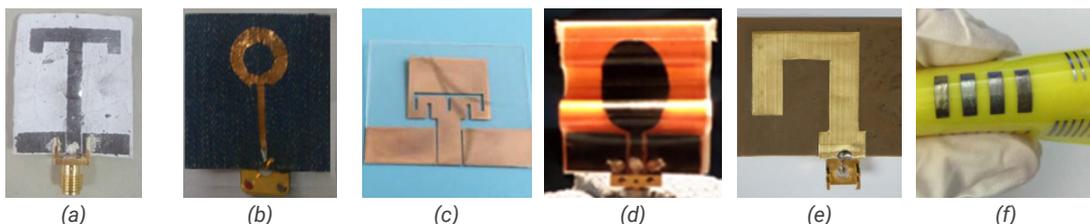


Figura 1. Antenas flexibles diseñadas con distintos materiales, sustrato (conductor): a) papel (grafito), b) algodón (cobre), c) PET (tinta nano-plateada), d) Kapton (PANI/MWCNT), e) NBR (cobre), y f) PET/Algodón (tinta nano-plateada)

Fuente: a) Abdel et al. (2019), b) Kumar et al. (2016), c) Guo et al. (2017), d) Hamouda et al. (2018a), e) Al-Sehemi et al. (2017), y f) Krykpayev et al. (2017)

Con respecto al tipo de antenas seleccionadas, se destaca el uso de las antenas monopulares con distintas formas en el parche resonante (rectangular, circular, triangular u ovalada) que en su mayoría le realizaron modificaciones en la forma del parche convencional. Además, se han seleccionado la antena dipolo modificada (Al-Sehemi et al., 2017) y la antena-F invertida (Krykpayev et al., 2017).

Tipos de sustrato

En esta sección se clasificaron y analizaron los tipos de materiales usados en el sustrato de las antenas flexibles revisadas para determinar su influencia en el desempeño de la antena. Estos materiales se clasifican según su tipo de polímeros de la siguiente manera (Bower, 2002):

- Polímero natural
 - Celulosa: papel y algodón.
- Polímero sintético
 - Termoplástico: PET, politetrafluoroetileno (PTFE), polímero cristalino líquido (Liquid Crystalline Polymer, LCP), poliamida y teslin.
 - Termoestable: Kapton y dianhídrido piromelítico oxidianilina (Pyromellitic dianhydride oxydianiline, PDMA-ODA).
 - Elastómero: NBR.

En la *Figura 2* se muestra la cantidad de antenas flexibles diseñadas que captan los sistemas de comunicación mencionados en función del tipo de material que tiene el sustrato. Los sustratos del tipo de celulosa han sido los más empleados con un 40% de las antenas flexibles revisadas debido a su bajo costo, seguidos del polímero sintético del tipo termoplástico con un 34% y termoestable con un 20%. En menor medida, se han empleado polímeros elastómeros e híbridos (celulosa/termoplástico) con un 3% cada uno.

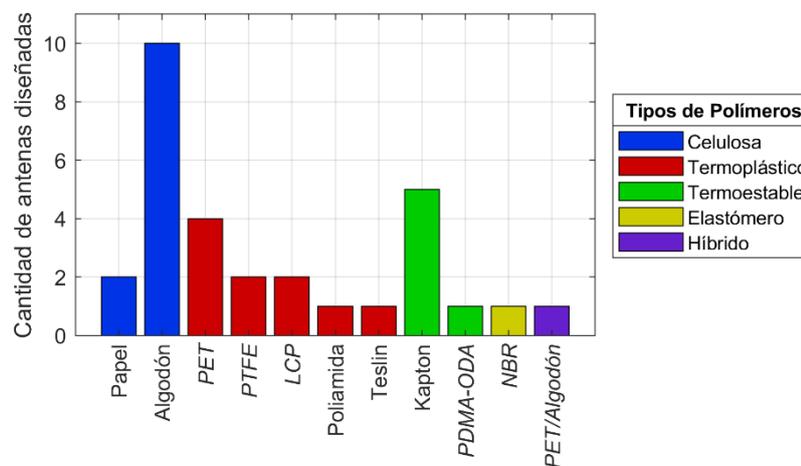


Figura 2. Cantidad de antenas flexibles según el tipo de sustrato.
Fuente: elaboración propia

No se detectó ningún criterio técnico para la selección del tipo de sustrato. Cada uno fue elegido por conveniencia o como parte de la evaluación de los autores, destacando el uso del algodón de *jeans* como el material más seleccionado para el sustrato, en donde se argumentó que es un material económico.

Ganancia

Se analiza el desempeño de las antenas flexibles revisadas en función del tipo de sustrato, cuya permitividad eléctrica relativa varía entre 1,2 y 4,3. Para ello se grafica el valor de ganancia máxima obtenido por la antena con respecto a la permitividad del sustrato como se aprecia en la *Figura 3*. Las antenas con sustrato de papel presentaron el peor desempeño en la ganancia, con un máximo de 1,27 dBi, pero para las antenas con el otro tipo de polímero de celulosa (algodón) se han obtenido mejores valores de ganancia, con un mínimo de 3,27 dBi y un máximo de 6,12 dBi, registrándose el segundo valor de ganancia más alto obtenido entre todas las antenas flexibles revisadas.

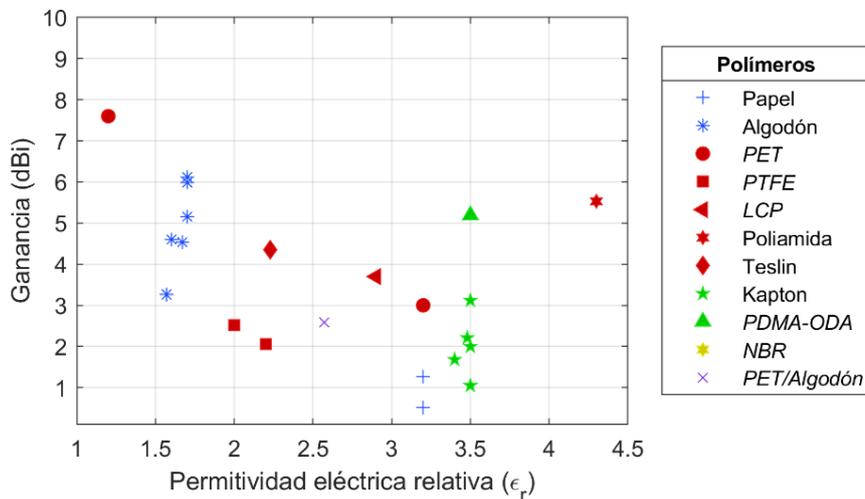


Figura 3. Ganancia de las antenas flexibles con respecto al valor de la permitividad eléctrica relativa del sustrato.
Fuente: elaboración propia

El mejor desempeño de la ganancia fue obtenido con el sustrato del tipo *PET*, mediante la utilización de un fieltro de poliéster que tuvo una baja permitividad eléctrica relativa y bajo costo, con el cual se obtuvo 7,6 dBi (Adami et al., 2018). Para el resto de las antenas con sustratos de termoplástico e híbrido, tales como *PTFE*, *LCP*, poliamida, teslin y *PET/Algodón*, se reportaron valores de ganancia que están cercanos al promedio de las antenas revisadas, y éstas abarcaron un amplio rango de valores de permitividad.

Con respecto a las antenas flexibles con sustrato del tipo de termoestable, las antenas con Kapton presentaron un bajo desempeño con un valor promedio de 2 dBi. Mientras que con la antena de *PDMA-ODA* se obtuvo una ganancia máxima de 5,19 dBi, mejorando el desempeño de este tipo de polímero. Cabe mencionar que, para estas antenas, el medio conductor seleccionado no fue el cobre, sino materiales que en su mayoría eran compuestos de carbón.

Acoplamiento de impedancia

Otro parámetro fundamental de las antenas es la magnitud *S11* (*Figura 4*), con la cual se determina el nivel de acoplamiento de la antena, mientras menor sea la magnitud *S11*, mejor será el acoplamiento de impedancia de la antena. Entonces, se analizó este parámetro en función de la permitividad eléctrica relativa

de cada tipo de sustrato. Los sustratos de termoplásticos presentaron el mejor desempeño de acoplamiento en función de la magnitud S11, con valores inferiores a -20 dB en su mayoría. Sin embargo, los sustratos de celulosa (papel y algodón) tuvieron el peor desempeño con valores cercanos o superiores a -10 dB en su mayoría, lo cual no permite tener un buen acoplamiento de impedancia con otro dispositivo que esté conectado a la antena.

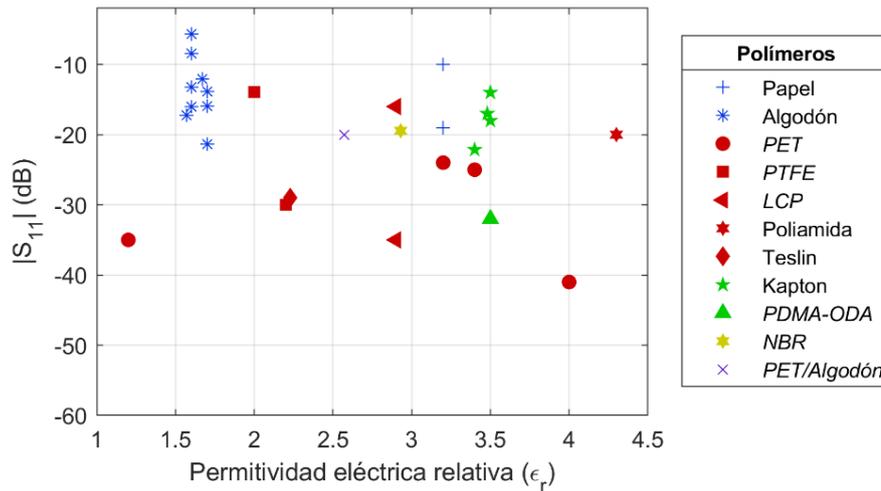


Figura 4. Magnitud S11 de las antenas flexibles con respecto al valor de la permitividad eléctrica relativa del sustrato. Fuente: elaboración propia

Con respecto a los sustratos del tipo termoestable, su valor de magnitud de S11 estuvieron entre -22 y -14 dB para el sustrato de Kapton y para el PDMA-ODA se obtuvo el mejor acoplamiento con un valor de S11 igual a -32 dB, pero con este sustrato el costo de fabricación de la antena es superior. Por último, para los sustratos del tipo elastómero e híbrido tuvieron un buen desempeño con valores cercanos a -20 dB.

Efecto de las curvaturas

Una de las ventajas de las antenas flexibles es que éstas pueden adaptarse a cualquier superficie irregular en donde se les desee instalar, por lo cual es importante evaluar su desempeño con distintas curvaturas. Del total de antenas flexibles revisadas, tan solo el 23% ha realizado esta evaluación, y el resto de las investigaciones se han enfocado en el desempeño de los materiales seleccionados para la antena. En la Figura 5 se observan dos curvaturas típicas para la evaluación de las antenas, una es a lo ancho y otra es a lo largo. Generalmente, solo se ha realizado una sola curvatura, pero en Hamouda et al. (2018a) se evaluó dos curvaturas a lo largo de la antena.



Figura 5. Antena flexible con curvatura a lo ancho (a) y a lo largo (b). Fuente: Ferreira et al. (2017)

En la siguiente *Tabla 1* se registran los valores de ganancia y magnitud S11 de las antenas flexibles cuando están planas y cuando son sometidas a las curvaturas mostradas en la *Figura 5*, en donde se aprecia como la mayoría de estas antenas presentan un peor desempeño en estos parámetros a medida que se realicen las curvaturas. La reducción promedio en la ganancia ha sido 1,0 dBi y en la magnitud S11 ha sido 8.0 dB con un máximo de 20 dB. A pesar de estas reducciones, las antenas se mantienen con un funcionamiento adecuado.

Tabla 1.

Resultados registrados de la ganancia y de la magnitud S11 en las antenas flexibles con curvaturas

Tipo de antena	Sustrato	Ganancia (dBi)			S ₁₁ (dB)			Referencia
		Antena plana	Curva a lo ancho	Curva a lo largo	Antena plana	Curva a lo ancho	Curva a lo largo	
PRMA	Algodón	4,6	3,9	3,4	-18,00	-14,15	-15,15	(Ferreira et al., 2017)
PTMA fractal	PTFE	N/A	N/A	N/A	-30,00	-17,00	N/A	(Arif et al., 2019)
PRMA modificada	PET	N/A	N/A	N/A	-41,00	-28,00	-21,00	(Guo et al., 2017)
PRMA	PET	N/A	N/A	N/A	-25,00	-21,50	N/A	(Li et al., 2020)
PRMA con SRR	LCP	N/A	N/A	N/A	-16,00	N/A	-12,00	(Venkateswara et al., 2019)
PCMA	Kapton	2,21	N/A	3,31	-17,00	-29,00	-22,00	(Hamouda et al., 2018a)
PCMA modificada	PD-MA-ODA	N/A	N/A	N/A	-32,00	N/A	-28,00	(Wang et al., 2019)

N/A: No Aparece

Fuente: elaboración propia

No obstante, en Hamouda et al. (2018a) se evaluaron dos curvaturas a lo largo de la antena y se obtuvo un mejor desempeño de la antena flexible con una mejora de 1,1 dBi en la ganancia y una mejora promedio de 8,5 dB en la magnitud S11. Esta antena diseñada para el sistema *UWB*, presentó dichas mejoras en algunas componentes de la frecuencia, pero el desempeño fue peor en otras componentes de la banda de diseño. De esta manera, es importante realizar este estudio en las antenas flexibles y buscar mejorar su desempeño mediante la optimización de la geometría de las antenas considerando distintas curvaturas.

Resumen de las características técnicas

Tabla 2.
Parámetros de las antenas flexibles revisadas

Sustrato	Permitividad eléctrica relativa	Ganancia	Acoplamiento ($ S_{11} $)
<i>Papel</i>	<i>Media</i>	<i>Baja</i>	<i>Bajo</i>
<i>Algodón</i>	<i>Baja</i>	<i>Variable</i>	<i>Bajo-Medio</i>
<i>PET</i>	<i>Variable</i>	<i>Media-Alta</i>	<i>Medio-Alto</i>
<i>PTFE</i>	<i>Baja</i>	<i>Baja</i>	<i>Bajo-Alto</i>
<i>LCP</i>	<i>Media</i>	<i>Media</i>	<i>Bajo-Alto</i>
<i>Poliamida</i>	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Medio</i>
<i>Teslin</i>	<i>Baja</i>	<i>Media</i>	<i>Alto</i>
<i>Kapton</i>	<i>Alta</i>	<i>Baja-Media</i>	<i>Bajo-Medio</i>
<i>PDMA-ODA</i>	<i>Alta</i>	<i>Media</i>	<i>Alto</i>
<i>NBR</i>	<i>Media</i>	<i>N/A</i>	<i>Bajo</i>
<i>PET/Algodón</i>	<i>Media</i>	<i>Baja</i>	<i>Medio</i>

N/A: no aparece

Fuente: elaboración propia

En la *Tabla 2* se registra un resumen de los parámetros de las antenas flexibles revisadas en función del tipo de sustrato seleccionado por los autores. Para ello, se realizó una clasificación cualitativa de los parámetros de comparación de la siguiente manera: la permitividad eléctrica relativa es baja (1,2 – 2,2), media (2,3 – 3,3), o alta (3,4 – 4,4); la ganancia es baja (0,5 – 2,9 dBi), media (3,0 – 5,4 dBi), o alta (5,5 – 8,0 dBi); y el acoplamiento es bajo (menor a -20), medio (-30 – -20), o alto (mayor a -30). Cuando un parámetro es variable significa que está en las tres categorías.

Comparación entre las antenas flexibles y las rígidas

En esta sección se compara el desempeño de las antenas flexibles con respecto a las rígidas, considerando los parámetros de comparación de la ganancia, la magnitud de S_{11} y el área que ocupa la antena. Para ello, se realizó una revisión documental de las antenas rígidas más relevantes de los últimos años que operan en los sistemas *UMTS*, *ISM/WLAN* (2,4 GHz y 5 GHz) y *UWB*, ya que han sido los sistemas en donde se han diseñado las antenas flexibles revisadas. En la *Tabla 3* se registran los rangos de los parámetros de comparación para las antenas flexibles y rígidas revisadas, los cuales están categorizado por cada sistema inalámbrico.

Tabla 3.
Rango de los parámetros de las antenas rígidas y flexibles revisadas

Sistema	Antena	Ganancia (dBi)	$ S_{11} $ (dB)	Área (mm ²)	Referencia
UMTS	Rígida	3,20	-24,00 – -13,03	8118,0	(Benayad y Tellache, 2019; Shen et al., 2017)
	Flexible	1,27	-19,00	1050,0	(Abdel et al., 2019)
ISM/WLAN (2,4 GHz)	Rígida	2,10 – 8,89	-54,00 – -21,64	456,0 – 9216,0	(Ahmed et al., 2017; Benayad y Tellache, 2019; Chuma et al., 2018; Contreras y Rodríguez, 2021; Contreras et al., 2020a; Contreras et al., 2020b; Kang et al., 2017; Liu et al., 2019; Mansour et al., 2018; Meor et al., 2017; Naqvi y Khan, 2018; Partal y Partal, 2018; Shen et al., 2017; Shi et al., 2018; Wang et al., 2018)
	Flexible	1,05 – 7,60	-41,00 – -5,70	125,0 – 9696,0	(Adami et al., 2018; Agbor et al., 2018; Al-Sehemi et al., 2017; Arif et al., 2019; Ferreira et al., 2017; Guo et al., 2017; Hamouda et al., 2018b; Kavitha y Swaminathan, 2018; Krykpayev et al., 2017; Li et al., 2020; X. Zhang et al., 2019)
ISM/WLAN (5 GHz)	Rígida	2,89 – 5,10	-33,00 – -23,00	237,6 – 5625,0	(Kumar et al., 2020; Lu et al., 2019; Mishra et al., 2017)
	Flexible	0,51 – 3,12	-24,00 – -10,00	1050,0 – 4524,0	(Abdel et al., 2019; Desai et al., 2020; Hamouda et al., 2018b; Vashi y Upadhyaya, 2020; Venkateswara et al., 2019)
UWB	Rígida	2,30 – 7,3	-40,00 – -20,00	1225,0 – 3190,0	(Agrawal et al., 2018; Lv et al., 2019; Mansour et al., 2019; Mathur et al., 2018; Singh et al., 2018)
	Flexible	2,21 – 6,12	-35,00 – -12,10	517,0 – 2000,0	(Gupta et al., 2016; Hamouda et al., 2018a; Hosseini y Afsahi, 2019; Kumar et al., 2016; Reddy et al., 2017; Wang et al., 2019; Zahran y Gaafar, 2016)

Fuente: elaboración propia

Las rígidas revisadas son de distintos tipos, predominando la selección de las antenas monopolares con diferentes formas en el parche radiante, tal como sucedió con las antenas flexibles. El material usado para el medio conductor ha sido el cobre, y el sustrato ha sido un polímero del tipo termoplástico o termoestable. Para el primer polímero se ha usado el *PTFE* en un 11% con distintos valores de permitividad eléctrica relativa que oscilan entre 2,2 y 10,2. Mientras que, para el segundo polímero se ha empleado el *epoxy* en un 89% con una permitividad entre 3,6 y 4,6.

En la *Figura 6* se observa el diagrama de caja y bigote de la ganancia registrada por los autores de las antenas rígidas y flexibles, la cual se categorizó por sistema inalámbrico. De esta manera, se aprecia que las antenas rígidas han presentado un mejor desempeño en la ganancia en cada sistema, lo cual indica que es necesario seguir con las mejoras de las antenas flexibles, por ejemplo, mediante la utilización de métodos de optimización para el diseño de estas antenas.

Con respecto al sistema inalámbrico en el cual se ha obtenido el mejor desempeño, se destaca el sistema *ISM/WLAN* 2,4 GHz para ambas antenas, obteniendo un máximo de 8,89 dBi (Mansour et al., 2018) y 7,60 dBi (Adami et al., 2018) con la antena rígida y la antena flexible respectivamente. Adicionalmente, la diferencia del promedio entre las antenas fue igual a 1,93, 1,69, 2,08 y 0,43 dBi para los sistemas *UMTS*, *ISM/WLAN* de 2,4 GHz y 5 GHz, y *UWB*.

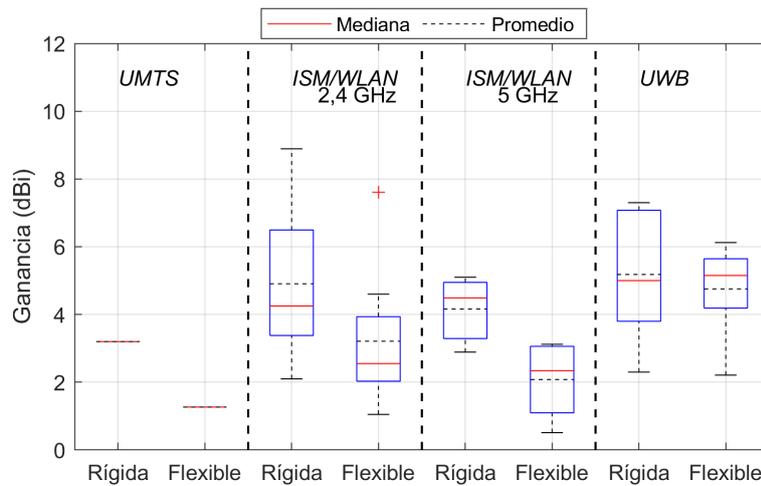


Figura 6. Diagrama de caja y bigote para la ganancia de las antenas revisadas, indicando su mediana y promedio.
Fuente: elaboración propia

En lo referente al acoplamiento de la antena se grafica la magnitud S11 por cada sistema inalámbrico y tipo de antena. De igual manera que con la ganancia, las antenas rígidas presentaron un mejor comportamiento que las antenas flexibles, debido a que tuvieron valores de la magnitud S11 inferiores. También se obtuvieron las mejores respuestas de este parámetro para el sistema ISM/WLAN 2,4 GHz, con un valor de -54 dB (Ahmed et al., 2017) con la antena rígida y -41 dB (Guo et al., 2017) con la antena flexible. La diferencia del promedio del sistema UMTS fue 0,49 dB, del ISM/WLAN 2,4 GHz fue 10,21 dB, del ISM/WLAN 5 GHz fue 9,26 dB y del sistema UWB fue 6,48 dB, presentando una mayor diferencia en la distribución de los resultados en los sistemas ISM/WLAN, como se aprecia en la Figura 7.

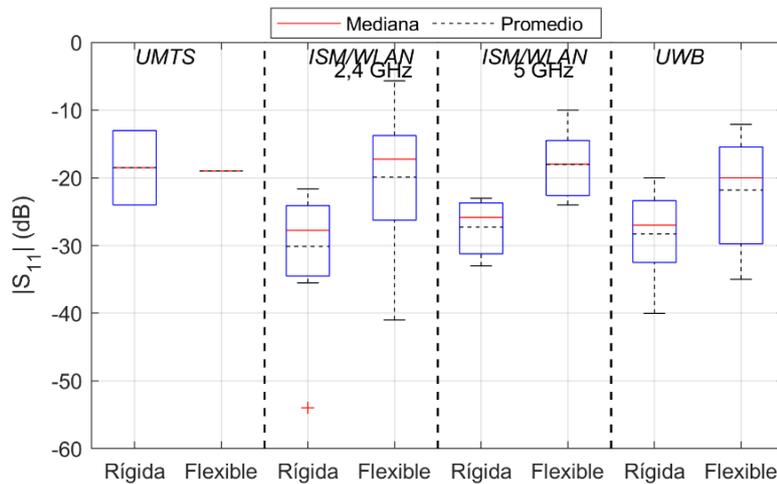


Figura 7. Diagrama de caja y bigote para la magnitud de S11 de las antenas revisadas, indicando su mediana y promedio.
Fuente: elaboración propia

Para el área que ocupan las antenas revisadas, los resultados obtenidos presentaron un comportamiento estadístico distinto a los anteriores dos parámetros de comparación (Figura 8), obteniendo un mejor desempeño de las antenas flexibles, ya que tuvieron tamaños reducidos de la antena, factor que es importante para el uso actual de las antenas, en general. Además, las distribuciones para las antenas flexibles tuvieron una menor dispersión que el obtenido con las antenas rígidas. La diferencia del promedio fue mayor en los sistemas UMTS e ISM/WLAN 2,4 GHz con un valor de 7068 mm² y 1671 mm², pero esta diferencia fue menor en el sistema UWB con un valor de 579 mm².

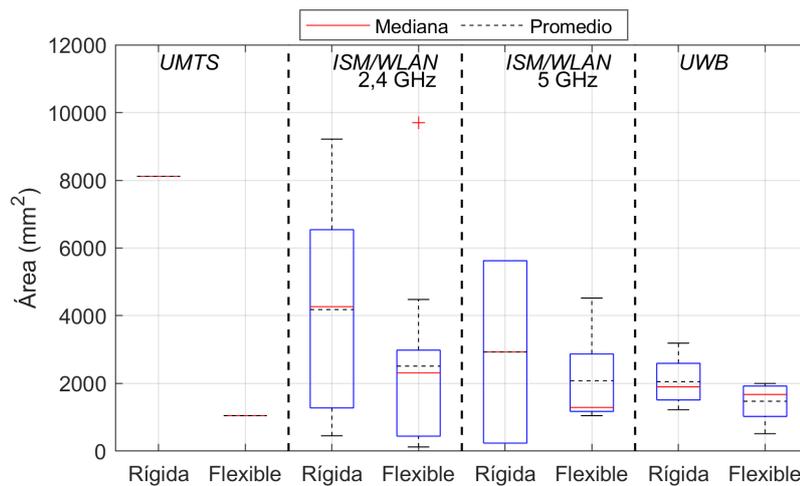


Figura 8. Diagrama de caja y bigote para el área de las antenas revisadas, indicando su mediana y promedio.
Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

En esta investigación se analizaron las antenas flexibles más relevantes de los últimos años, con diversos sustratos que tienen un amplio rango de permitividad eléctrica relativa, comprendido de 1,2 a 4,3. Estos sustratos se clasificaron en papel, algodón, *PET*, *PTFE*, *LCP*, *poliamida*, *teslin*, *kapton*, *PDMA-ODA*, *NBR* e híbrido. De acuerdo a esta clasificación se obtuvo un mejor desempeño en la ganancia con sustratos del tipo poliamida, algodón y *PET*, y un mejor acoplamiento de la antena con los sustratos *PET*, *PDMA-ODA* y *teslin*, principalmente.

Una pequeña porción de las antenas revisadas realizó la evaluación de la curvatura, mediante un doblado a lo largo o a lo ancho de la antena, en donde se ha obtenido una reducción en el desempeño de esta, con respecto a la antena si estuviera plana. Esto es originado por la elongación o contracción de los materiales de estas antenas, las cuales son monopulares con distintas formas del parche resonante, tales como rectangular, circular, triangular o hexagonal.

Con respecto a la comparación entre las antenas rígidas y flexibles, se concluye que las flexibles, en las distintas bandas de los sistemas inalámbricos revisados, han tenido menores áreas que las antenas rígidas, pero el desempeño en términos de la ganancia y de la magnitud *S11* fue inferior que el obtenido con las antenas con sustratos rígidos. Por consiguiente, las antenas flexibles tienen aún margen de mejora, mediante procesos de optimización que consideren estos parámetros, la influencia de las curvaturas y otros factores que degradan el desempeño de estas antenas.

Esto indica que las flexibles tienen como ventajas la miniaturización de la antena, lo cual permite una mejor adaptación a las actuales aplicaciones, además de ser componentes que pueden ajustarse a curvaturas del lugar de instalación. Sin embargo, tienen desventajas en su implementación, ya que presentaron menores niveles de ganancia y de magnitud *S11*, con respecto a las antenas rígidas convencionales.

REFERENCIAS

- Abdel, A., Abdel-Motagaly, A., Ibrahim, A., El, W., & Abdalla, M. (2019). A printed expanded graphite paper based dual band antenna for conformal wireless applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 110, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.152869>
- Adami, S. E., Proynov, P., Hilton, G. S., Yang, G., Zhang, C., Zhu, D., & Stark, B. H. (2017). A flexible 2.45-GHz power harvesting wristband with net system output from– 24.3 dBm of RF power. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 66(1), 380-395. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2700299>
- Agbor, I., Biswas, D. K., & Mahbub, I. (2018, April). A comprehensive analysis of various electro-textile materials for wearable antenna applications. In *2018 Texas Symposium on Wireless and Microwave Circuits and Systems (WMCs)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WMCaS.2018.8400628>
- Agrawal, S., Parihar, M. S., & Kondekar, P. N. (2018). A quad-band antenna for multi-band radio frequency energy harvesting circuit. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 85, 99-107. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2017.12.035>
- Ahmed, S., Zakaria, Z., Husain, M. N., Ibrahim, I. M., & Alhegazi, A. (2017). Efficient feeding geometries for rectenna design at 2.45 GHz. *Electronics Letters*, 53(24), 1585-1587. <https://doi.org/10.1049/el.2017.2657>
- Al-Sehemi, A. G., Al-Ghamdi, A. A., Dishovsky, N. T., Atanasov, N. T., & Atanasova, G. L. (2017). Flexible and small wearable antenna for wireless body area network applications. *Journal of Electromagnetic Waves and applications*, 31(11-12), 1063-1082. <https://doi.org/10.1080/09205071.2017.1336492>
- Arif, A., Zubair, M., Ali, M., Khan, M. U., & Mehmood, M. Q. (2019). A compact, low-profile fractal antenna for wearable on-body WBAN applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(5), 981-985. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2906829>
- Benayad, A., & Tellache, M. (2020). A compact energy harvesting multiband rectenna based on metamaterial complementary split ring resonator antenna and modified hybrid junction ring rectifier. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(2), e22031. <https://doi.org/10.1002/mmce.22031>
- Bower, D. (2002). *An Introduction to Polymer Physics*. Cambridge, England: Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511801280>
- Chuma, E. L., Rodríguez, L. D. L. T., Iano, Y., Roger, L. L. B., & Sanchez-Soriano, M. A. (2018). Compact rectenna based on a fractal geometry with a high conversion energy efficiency per area. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(2), 173-178. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2016.1150>
- Contreras, A., & Rodríguez, B. (2021). Optimization of a Novel Rectenna for RF Energy Harvesting at 2.45 GHz. *Wireless Personal Communications*, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08338-x>
- Contreras, A., Rodríguez, B., Steinfeld, L., Schandy, J., & Siniscalchi, M. (2020a). Design of a Rectenna for Energy Harvesting on Wi-Fi at 2.45 GHz. In *2020 Argentine Conference on Electronics (CAE)* (pp. 63-68). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CAE48787.2020.9046372>

- Contreras, A., Steinfeld, L., Siniscalchi, M., Schandy, J., & Rodríguez, B. (2020b). A Rectenna as Energy Source for Wireless Sensor Nodes. In *2020 IEEE 11th Latin American Symposium on Circuits & Systems (LASCAS)* (pp. 1-4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/LASCAS45839.2020.9069021>
- Desai, A., Upadhyaya, T., Patel, J., Patel, R., & Palandoken, M. (2020). Flexible CPW fed transparent antenna for WLAN and sub-6 GHz 5G applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(5), 2090-2103. <https://doi.org/10.1002/mop.32287>
- Ferreira, D., Pires, P., Rodrigues, R., & Caldeirinha, R. F. (2017). Wearable Textile Antennas: Examining the effect of bending on their performance. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 59(3), 54-59. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7908965>
- Guo, X., Hang, Y., Xie, Z., Wu, C., Gao, L., & Liu, C. (2017). Flexible and wearable 2.45 GHz CPW-fed antenna using inkjet-printing of silver nanoparticles on pet substrate. *Microwave and optical technology letters*, 59(1), 204-208. <https://doi.org/10.1002/mop.30261>
- Gupta, N., Singh, V. K., Ali, Z., & Ahirwar, J. (2016). Stacked textile antenna for multi band application using foam substrate. *Procedia Computer Science*, 85, 871-877. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.05.277>
- Hamouda, Z., Wojkiewicz, J. L., Pud, A. A., Kone, L., Bergheul, S., & Lasri, T. (2018a). Flexible UWB organic antenna for wearable technologies application. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(2), 160-166. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2017.0189>
- Hamouda, Z., Wojkiewicz, J. L., Pud, A. A., Koné, L., Bergheul, S., & Lasri, T. (2018b). Magnetodielectric nanocomposite polymer-based dual-band flexible antenna for wearable applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(7), 3271-3277. <https://doi.org/10.1109/TAP.2018.2826573>
- Hosseini, S., & Afsahi, M. (2019). Compact and ultra-wideband CPW-fed square slot antenna for wearable applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 106, 108-115. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2019.04.024>
- Kang, Z., Lin, X., Tang, C., Mei, P., Liu, W., & Fan, Y. (2017). 2.45-GHz wideband harmonic rejection rectenna for wireless power transfer. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 9(5), 977-983. <https://doi.org/10.1017/S1759078716001082>
- Kavitha, A., & Swaminathan, J. N. (2018). Design of flexible textile antenna using FR4, jeans cotton and teflon substrates. *Microsystem Technologies*, 25(4), 1311-1320. <https://doi.org/10.1007/s00542-018-4068-y>
- Krykpayev, B., Farooqui, M. F., Bilal, R. M., Vaseem, M., & Shamim, A. (2017). A wearable tracking device inkjet-printed on textile. *Microelectronics journal*, 65, 40-48. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2017.05.010>
- Kumar, T., Dwivedy, B., & Kumar, S. (2020). Design of a meandered line microstrip antenna with a slotted ground plane for RFID applications. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 118, 153130. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2020.153130>
- Kumar, V., Seema, S., & Naresh, D. (2016). Wearable ultra wide dual band flexible textile antenna for WiMax/WLAN application. *Wireless Personal Communications*, 95(2), 1075-1086. <https://doi.org/10.1007/s11277-016-3814-7>

- Li, Z., Sinha, S. K., Treich, G. M., Wang, Y., Yang, Q., Deshmukh, A. A., & Cao, Y. (2020). All-organic flexible fabric antenna for wearable electronics. *Journal of Materials Chemistry C*, 8(17), 5662-5667. <https://doi.org/10.1039/D0TC00691B>
- Liu, R., Wang, X., Nie, D., Wang, L., Cui, W., Wang, M., ... & Li, E. (2020). Metasurface: Enhancing gain of antenna and energy harvesting system design. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 30(2), e22053. <https://doi.org/10.1002/mmce.22053>
- Lu, P., Huang, K. M., Yang, Y., Cheng, F., & Wu, L. (2019). Frequency-reconfigurable rectenna with an adaptive matching stub for microwave power transmission. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 18(5), 956-960. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2906671>
- Lv, Y., Zhang, J., & Hou, H. (2019). A novel triple band-notched UWB printed monopole antenna. *Progress In Electromagnetics Research*, 81, 85-95. <https://doi.org/10.2528/PIERM19022201>
- Mansour, M. M., Takiguchi, O., Inoi, T., & Kanaya, H. (2018). Experimental investigation of wireless energy harvesting with a Bluetooth low energy sensing unit. In *2018 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC)* (pp. 189-193). IEEE. <https://doi.org/10.23919/ICEP.2018.8374700>
- Mansour, M., Le Polozec, X., & Kanaya, H. (2019). Enhanced broadband RF differential rectifier integrated with archimedean spiral antenna for wireless energy harvesting applications. *Sensors*, 19(3), 655. <https://doi.org/10.3390/s19030655>
- Mathur, M., Agrawal, A., Singh, G., & Bhatnagar, S. K. (2018). A compact coplanar waveguide fed wideband monopole antenna for rf energy harvesting applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 63, 175-184. <https://doi.org/10.2528/PIERM17101201>
- Meor, M., Zakaria, Z., Husain, M., & Misran, M. (2017). A high-efficiency Rectenna design at 2.45 GHz for RF energy scavenging. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC)*, 9(3), 151-154.
- Mishra, S., Varavadekar, J., & Haldankar, S. (2017). Design of rectenna for energy harvesting in ISM band. In *2017 International conference of Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)* (Vol. 1, pp. 359-362). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICECA.2017.8203704>
- Mohamadzade, B., Hashmi, R. M., Simorangkir, R. B., Gharaei, R., Ur Rehman, S., & Abbasi, Q. H. (2019). Recent advances in fabrication methods for flexible antennas in wearable devices: State of the art. *Sensors*, 19(10), 2312. <https://doi.org/10.3390/s19102312>
- Naqvi, S. A., & Khan, M. S. (2018). Design of a miniaturized frequency reconfigurable antenna for rectenna in WiMAX and ISM frequency bands. *Microwave and Optical Technology Letters*, 60(2), 325-330. <https://doi.org/10.1002/mop.30962>
- Partal, H. P., Partal, S. Z., & Belen, M. A. (2018). Design and implementation of a RF energy harvesting module with DC power control. In *2018 22nd International Microwave and Radar Conference (MIKON)* (pp. 33-36). IEEE. <https://doi.org/10.23919/MIKON.2018.8405216>

- Rais, N. H. M., Soh, P. J., Malek, F., Ahmad, S., Hashim, N. B. M., & Hall, P. S. (2009, November). A review of wearable antenna. In *2009 Loughborough antennas & propagation conference* (pp. 225-228). IEEE. <https://doi.org/10.1109/LAPC.2009.5352373>
- Reddy, B., Kumar, S., Rao, R., Tiwari, N., & Balachary, M. (2017). Design and analysis of wideband monopole antennas for flexible/wearable wireless device applications. *Progress in Electromagnetics Research*, 62, 167-174. <https://doi.org/10.2528/PIERM17092107>
- Salvado, R., Loss, C., Gonçalves, R., & Pinho, P. (2012). Textile materials for the design of wearable antennas: A survey. *Sensors*, 12(11), 15841-15857. <https://doi.org/10.3390/s121115841>
- Shen, S., Chiu, C. Y., & Murch, R. D. (2017, July). A broadband L-probe microstrip patch rectenna for ambient RF energy harvesting. In *2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting* (pp. 2037-2038). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8073061>
- Shi, Y., Fan, Y., Jing, J., Yang, L., Li, Y., & Wang, M. (2018). An efficient fractal rectenna for RF energy harvest at 2.45 GHz ISM band. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 28(9), e21424. <https://doi.org/10.1002/mmce.21424>
- Singh, N., Kanaujia, B. K., Beg, M. T., Khan, T., & Kumar, S. (2018). A dual polarized multiband rectenna for RF energy harvesting. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 93, 123-131. <https://doi.org/10.1016/j.aeue.2018.06.020>
- Vashi, R., & Upadhyaya, T. K. (2020). CPW Fed Flexible Graphene Based Thin Dual Band Antenna for Smart Wireless Devices. *Progress In Electromagnetics Research*, 89, 73-82. <https://doi.org/10.2528/PIERM19120906>
- Venkateswara Rao, M., Madhav, B. T. P., Anilkumar, T., & Prudhvinadh, B. (2019). Circularly polarized flexible antenna on liquid crystal polymer substrate material with metamaterial loading. *Microwave and Optical Technology Letters*, 62(2), 866-874.
- Wang, M., Yang, L., Fan, Y., Shen, M., Li, Y., & Shi, Y. (2018). A compact omnidirectional dual-circinal rectenna for 2.45 GHz wireless power transfer. *International Journal of RF and Microwave Computer-Aided Engineering*, 29(1), e21625. <https://doi.org/10.1002/mmce.21625>
- Wang, Z., Qin, L., Chen, Q., Yang, W., & Qu, H. (2019). Flexible UWB antenna fabricated on polyimide substrate by surface modification and in situ self-metallization technique. *Microelectronic Engineering*, 206, 12-16. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2018.12.006>
- Zahran, S. R., Gaafar, A., & Abdalla, M. A. (2016, June). A flexible UWB low profile antenna for wearable applications. In *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)* (pp. 1931-1932). IEEE. <https://doi.org/10.1109/APS.2016.7696672>
- Zhang, X., Grajal, J., Vazquez-Roy, J. L., Radhakrishna, U., Wang, X., Chern, W., & Palacios, T. (2019). Two-dimensional MoS₂-enabled flexible rectenna for Wi-Fi-band wireless energy harvesting. *Nature*, 566(7744), 368-372. <https://doi.org/10.1117/12.2530059>

SISTEMA INTELIGENTE DE DETECCIÓN DE CO2 PARA VEHÍCULOS

INTELLIGENT CO2 DETECTION SYSTEM FOR VEHICLES

Tannia Cecilia Mayorga Jácome

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

tmayorga@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8465-1059>

Fidel David Parra Balza

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

fparra@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2283-4551>

René Ernesto Cortijo Leyva

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

recortijo@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6527-8359>

Alexis Ruben Asqui Zuñiga

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

alexis93_rbn@hotmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-7968-5572>

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo es la construcción de un dispositivo inteligente, capaz de detectar el CO₂ con control automático del mecanismo de ventilación de los vehículos. En otras palabras; controlar los motores que permiten subir o bajar los vidrios de las ventanas; así como también, el ventilador interno del sistema de aire acondicionado. El producto es adaptable a cualquier vehículo. Garantiza -dentro del auto- un ambiente seguro a los pasajeros, les evita posibles afecciones respiratorias, aunque permanezcan un tiempo prolongado en él con el motor encendido, apagado o expuestos al humo de cigarrillos. Sucesos registrados, en los que personas perdieron la vida por exceso de calor, intoxicación con CO₂ u otros gases dentro de vehículos, constituye la piedra angular de la investigación. Este dispositivo inteligente detecta la presencia de personas dentro del vehículo, controla el sistema de ventilación para acondicionar la temperatura y el CO₂ a niveles aceptables. Por otra parte, emite avisos sonoros en caso de que los valores se mantengan en límites peligrosos; envía mensajes SMS (Servicio de Mensajes Cortos) de alerta al dispositivo móvil de una tercera persona. La investigación constituyó un estudio transversal. Se analizaron variables que permitieron configurar y calibrar los sensores y el equipo de control. Se siguió una metodología de tipo experimental y deductiva con un enfoque cuantitativo de los resultados obtenidos, que permitieron constatar cómo la electrónica y control de variables se puede aplicar científicamente en beneficio de las personas.

PALABRAS CLAVE

Detector de CO₂, control automático, intoxicación, dispositivo inteligente, sensores, mensajes SMS

ABSTRACT

The objective of this work is the construction of an intelligent device, capable of detecting CO₂ with automatic control of the ventilation mechanism of vehicles. In other words, to control the motors that allow raising or lowering the windows, as well as the internal fan of the air conditioning system. The product is adaptable to any vehicle. It guarantees - inside the car - a safe environment for the passengers, avoiding possible respiratory diseases, even if they remain in the car for a long period of time with the engine on, off or exposed to cigarette smoke. Recorded events, in which people lost their lives due to excess heat, CO₂ intoxication or other gases inside vehicles, constitute the cornerstone of the research. This intelligent device detects the presence of people inside the vehicle, controls the ventilation system to condition the temperature and CO₂ to acceptable levels. Moreover, it emits audible warnings in case the values remain within dangerous limits; it sends SMS (Short Message Service) alerts to the mobile device of a third party. The research was a cross-sectional study. Variables that allowed configuring and calibrating the sensors and control equipment were analyzed. An experimental and deductive methodology was followed with a quantitative approach to the results obtained, which made it possible to see how electronics and variable control can be applied scientifically for the benefit of people.

KEYWORDS

CO₂ detector, automatic control, intoxication, intelligent device, sensors, SMS messages

INTRODUCCIÓN

El dióxido de carbono, conocido como CO₂, es un gas presente en la atmósfera de manera natural, cuyos niveles oscilan entre 300 y 400 ppm (partes por millón) y pueden alcanzar en zonas urbanas valores de hasta 550 ppm. Se considera inofensivo para el hombre; no obstante, debido a que provoca el desplazamiento del oxígeno, puede ser asfixiante. Por ello, elevadas concentraciones (>30.000 ppm) pueden causar dolor de cabeza, mareos, somnolencia, problemas respiratorios, e hipercapnia. Además, dependiendo del tiempo de exposición y concentraciones superiores a ese nivel, puede causar la muerte (Gutiérrez, 2015).

En ese sentido, se ha estudiado la influencia de los efectos del CO₂ en la toma de decisiones en la investigación. De los resultados obtenidos, se ha constatado que el valor límite de exposición profesional (LEP-VLA) del INSHT (Instituto Nacional de Salud y Seguridad del Trabajo) para exposiciones diarias de 8 horas es de 5.000 ppm; donde 15.000 ppm es el valor máximo para exposiciones menores o iguales a 15 minutos (Satish et al., 2012). Cabe destacar que, en ambientes interiores no industriales, como oficinas, escuelas y servicios en general, no se han registrado valores de esa magnitud. En la práctica, para estos recintos se registran valores de 2.000 y hasta 3.000 ppm. De manera que, un índice mayor puede ser ocasionado por una combustión incontrolada en estos recintos, en cuyo caso el riesgo para la salud puede no ser debido al dióxido de carbono, sino a la presencia de otros subproductos de la combustión, principalmente el monóxido de carbono (CO), cuyo límite de exposición es inferior a 25 ppm (Wong González, Rosas Correa, Vega Azamar, & Guarneros Urbina, 2019).

Sin embargo, a pesar de tener esos valores de referencia, se ha determinado que, en un ambiente cerrado, las personas sometidas a distintos niveles de concentración han experimentado algún grado de molestia a 600 ppm (Ortega, 2017). Bajo estas condiciones, se acepta que el dióxido de carbono no debe superar una concentración de 1.000 ppm para que el aire sea considerado aceptable en aproximadamente el 80% de los individuos, dentro de un ambiente cerrado. Una concentración de dióxido de carbono superior a 2.000 ppm, durante un tiempo prolongado, puede ser peligroso, considerando que además pueden estar presente otro tipo de agentes externos, como el monóxido de carbono (Ramalho et al., 2015).

Por otra parte, es necesario acotar que el CO₂ es uno de los principales causantes del efecto invernadero (Satish et al., 2012). A nivel mundial, diferentes países hacen esfuerzos por evitar la contaminación por CO₂. Los científicos hacen estudios, realizan proyectos, y propician regulaciones, pues han determinado que el calentamiento global y el efecto invernadero se debe, entre otras cosas, al aumento desmedido de las emisiones de CO₂ a la atmósfera (Paredes & Pozo, 2020) (Pinzón et al., 2018). Por tanto, se hace necesario hacer regulaciones y controles, instaurar políticas para bajar estos niveles. Diferentes estudios revelan consecuencias desastrosas para el planeta y la vida del hombre, por ejemplo, el incremento de muertes por enfermedades pulmonares y la contaminación ambiental que se atribuyen a estos factores (Hansen et al., 2008) (Solís & Sheinbaum, 2016).

Otro aspecto preocupante de muertes, debido a concentraciones elevadas de CO₂, es que suelen ocurrir en lugares cerrados o dentro de un vehículo, ya sea con el motor encendido o apagado. Las cifras de la OMS revelan que más de 7 millones de personas –una de cada ocho del total de muertes mundiales– murieron a causa de la exposición a la contaminación atmosférica o del aire de interiores (Organización Mundial de la Salud, 2018). Esto pone en evidencia que la muerte de personas dentro de un vehículo constituye un grave problema. Han fallecido personas que por algunas circunstancias se quedaron dormidos dentro de un auto, tanto con el motor encendido, como apagado. Las condiciones que se generan en estos casos, como calor excesivo y gases tóxicos, pueden causar la muerte. Esto se puede evidenciar en las noticias emitidas por la prensa internacional y local (American Academy of Pediatrics, 2021).

Otra situación importante que agrava el problema se manifiesta cuando dentro de un espacio cerrado, una o más personas encienden un cigarrillo para fumar. El humo del tabaco contiene elevadas concentraciones de sustancias tóxicas y carcinogénicas que pueden ser inhaladas por los ocupantes del vehículo, lo que aumenta el empobrecimiento de la calidad del aire al sumar partículas como la acroleína, la nicotina, formaldehídos, monóxido de carbono (CO) y otras tantas.

En ese sentido, se considera como un factor de riesgo en los autos, que las personas se queden dormidas dentro del mismo ya sea por trabajo, cansancio, o estados de ebriedad. Es frecuente que suceda cuando el vehículo está encendido, porque utilizan la calefacción o el aire acondicionado (de Granda-Orive et al., 2020). Esto es muy peligroso, ya que la combustión produce otro gas sumamente peligroso como es el CO (monóxido de carbono) y, en este caso, el envenenamiento se produce cuando este gas se deposita en el sistema circulatorio. Es decir, cuando el aire circundante tiene exceso de CO, el cuerpo lo absorbe y pasa al sistema circulatorio y reemplaza el oxígeno de los glóbulos rojos, lo que puede ocasionar un daño irreversible en los tejidos e incluso la muerte, como ha ocurrido en muchos casos.

Es necesario aclarar que el CO es un gas sin olor y sin color, que se produce por la combustión de gasolina u otros combustibles. Este gas se hace potencialmente peligroso cuando se acumula en espacios cerrados como en autos con los vidrios cerrados y con el motor encendido. Constituye una norma para el cuidado de la salud el ventilar los espacios donde existan aparatos que generen combustión y produzcan este gas (Vargas T., 2014).

Los síntomas que evidencian un envenenamiento por este gas son: dolor de cabeza, de leve a moderado, mareos, falta de oxígeno, debilidad, desorientación y, en algunos, caos, pérdida del conocimiento. Cuando la persona está dormida o en estado de ebriedad, no se manifiestan estos síntomas, por lo que la persona estaría corriendo grave peligro de muerte; razón por la cual la intoxicación por monóxido de carbono puede ser particularmente peligrosa para las personas que se encuentren en estas situaciones. Ellas pueden sufrir un daño cerebral irreversible e, incluso, morir antes de que alguien note que hay un problema (Castañeda, y otros, 2008).

Para la realización de este proyecto fue necesaria la revisión exhaustiva de varios trabajos relacionados con los sistemas inteligentes para la detección y control de CO₂. Los sistemas inteligentes aplicados en el área de control son aquellos capaces de reemplazar tareas realizadas por los seres humanos y aplicar razonamiento lógico. La programación, el uso de microcontroladores y elementos electrónicos como los sensores, son factores que hacen posible la integración de la inteligencia tecnológica en la toma de decisiones en entornos de incertidumbre, aplicado a diferentes áreas (Santos, 2011).

En ese sentido, se destacan diferentes investigadores, quienes han realizado trabajos relacionados con algunas de las variables que intervienen en la investigación en curso. Como primer antecedente se tiene el trabajo titulado: «Telecontrol y seguridad vehicular GSM y GPS», cuyo objetivo fue desarrollar un sistema de control y seguridad vehicular mediante una aplicación en la plataforma de Arduino.

Como problema a solucionar se planteó agilizar las funciones diarias: calentamiento del motor para su correcto desempeño, incorporación de elementos de seguridad para casos de pérdida del vehículo, rastreo de su posición en tiempo real y manipulación de comandos vía SMS. Como resultado, los autores indican que se logró otorgar mayor confort al usuario y ahorro de tiempo. Además, dentro del ámbito de la seguridad se realizó el monitoreo de distintas variables del CO₂; se demostraron algunas ventajas desde el punto de vista científico; se determinó que es posible monitorear variables físicas dentro de un auto y que, además,

con la integración de otros dispositivos, se puede tener una comunicación por SMS y la geolocalización del vehículo (Guzmán, 2017).

También se revisó otro trabajo denominado “Prototipo de sistema de monitoreo de CO₂ en exteriores por medio de hardware abierto”, cuyo objetivo fue registrar la actividad de las emanaciones de gases nocivos de fábricas industriales y su impacto en el medio ambiente en zonas urbanizadas y centros de conglomeración de personas en la ciudad de Guayaquil, Ecuador. La aplicación de sensores adecuados demostró que se puede realizar el monitoreo constante del CO₂ en ambientes externos, lo que se puede extrapolar a ambientes internos o cerrados (Ganchozo, 2018).

Al mismo tiempo, se revisó la investigación titulada: «Climatización por recirculación automática», cuyo objetivo fue mejorar la calidad del aire mediante su recirculación. El problema a enfrentar radicó en que el aire puede alterar su composición de forma gradual, según el número de ocupantes de un vehículo o en espacios cerrados, lo cual puede producir mareos, dolor de cabeza, falta de concentración y otras molestias. Para resolver el problema, utilizaron el método de renovación periódica del aire del habitáculo, pasando aire nuevo desde el exterior. Se demostró que, aunque el aire que entra no es de la mejor calidad, ya dentro del recinto no es dañino para el hombre. Los resultados más relevantes destacan que la electrónica, dentro sus múltiples aplicaciones, coadyuva al mejoramiento de la calidad del aire, utilizando un simple sistema de recirculación.

Además, se puso en evidencia la necesidad de que un sistema de climatización mediante recirculación automática se puede articular con la detección de otras variables ambientales para que el alcance sea mayor y el bienestar del hombre, por consiguiente, aumente. Se consideró además que, para el funcionamiento del sistema, se dispuso de un control electrónico, encargado de accionar un motor eléctrico para mover la trampilla de recirculación, lo cual crea en el interior del vehículo un ambiente con mayor calidad. El sistema utilizó los sensores adecuados que fueron manejados a través de un microcontrolador (Tecnología del Automóvil, 2019).

Por otra parte, en relación con la mejora de la calidad del aire, se revisó el trabajo de investigación: «Sistema inteligente de purificación de aire», cuyo objetivo fue monitorear la calidad del aire dentro de un auto y filtrarlo automáticamente. De los resultados obtenidos, se constató que el proceso de filtrado puede eliminar partículas muy finas y limpiar el aire de la cabina durante los trayectos, antes de que el pasajero ingrese al automóvil. Se demostró que la tecnología del control automático y filtrado puede mejorar el ambiente al interior de un auto. Se destaca, además, que en el producto desarrollado no intervienen otras variables como la temperatura para el control de la ventilación o la detección de gases deletéreos como el CO o el CO₂ (que en grandes concentraciones es perjudicial) (Trujillo, 2019).

Las investigaciones previas revisadas, constituyeron un aporte importante para ayudar a medir los niveles de CO₂ y definir las técnicas de tele monitoreo, transmisión de señales de alarmas, visualización en pantallas y otras funciones que se aplicaron en el desarrollo de este proyecto.

METODOLOGÍA

Esta investigación observa la realidad desde la concepción del conocimiento de los autores en el área de la electrónica, por cuanto tiene una orientación fundamentalmente positivista. Por otra parte, concuerda con Bunge (2000), quien señala que en el trabajo científico es posible medir sus objetivos cuantitativamente, estableciéndose el nivel o grado de las variables, mediante la aplicación del método científico, con la cuantificación. Sobre ese fundamento se puede asegurar que la investigación se ha guiado por una concepción

empírico-inductiva, pues se analizaron las evidencias que demuestran el problema, además, con la revisión continua de trabajos relacionados se pudo establecer una solución basada en sensores y sistemas de control adecuados.

Por otra parte, el criterio inductivo de la investigación se ancla en que las vías para obtener la información y la validación de estos, fueron orientadas por la experiencia, el conocimiento, y los sentidos propios de los investigadores que determinaron los patrones específicos que establecen las causas de muertes, dentro de vehículos. Además, las soluciones para variables similares, pero en situaciones diferentes, se prolongaron como solución para la construcción de un dispositivo inteligente de detección y control de ventilación en el interior de un auto, con personas que eventualmente puedan dormirse dentro del mismo y fallecer, si la cadena de eventos aleatorios hace que se genere un microambiente dentro del vehículo nocivo para la salud.

En relación con el tipo de investigación, esta se realizó, tomando en consideración el objetivo que persiguió este estudio, que estuvo dirigido a construir un dispositivo inteligente capaz de detectar concentraciones de gases peligrosos en altos niveles como el CO₂ y otros, con alertas mediante mensajería de texto y alarmas sonoras en el sitio, que se combinan al mismo tiempo con un control de climatización y apertura automática de vidrios, por lo que la investigación se considera como un proyecto factible, apoyada por una metodología de carácter bibliográfica y experimental.

Con todo lo expresado hasta aquí, se desprende que el conocimiento de la situación real encontrada, muestra particular énfasis en la objetividad orientada a los resultados generados, en virtud de que nos interesa describir, explicar e identificar relaciones causales, las cuales, en el caso de la presente investigación, permitieron verificar las variables seleccionadas, derivadas de los síntomas del problema que se evidenció en la fase inicial de observación del fenómeno.

Fases para la elaboración del dispositivo

Fase de diseño

Para explicar el principio de funcionamiento, se presenta un diagrama de bloques (*Figura 1*) que incluye un módulo GSM con el que se establecerá la comunicación del sistema. Además, se presentan cada uno de los dispositivos que conforman el proyecto, para el cual se usaron 3 sensores: el primero analiza la cantidad de CO₂ en el ambiente, el segundo es el sensor de movimiento PIR para detectar presencia en el interior del vehículo, y el tercero es un sensor de temperatura para el control de clima de la cabina.

Así mismo, se tienen otras etapas como son: la salida que proporciona el microcontrolador Arduino, el visualizador de pantalla (pantalla LCD), una alarma, el control del sistema de vidrios eléctricos y calefacción mediante rejillas de ventilación.

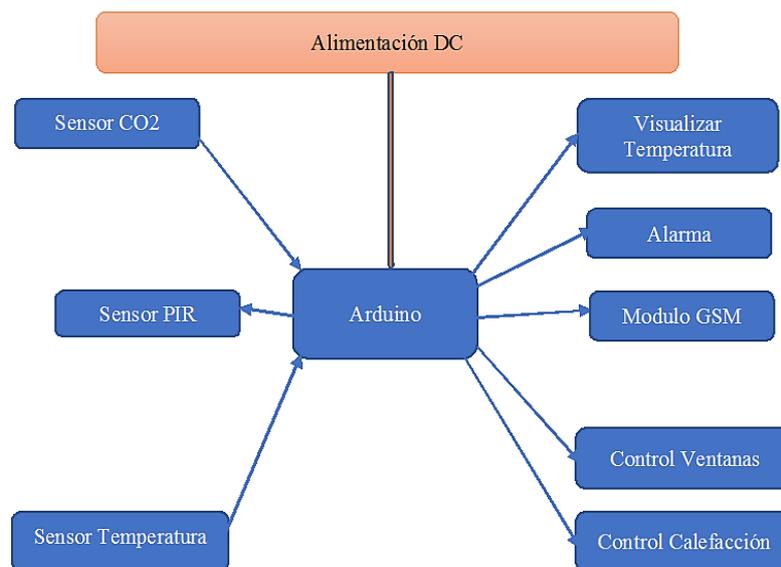


Figura 1. Diagrama de bloques del dispositivo
Fuente: elaboración propia

A continuación, se detalla cada uno de los bloques del diagrama:

- **Placa Arduino Uno.** Contiene un microcontrolador y la interfaz de desarrollo para su respectiva programación. Se ha seleccionado este dispositivo pues el mismo reúne las características apropiadas para las funcionalidades del proyecto, además es una plataforma de fuente abierta basada en hardware y software de fácil uso (ARDUINO, 2018).
- **Módulo GSM800L.** Se integra con la tecnología celular de manera que permite la transmisión y recepción de mensajes de texto. Este será el encargado de enviar la señal de alarma al dispositivo móvil de una tercera persona, con la finalidad de que, en caso de fallar los otros sistemas de prevención y alarma, sirva de respaldo para un eventual caso de peligro de los ocupantes del vehículo.
- **Módulo LM2596.** Permite aplicar la conversión de voltaje del módem GSM800L, ya que este trabaja a 2 amperios y se requiere que cumpla con las condiciones necesarias que exige la placa de Arduino. La función es la de convertir el voltaje DC-DC Buck para posibilitar el manejo de la corriente de hasta 3 amperios, además, maneja rangos de voltaje de 1.25 hasta 35 Volts.
- **Módulo sensor de calidad de aire MQ-135.** Es adecuado para evaluar gases peligrosos que se utilizan para el control de la calidad del aire y se adecua para la detección de NH₃ (amoníaco), alcohol, benceno, humo y CO₂. El sensor no proporciona valores absolutos, sino que simplemente muestra la salida analógica de manera que se monitorea a través de la pantalla LCD y se compara con los valores de umbral (HANWEI ELCETRONICS CO.,LTD, 2020).
- **Sensor de temperatura DHT22.** Brinda funciones como la medición de temperatura y humedad, además de que la salida trabaja de forma digital. El rango de operación del dispositivo varía de -40° C a 80° C, y rango de humedad de 0 al 100% RH.
- **Detector de presencia PIR HCSR501.** Detecta el movimiento de personas hasta 7 metros de distancia mediante el uso de una lente de Fresnel y el elemento sensible al infrarrojo, para detectar cambios en los patrones de radiación infrarroja emitida por los objetos en su vecindad.

- **Pantalla LCD 16x2.** Es la interfaz visual del tipo display LCD, para presentar los valores de temperatura y CO2 que establezcan en la interfaz de desarrollo, que se adaptaran a las condiciones para la salud del ser humano.
- **Buzzer.** Alerta de manera sonora niveles de temperatura y CO2, cuando las condiciones se ven fuera del rango establecido.

El diseño tiene 2 partes constituidas por una lógica y otra física. En la *Figura 2* se puede apreciar el diseño del circuito electrónico.

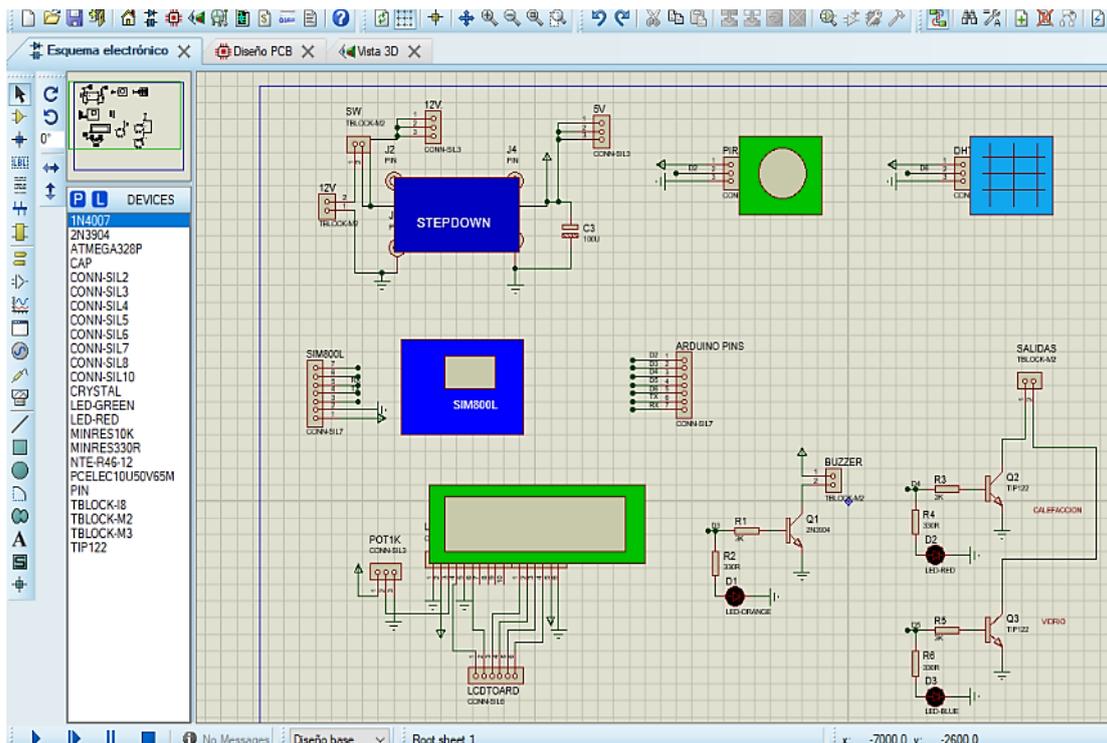


Figura 2. Diagrama eléctrico del dispositivo
Fuente: elaboración propia

Para el diseño lógico, simulación del circuito electrónico, y presentación de la placa electrónica (*Figura 3*) se utilizó la aplicación Ares, dentro del software Proteus, con las librerías de: circuitos integrados, transistores, resistencias, diodos LED, reguladores de voltaje, variedad de sensores, y otros.

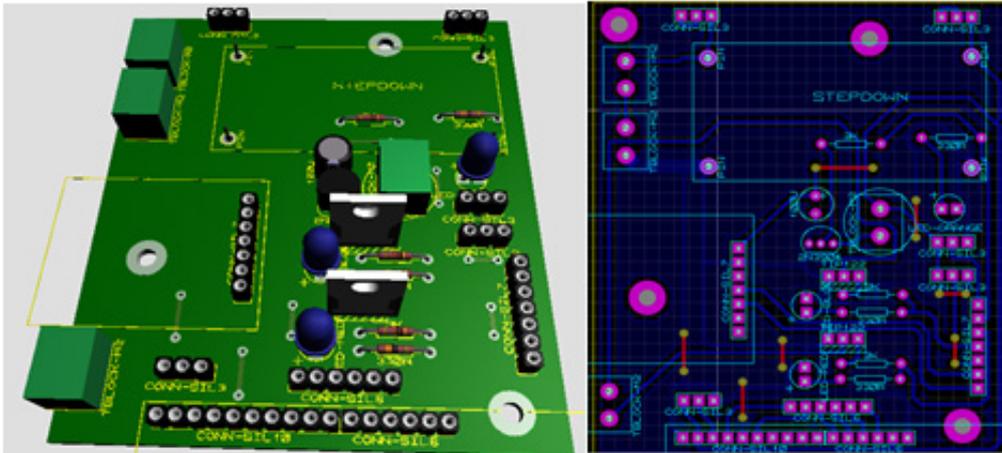


Figura 3. Circuito impreso y distribución de componentes
Fuente: elaboración propia

Fase de implementación

Para la implementación del sistema automático (Figura 4) de calidad ambiental, como punto principal, se debió considerar el sitio donde va ir acoplada la placa electrónica en el vehículo, de manera que permita el correcto funcionamiento del sistema, sin afectar los demás accesorios del automóvil. Además de las conexiones pertinentes de sensores y módulo GSM que comprende el proyecto, de manera tal que al de encender el automóvil permita realizar las respectivas pruebas de funcionamiento.



Figura 4. Colocación de los elementos del sistema en el automóvil
Fuente: elaboración propia

En el interior del vehículo se procedió a desmontar algunos de los elementos como luz de salón, para ubicar el sensor de temperatura y el sensor de movimiento PIR, como se muestra la Figura 5.



Figura 5. Colocación de los elementos sensores del sistema en el interior del vehículo
Fuente: elaboración propia

Además, se procedió a desmontar los paneles de puertas para realizar las conexiones que se hizo a través de relés, los cuales se encargaron de la acción de los motores eléctricos. También se hizo la instalación y ubicación de un relé adicional, que acciona el motor de ventilación para el funcionamiento de sistema de calefacción, como se indica en la *Figura 6*.

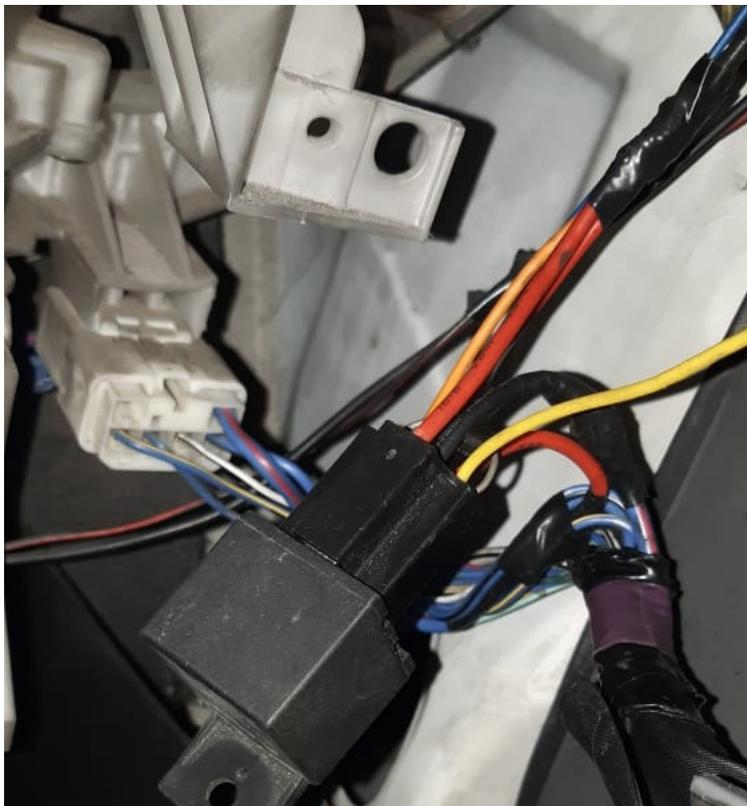


Figura 6. Conexión con los relés de accionamiento para los vidrios eléctricos
Fuente: elaboración propia

Otro de los procedimientos es la ubicación del visualizador LCD en un lugar donde se pueda observar con claridad, para ello se trabajó sobre el espejo central. De manera adicional se instaló el sensor de CO₂, en conjunto con la caja de la pantalla, según se muestra en la *Figura 7*.



Figura 7. Colocación del display para la visualización
Fuente: elaboración propia

El panel frontal del vehículo será el lugar donde se ubique la unidad de control de sistema. La unidad de control o placa electrónica comprende cada uno de los elementos electrónicos y módulos que ayudan al funcionamiento del sistema automático de control ambiental, tales como:

- Sensores: temperatura, dióxido de carbono, y movimiento.
- Módulo GSM800L.
- Módulo LM2596 (Convertidor de voltaje).
- Placa Arduino Uno.
- *Display* LCD 16X2.

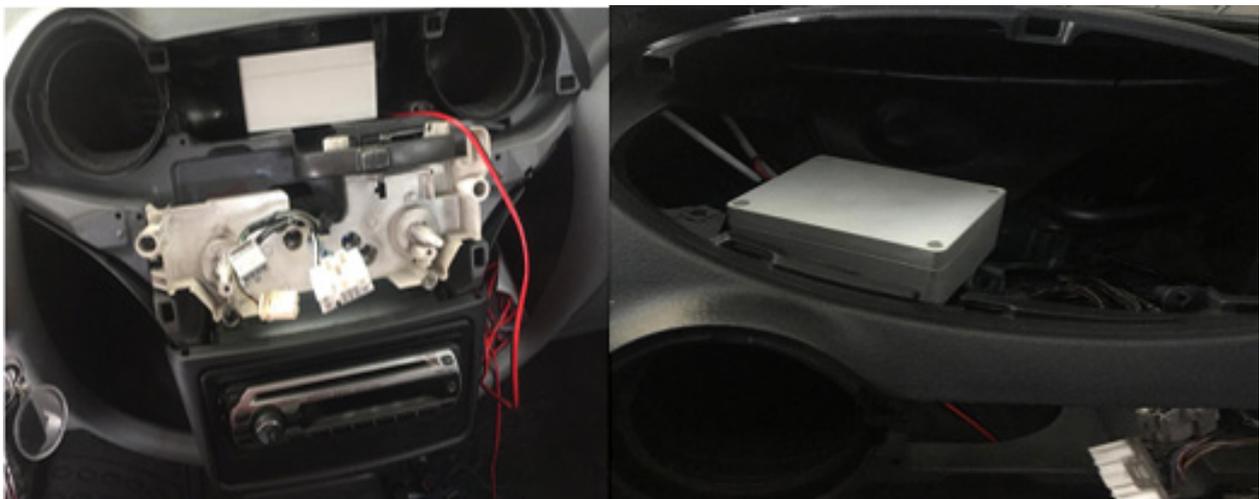


Figura 8. Instalación del módulo de control en el vehículo
Fuente: elaboración propia

RESULTADOS

Para determinar el número de pruebas necesarios para cada uno de los casos, se utilizó una ecuación estadística recomendada cuando el tamaño de la población no se conoce. Se consideró que el número total de pruebas constituye la población, y se estimó entonces que la misma es desconocida. La ecuación por tanto es:

$$n = \frac{Z_{\alpha}^2 \cdot p \cdot q}{d^2}$$

Dónde:

Z = nivel de confianza,

p = probabilidad de éxito, o proporción esperada

q = probabilidad de fracaso

d = precisión (error máximo admisible en términos de proporción)

En este caso se trabajó para un nivel de confianza $Z=1.96$, con $p=q=50\%$ y un error del 5%. Con esos datos se tuvo que:

$$n = \frac{1,96^2 \cdot 0,5 \cdot 0,5}{0,05^2} = 384,16, \text{ que se aproxima a } 385$$

Por lo tanto, se realizaron 385 pruebas para cada caso; no obstante, en las tablas se muestran los 10 valores más representativos de cada prueba.

Prueba del sensor de temperatura

La prueba del sensor de temperatura consistió en verificar si los valores a medir están dentro del rango establecido en el microcontrolador, para ellos se tomó como referencia que inician en 20 grados centígrados con la activación de un aviso sonoro del sistema. Luego de pasar dicho valor, se obtuvo una nueva condición. Si el sistema baja de 20 grados emite una señal de alarma y enciende la calefacción, pero si pasa de 23 grados enciende el sistema de ventilación para bajar la temperatura. En ambos casos envía vía SMS, una alerta de baja o alta temperatura.

Tabla 1.
Prueba del sensor de temperatura

Pruebas	Termómetro comercial	Equipo Desarrollado	Error	Envía mensaje	Emite sonido
1	19,55	19,38	0,85%	Si	Si
2	19,62	19,42	1,00%	Si	Si
3	20,0	19,81	0,95%	Si	Si
4	21,30	21,08	1,05%	No	No
5	23,35	23,20	0,65%	Si	Si
6	18,5	18,34	0,86%	Si	Si
7	21,23	20,98	1,20%	No	No
8	18,51	18,32	1,00%	Si	Si
9	19,45	19,23	1,15%	Si	Si
10	19,33	19,17	0,85%	Si	Si
Promedio	20,08	19,89	0,95%	Si	Si

Nota: Solo se muestran 10 medidas del total de pruebas.

Fuente: elaboración propia

Ecuación para el cálculo de error:

$$E\% = \frac{|\text{Valor real} - \text{Valor medido}|}{\text{Valor real}} * 100$$

El 100% de las veces el dispositivo envió el mensaje cuando estaba dentro de rango de cobertura, y emitió el sonido de alarma. Además, también fue capaz de emitir la señal para el control del sistema de ventilación. Por otra parte, el sensor de temperatura acoplado al Arduino y todo el equipo, arrojó resultados que demuestran la calibración adecuada del dispositivo, ya que, al compararlo con un dispositivo real del mercado, el error promedio estuvo en un 0,95% de error inferior al 1%.

Prueba del sensor de CO2

Dicha prueba consistió en medir la cantidad de ppm de CO₂ que se encuentran en el ambiente. Para esta condición se establecieron rangos de partículas por millón, que en este caso se estima entre 100 ppm, como inicio de avisos sonoros, hasta cuando llegue a un nuevo rango de subida, entre los 130 ppm. Si dicho valor crece hasta los 150 PPM, el sistema inmediatamente acciona los motores de los vidrios eléctricos, con la respectiva emisión de alerta de SMS a un dispositivo móvil.

Tabla 2.
Prueba del sensor de CO₂

Pruebas	Valor teórico	Valor medido	Error	Emite sonido	Activa el sistema de vidrios	Envía mensaje
1	115	108	6,09%	no	no	no
2	95	100	5,26%	no	no	no
3	146	150	2,74%	si	si	si
4	208	200	3,85%	si	si	si
5	155	150	3,23%	si	si	si
6	175	180	2,86%	si	si	si
7	83	80	3,61%	no	no	no
8	103	95	7,77%	no	no	no
9	205	210	2,44%	si	si	si
10	250	260	4,00%	si	si	si
Promedio	153,50	153,30	4,2%		no	no

Nota: Solo se muestran 10 medidas del total de pruebas.

Fuente: elaboración propia

El 100% de las veces el dispositivo envió el mensaje cuando estuvo dentro de rango de cobertura, emitió el sonido de alarma, y al superar la concentración de 150 ppm activó el sistema para la apertura automática de los vidrios. Así también, se pudo constatar que el sensor para detectar el CO₂ trabajó de manera adecuada con un error aceptable en promedio del 4,2%.

Sensor de movimiento

La prueba realizada para la detección de movimientos se basó en que, si en un lapso de 3 minutos nadie se mueve, el sistema pasa a inactividad; sin embargo, su pantalla continúa con los registros de valores de CO₂ y temperatura, pero no realiza ninguna acción, lo cual significa que no envía ninguna alerta sonora ni acción alguna al vehículo, además no es posible que envíe mensajes de texto.

Tabla 3.
Prueba del sensor de movimientos

Pruebas	Personas dentro de auto	Sin personas dentro de auto	¿Detecto las personas?
1	X		Si
2		X	No
3		X	No
4	X		Si
5	X		Si
6	X		Si
7		X	No
8		X	Si
9	X		Si
10	X		Si

Nota: Solo se muestran 10 medidas del total de pruebas.

Fuente: elaboración propia

El sistema para detectar la presencia de personas tuvo una efectividad del 100% cuando habían personas dentro del vehículo; sin embargo, el 25% de las veces detectaba personas sin que existan personas dentro del auto, la falla se atribuyó a la sensibilidad de sensor, y se consideró que tal vez fue debido al lugar donde se estaban realizando las pruebas, porque se podía detectar las personas que estaban fuera del vehículo, no obstante, se hizo un ajuste en la sensibilidad y el porcentaje bajo a 5% de error, lo cual se considera aceptable para este tipo de proyectos experimentales.

Pruebas de visualización

Esta prueba se llevó a cabo para obtener los valores por pantalla en la LCD, de cada uno de los sensores a monitorear. Como inicio de visualización, se tiene una presentación que dice "UNIVERSIDAD ISRAEL". Luego de transcurrir aproximadamente 2 minutos, ya se podrán apreciar valores de temperatura y CO2. La *Figura 9* muestra el dispositivo de visualización final, instalados con las lecturas de los parámetros.



Figura 9. Pruebas de visualización
Fuente: elaboración propia

Las pruebas realizadas dieron como resultado que para el total de las 385 veces que se probó, si se podían visualizar los datos en la pantalla, el 100% de las veces los resultados fueron satisfactorios, lo cual demuestra que los equipos usados y los diagramas fueron los idóneos, ya que se pudieron acoplar sin fallas a todo el dispositivo.

Botón de encendido del sistema

Se verificó el funcionamiento adecuado, de forma tal que apague y encienda el sistema, incluyendo la pantalla. En caso de molestia al conducir, el sistema de monitoreo puede ser desconectado totalmente de la alimentación.

Las pruebas realizadas al botón de encendido dieron como resultado que para el total de las 385 frecuencias que se probó, el sistema de encendido funcionó correctamente el 100% de las veces, por tanto, los resultados fueron satisfactorios.

Envío de SMS a través del módulo SIM800L

Al realizar la prueba del módulo SMS, se controló el estado de envío de mensajes escritos al número celular programado, cuyos mensajes son descritos a continuación:

- Para un nivel de CO₂ elevado se describe el siguiente texto: “ALERTA CONCENTRACIÓN CO₂ ALTA”.
- Con relación a la temperatura, se envía la siguiente alerta: “ALERTA SOBRE TEMPERATURA”.

En la siguiente tabla se puede evidenciar que el 100% de las veces el mensaje se envió con el mensaje verdadero.

Finalmente, a manera de resumen, en la *Tabla 4* se muestra el porcentaje de resultados incorrectos y correctos, acotando que se considera resultado incorrecto al error en la lectura, tanto del sensor de temperatura, como del sensor para medir la concentración de CO₂, al compararlo con la lectura de un equipo comercial. Para los otros casos se considera correcto cuando realiza la función para la cual fue diseñado.

Tabla 4.
Resumen de los resultados obtenidos en las pruebas

PRUEBAS	RESULTADOS INCORRECTOS	RESULTADOS CORRECTOS
<i>Prueba del sensor de temperatura</i>	0,95%	99,905%
<i>Prueba del sensor de CO2</i>	4,2%	95,8%
<i>Pruebas del sensor de presencia con personas dentro del vehículo</i>	0%	100%
<i>Pruebas del sensor de presencia sin personas dentro del vehículo</i>	5%	95%
<i>Pruebas de visualización</i>	0%	100%
<i>Botón de encendido del sistema</i>	0%	100%
<i>Envío de SMS a través del módulo SIM800L</i>	0%	100%
<i>Microcontrolador Arduino UNO</i>	0%	100%

Fuente: elaboración propia

Todos los sistemas instalados en el vehículo, se pueden apreciar en la *Figura 10*.



Figura 10. *Sistema final instalado en el vehículo*
Fuente: elaboración propia

DISCUSIÓN

Como se pudo evidenciar en los resultados, el sistema de monitoreo de los niveles de temperatura y CO₂, mediante los sensores y la placa de control Arduino Uno, es satisfactorio, lo que demuestra la compatibilidad de los equipos y que la programación del tiempo de mediciones estuvo bien orientada. Con esto se verifica, además, desde el punto de vista tecnológico, que el tratamiento de señales originadas por variables analógicas, como son la temperatura del ambiente y la concentración de CO₂, se pueden realizar mediante un sensor. Este dispositivo es el que acopla un transductor capaz de producir una señal eléctrica, que finalmente es procesada por el Arduino, para realizar una acción contralada sobre la decisión de alertar o no, sobre la situación de un potencial peligro para el hombre, lo que a su vez le otorga un gran valor social a la investigación desarrollada.

En relación con la comunicación, debido a que en el país existe una cobertura de red consistente, la aplicación es pertinente y tecnológicamente viable, ya que se podría utilizar de manera remota. Además, gracias a la potencialidad de la interfaz con el módulo Arduino, se pueden agregar nuevas funciones al equipo, como regular el sistema de climatización con el empleo de mensajería de texto.

Por otra parte, el desarrollo del sistema automático de calidad ambiental se da bajo parámetros de diseños que precisan su correcto funcionamiento. De esta forma se garantiza su uso en caso de una emergencia, que, al combinar la comunicación con un sistema de ventilación, puede salvar la vida de una persona que, por alguna circunstancia, se quede dormida dentro de un vehículo sin las debidas medidas de seguridad.

Finalmente, las pruebas de validación demostraron que el dispositivo es apto para su instalación en cualquier vehículo con cabina cerrada, puesto que todos los criterios fueron tomados en cuenta, según el diseño establecido anteriormente; de esta forma se impide que agentes externos, como el medio ambiente, afecten al funcionamiento del sistema.

CONCLUSIONES

Las pruebas realizadas, y el análisis de los resultados, permitieron concluir que el sistema funciona de acuerdo con los objetivos propuestos, en cuanto a la detección de niveles de CO₂, control de la calidad de aire y temperatura dentro de la cabina de un vehículo.

El monitoreo de la temperatura ambiente en el interior varió cada segundo, según la cantidad de personas a bordo, hasta en 5 grados centígrados por cada 2 personas que se encontraban dentro y, por lo tanto, también el nivel de CO₂, sobre lo cual se consideraron los parámetros para control de la calidad del aire.

Si alguno de los ocupantes del vehículo fuma dentro del vehículo, el sensor de CO₂ incrementa inmediatamente un 15% la lectura en ppm y, por consiguiente, se generan alertas de niveles no deseados. Así también, al contrastar las medidas con un equipo comercial, el error en las lecturas era inferior al 1%; con ello se comprueba la validez de las medidas.

Lo planteado revela que las variables, como son calidad del aire y temperatura, en el interior del vehículo pueden ser medidos con los dispositivos electrónicos construidos, elementos empleados y tarjetas electrónicas configuradas. Estos, conectados de forma apropiada, ordenada y en secuencia, se pueden utilizar para salvaguardar la integridad física, la salud y la vida de las personas dentro de un auto cerrado.

Con cada una de las pruebas se verificó que los mensajes de texto SMS llegaban al dispositivo móvil configurado, de acuerdo con los niveles de alerta, tanto de temperatura, como de niveles de CO₂.

La detección de presencia mediante el sensor PIR garantizó que los vidrios eléctricos se bajen, hasta cierto nivel, cuando se detectan anomalías, pero solo cuando existen ocupantes dentro del vehículo. La lógica de funcionamiento garantiza además que, aunque existan ocupantes y no se detecten movimientos, porque estos podrían quedarse dormidos, la medición anormal de niveles de CO₂ provoca de igual forma que los vidrios de las puertas se bajen, hasta el nivel establecido, para garantizar circulación de aire y evitar la asfixia o una muerte potencial de los ocupantes.

De acuerdo con las conclusiones, se considera pertinente brindar algunas recomendaciones relacionadas con mejoras que pueden ser realizadas en trabajos futuros.

Además de la detección del dióxido de carbono y humo, sería importante incorporar un detector de monóxido de carbono CO₂, que como se mencionó al inicio, es un gas muy nocivo para la salud.

Es recomendable, además, mejorar el diseño electrónico del sistema de detección, de forma tal que resulte más compacto, de menor tamaño y que la comunicación con la tarjeta de control sea inalámbrica. El objetivo sería conseguir que el dispositivo sea portátil y se pueda ubicar en cualquier lugar, para evitar la necesidad de modificar el diseño interior del vehículo.

Se podría modificar, además, el alcance de la investigación con el propósito de incorporar un cámara y técnicas de reconocimiento facial o de visión por computador, para identificar gestos o inactividad inusual por cansancio. Esto permitiría generar pre-alarmas, ante la posibilidad de que los ocupantes del vehículo se queden dormidos. Como ya se mencionó antes, esto constituye un potencial factor de riesgo de asfixia o intoxicación dentro de un ambiente cerrado, como la cabina de un vehículo.

Agradecimiento

Agradecemos al Ing. César Canchingre, por haber brindado el apoyo para la realización de esta investigación.

Referencias

- American Academy of Pediatrics. (11 de marzo de 2021). Cómo proteger a su familia del envenenamiento por monóxido de carbono. <https://www.healthychildren.org/Spanish/safety-prevention/all-around/Paginas/how-to-prevent-carbon-monoxide-poisoning.aspx>
- ARDUINO. (05 de febrero de 2018). What is Arduino? <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>
- Castañeda, M., Escoda, R., Nogué, S., Alonso, J., Bragulat, E., & Cardellach, F. (2008). Síndrome coronario agudo por intoxicación con monóxido de carbono. *Revista de Toxicología*, 25(1-3), 69-72. <https://www.redalyc.org/pdf/919/91925312.pdf>
- de Granda-Orive, J. I., Ramírez-González, N., Arroyo-Cozar, M., de Granda-Beltrán, A. M., Solano-Reina, S., & Jiménez-Ruiz, C. A. (2020). El tabaco de tercera mano. *REVISTA DE PATOLOGÍA RESPIRATORIA*, 23(1). https://www.revistadepatologiaspiratoria.org/descargas/PR_23-1_24-30.pdf
- Ganchozo Moreno, M. J. (2018). Prototipo de sistema de monitoreo de CO2 en exteriores por medio de hardware abierto. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/29989>
- Gutiérrez, W. A. (Julio de 2015). Prototipo de una red sensorial inalámbrica (WSN) para la medición del nivel de CO2 en la ciudad de Ambato. https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/13060/1/Tesis_t1032ec.pdf
- Guzmán, C. (2017). Telecontrol y seguridad vehicular GSM y GPS. Durango, México: Universidad Politécnica de Durango.
- Hansen, J., Sato, M., Kharecha, P., Beerling, D., Berner, R., Masson-Delmotte, V., & Zachos, J. C. (2008). Target atmospheric CO2: Where should humanity aim?. *arXiv preprint arXiv:0804.1126*. <https://doi.org/10.2174/1874282300802010217>
- HANWEI ELCETRONICS CO. LTD. (2020). TECHNICAL DATA MQ-135 GAS SENSOR. HANWEI ELCETRONICS CO, LT. <http://www.hwsensor.com>
- Organización Mundial de la Salud. (2 de mayo de 2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. Comunicado de prensa. <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>
- Ortega Segura, D. (2017). Implementación de un prototipo para el monitoreo de dióxido de carbono (CO) y metano (CH4) en lugares residenciales utilizando el sistema operativo Android y Arduino. Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17554/1/CD-8061.pdf>
- Paredes, L., & Pozo, M. (2020). Movilidad Eléctrica y Eficiencia Energética en el Sistema de Transporte Público del Ecuador un Mecanismo para Reducir Emisiones de CO2. *Revista Técnica» energía*, 16(2), 91-99. <https://doi.org/10.37116/revistaenergia.v16.n2.2020.356>

- Pinzón, A., Castillo, M., González, E., Araúz, J., & Villarreal, V. (2018). Sistema de detección de sustancias y partículas contaminantes para el ambiente a través de sensores arduino. *Revista de Iniciación Científica*, 4(1), 55-59. <https://doi.org/10.33412/rev-ric.v4.1.1868>
- Ramalho, O., Wyart, G., Mandin, C., Blondeau, P., Cabanes, P. A., Leclerc, N., ... & Redaelli, M. (2015). Association of carbon dioxide with indoor air pollutants and exceedance of health guideline values. *Building and Environment*, 93, 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.03.018>
- Santos, M. (2011). Un enfoque aplicado del control inteligente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 8(4), 283-296. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.09.016>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO2 an indoor pollutant? Direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance. *Environmental health perspectives*, 120(12), 1671-1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Solís Ávila, J. C., & Sheinbaum Pardo, C. (2016). Consumo de energía y emisiones de CO 2 del autotransporte en México y escenarios de mitigación. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 32(1), 7-23.
- Tecnología del Automóvil. (16 de octubre de 2019). Climatización con recirculación automática. <https://www.tecnologia-automovil.com/articulos/nuevas-tecnologias/climatizacion-con-recirculacion-automatica/>
- Trujillo, E. (16 de mayo de 2019). Adiós a la contaminación del aire en tu auto con este nuevo sistema de Hyundai. <https://www.motorpasion.com.mx/industria/adios-a-contaminacion-aire-tu-auto-este-nuevo-sistema-hyundai>
- Vargas, L. E. (2014). Toxicidad por monóxido de carbono. *Toxicología*, XVII, 83, 582.
- Wong González, I. A., Rosas Correa, G., Vega Azamar, R., & Guarneros Urbina, L. (2019). Calidad de aire interior en ambientes cerrados. Caso de estudio: Instituto Tecnológico de Chetumal. *Ava Cient*, 7(2), 11-20. http://itchetumal.edu.mx/images/2019/12DICIEMBRE/AVACIENT/2/2_Calidad_de_aire_interior_en.pdf

FILTROS ADAPTATIVOS Y ESTRUCTURA LATTICE EN EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE SEÑALES

LATTICE STRUCTURE AND ADAPTIVE FILTERS IN DIGITAL SIGNAL PROCESSING

María Fernanda Rivera Sanclemente

Universidad de Investigación y Desarrollo – UDI, Colombia

mrivera7@udi.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-3991-4665>

RESUMEN

El procesamiento de señales digitales requiere estructuras de filtro que modelan y analizan la señal con base en sus características y retroalimentación de su salida. Además de las estructuras conocidas (FIR e IIR), Lattice tiene propiedades de estabilidad, precisión numérica, rápida convergencia y seguimiento. De esta manera, el presente estudio propone validar la aplicación de esta estructura con el filtro que describe el Algoritmo Acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine, que evidencia buen rendimiento en sus propiedades de velocidad, reducción del error de medida final, seguimiento y mínimo desajuste. La investigación es científica-tecnológica en ingeniería, generadora de conocimientos aplicables en bienes y servicios con un enfoque solución problema-Hipótesis, operacionalizando los objetivos propuestos mediante una simulación soportada en la herramienta matemática computacional MATLAB.

Partiendo de ¿cuál es el efecto sobre la respuesta de un sistema Lattice-adaptativo cuando sobre ésta estructura se utiliza una configuración Affine soportada en el algoritmo adaptativo AR γ ? Se establece que la implementación del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine sobre la estructura Lattice, optimiza la adaptabilidad y rendimiento de propiedades como: velocidad de convergencia y capacidad de seguimiento. Como objetivos se determina la optimización de las propiedades del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine al adecuarlo a la estructura Lattice y analizar el efecto de parámetros de ajuste en el comportamiento estructural Lattice-Affine soportada en el algoritmo AR γ . Como parte de los resultados se tiene que este nuevo filtro adaptativo es útil en eventos donde el factor de predicción permite tomar decisiones en procesamiento de señales digitales geofísicas, biomédicas e índices económicos etc.

PALABRAS CLAVE

Procesado digital de señales, filtros adaptativos, configuración Affine, estructura en celosía, algoritmo acelerador versión γ (AR γ)

ABSTRACT

Digital signal processing requires filter structures that model and analyze the signal based on its characteristics and feedback from its output. In addition to the known structures (FIR and IIR), Lattice has properties of stability, numerical accuracy, fast convergence and tracking. Thus, the present study proposes to validate the application of this structure with the filter described by the Accelerator Algorithm version γ (AR γ) in Affine configuration, which evidences good performance in its properties of speed, final measurement error reduction, tracking and minimum mismatch. The research is scientific-technological in engineering, generating knowledge applicable to goods and services with a problem-hypothesis solution approach, operationalizing the proposed objectives through a simulation supported by the MATLAB computational mathematical tool.

Starting from What is the effect on the response of a Lattice-adaptive system when an Affine configuration supported by the adaptive algorithm AR γ is used on this structure? It is established that the implementation of the accelerator algorithm version γ (AR γ) in Affine configuration on the Lattice structure, optimizes the adaptability and performance of properties such as: convergence speed and tracking capability. As objectives we determine the optimization of the properties of the accelerator algorithm version γ (AR γ) in Affine configuration by adapting it to the Lattice structure and analyze the effect of adjustment parameters on the Lattice-Affine structural behavior supported on the AR γ algorithm. As part of the results we have that

this new adaptive filter is useful in events where the prediction factor allows to make decisions in geophysical digital signal processing, biomedical and economic indexes, etc.

KEYWORDS

Feedback filter, digital signal processing, adaptive filters, affine combination, algorithm accelerator versión γ (AR γ)

INTRODUCCIÓN

En el campo del procesamiento digital de señales es frecuente utilizar estructuras de filtro que pueden modelar y analizar la señal digital con base en sus características o en la retroalimentación de su salida. Este tipo de estructuras de filtro ofrece ventajas especialmente para efectos de la cuantificación. Como caso de particular importancia se destacan las denominadas estructuras de filtrado adaptable en cascada, en paralelo y en celosía.

Así entonces, se entiende por filtros adaptativos, aquellas estructuras ajustables que tienen la capacidad de cambiar su respuesta automáticamente para mejorar su desempeño, es identificado igualmente como aquel dispositivo autodiseñable con base en un algoritmo recursivo que permite al filtro desempeñarse satisfactoriamente en un ambiente en el cual no se dispone de un conocimiento amplio de las características relevantes de la señal, es decir, el algoritmo parte de algunas condiciones iniciales predeterminadas, que evidencian completa ignorancia del ambiente. Tales aplicaciones incluyen: la ecualización del canal, la cancelación de ruido y el modelado de sistemas entre otras, así mismo, se emplean filtros con coeficientes ajustables y que son los propiamente identificados como filtros adaptativos por incorporar algoritmos que permiten adaptar los coeficientes del filtro a los parámetros estadísticos de la señal (Rivera, 2013).

La estructura de filtros *Lattice* es una alternativa para realizar una *función de transferencia* de un filtro digital que no tiene un número mínimo de multiplicadores y sumadores para la realización de una función de transferencia pero si ofrece muchas propiedades ventajosas como por ejemplo cascadeo de secciones idénticas, coeficientes con magnitudes menores a la unidad, prueba de estabilidad por inspección, buenas características de redondeo numérico y es particularmente útil para el filtrado adaptable dado que la solución recursiva de la estimación de los mínimos cuadrados produce naturalmente un filtro de estructura *Lattice*. Así mismo se caracteriza porque ortogonaliza la señal de entrada en una base de *etapa a etapa*, permitiendo capacidades de rápida convergencia y seguimiento. No obstante que, muchas técnicas alternativas han sido desarrolladas para estimar los coeficientes de reflexión que parametrizan la estructura *Lattice*, el método de los mínimos cuadrados recursivos, actualiza la estimación de los mínimos cuadrados a través de la observación de cada muestra. Este procedimiento conlleva una estimación óptima y requiere únicamente un costo computacional ligeramente mayor al de otras técnicas.

Las técnicas de estimación adaptables modifican los parámetros estimados del filtro de acuerdo a los datos observados actualizados, para cada nueva muestra, la estimación recursiva utilizando el filtro *Lattice*, genera nuevos coeficientes de reflexión y errores de predicción para cada orden del filtro. Cambiar cada coeficiente del filtro para cada nueva muestra, resulta importante en las aplicaciones donde la rápida convergencia o el seguimiento (*tracking*) de señales altamente variables son necesarias. Sin embargo, para aplicaciones donde la dinámica es lenta los resultados de observar la señal por cierto tiempo resultan importantes. Así entonces, la estructura de Celosía o *Lattice*, está motivada por la teoría del modelo auto-regresivo de la señal.

El algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine*, consiste en una suma ponderada de las salidas de dos filtros adaptativos sometidos a una misma entrada cuyo factor de ponderación es un parámetro calculado mediante un mecanismo adaptativo con el propósito de lograr un mejor rendimiento. La configuración *Affine* ofrece una buena adaptabilidad mejorando características como velocidad, reducción del error de medida final, una buena capacidad de seguimiento (*tracking*) y buenos resultados en desajuste. El filtro implementado en esta configuración alivia el compromiso entre la velocidad de convergencia y el error residual inherente al filtro. La implementación del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre la estructura *Lattice*, incide, específicamente, en los coeficientes de reflexión característicos de

ésta estructura, buscando potenciar su adaptabilidad y optimizar el rendimiento de sus propiedades de velocidad, reducción del error de medida final, capacidad de seguimiento (*tracking*) y mínimo desajuste (Rivera, 2013). El propósito es validar el comportamiento del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre una estructura *Lattice* en el marco de una metodología de implementación de algoritmos basada en la simulación para evaluar la dinámica de las variables del algoritmo en estudio.

Antecedentes

En 2003, Lu, J., Shen Ch., Qiu, X y Xu, B en "*Lattice form Adaptive Infinite Impulse Response Filtering Algorithm for Active noise Control*" (Control activo de ruido mediante algoritmo de filtrado adaptativo IIR en estructura *lattice*) hacen referencia a que un gran número de algoritmos que se han derivado de la aplicación de filtros IIR en el control activo de ruido; sin embargo, la mayoría de ellos utilizan la estructura del filtro IIR de forma directa que se enfrenta a las dificultades de control de estabilidad y la velocidad de convergencia lenta para el ruido de componentes de banda estrecha. Para superar estas dificultades, además de utilizar los filtros IIR de forma directa, proponen un nuevo algoritmo adaptativo que utiliza y actualiza el filtro IIR adaptativo en un sistema *Lattice* para control activo de ruido concluyendo la superioridad del algoritmo propuesto. Se prueba utilizando funciones de transferencia medidas a partir de un sistema de control activo de ruido. Los resultados de la simulación muestran que la estructura *Lattice* no solo converge más rápidamente que los de uso común, sino que también ofrece un mínimo error cuadrático medio, y también muestra que el algoritmo propuesto da como resultado un sistema más robusto en la práctica.

El trabajo titulado "*Lattice filter with adjustable gains and its application in optical signal processing*" (Filtro *Lattice* con ganancia ajustable y aplicación en procesamiento de señales ópticas) de Panahi et al., (2005) ofrece métodos recursivos para derivar la función de transferencia de entrada-salida del filtro en función de los parámetros de la estructura *Lattice*, tales como tiempo de retardo, ganancias, coeficientes de reflexión, etc. Estos proponen para estabilidad del filtro una clase de filtro reticular MIMO con modelos de ganancias ajustables integrados por dispositivos fotónicos para la comunicación óptica y aplicación de procesamiento de señales de alta velocidad que también pueden ser utilizados en la realización del filtro por FPGA (del inglés *field-programmable gate array*) o procesadores programables para aplicaciones acústicas o de habla. La estructura *Lattice* ilustrada en este estudio también se puede usar para modelar adecuadamente los canales de propagación de la señal en otras aplicaciones no ópticas, tales como radar, acústica o procesamiento de la señal sísmica.

Sukhumalwong et al. (2006) en "*Echo cancellation using the new variable step-size algorithm adaptive lattice filters*" afirman que los algoritmos adaptativos se utilizan ampliamente para diversas aplicaciones; una de ellas es la cancelación de eco en la red de telefonía de larga distancia. La pérdida de retorno y la respuesta de impulso son características importantes de un trayecto de eco al momento de diseñar los canceladores de eco y la efectividad de los canceladores de eco depende de la elección del algoritmo de filtrado adaptativo. En este trabajo proponen un nuevo algoritmo de paso de adaptación variable para filtros *Lattice* de cancelación de eco que ofrece una excelente velocidad de convergencia y proporcionan un alto rendimiento.

Por su parte, Fujii et al. (2007) proponen un método para la aplicación de algoritmos adaptativos convencionales en la estimación de los coeficientes de reflexión para el cual se hace uso del algoritmo NLMS ofreciendo el mismo rendimiento que el del método convencional. Así mismo encuentran que los filtros *Lattice* ofrecen una ventaja en comparación a los filtros FIR (Respuesta al impulso finita) en sensibilidad al error de redondeo.

Posteriormente, Qi, H (2009), utilizando la estructura *Lattice* en un algoritmo adaptativo de gradiente, encuentra superiores los índices de rendimiento incluyendo la capacidad de seguimiento y velocidad de convergencia con menos recursos de hardware en comparación a los filtros convencionales.

Takemoto et al. (2010) investigan en un sistema de reconstrucción de ruido la aplicación del filtro *Lattice* como error de predicción lineal (LPEF, *linear prediction error filter*) debido a que la estructura de un filtro *Lattice* se aproxima a un filtro de tracto vocal para el proceso de producción del habla, logran mejorar el error residual y la capacidad de mejora del habla con el uso de este tipo de filtro.

Otros investigadores como Lee y Sung (2011) usaron la estructura *Lattice* para el modelado de canal y cancelación de ruido con rápida velocidad de convergencia y otras propiedades de su estructura modular.

En mayo de 2013 se registra la patente No. US 8,452,034 B2 a nombre de Lalin Theverapperuma (Minneapolis MN, US) consistente en el diseño de un dispositivo de asistencia auditiva para el procesamiento de una señal de entrada a partir de un micrófono y un receptor. El sistema utiliza un filtro adaptativo de gradiente con uno o más coeficientes de reflexión para medir la retroalimentación acústica desde el receptor al micrófono del dispositivo de asistencia auditiva.

La patente No. US 8,797,673 B2 de agosto 05 de 2014, cuyo inventor es Supino, describe la implementación de un circuito constituido por un sensor de vibración que genera una señal a partir de una perturbación, un filtro *Lattice* que descorrelaciona la señal del sensor generando un error de predicción hacia atrás o de retroceso y un filtro de regresión múltiple con estimación de una señal de corrección de la perturbación utilizando los errores de predicción hacia atrás.

Para Kim et al. (2014) en su trabajo titulado "*A robust high-order lattice adaptive notch filter and its application to narrowband noise cancellation*", proponen un filtro adaptativo *Lattice* de orden superior (LANF) que realiza el seguimiento de múltiples señales y que la diferencia de la estructura en cascada convencional ofrece un seguimiento independiente de las señales de referencia y las señales iniciales. El filtro LANF aplica una cancelación del ruido de banda estrecha (ANC) para mitigar el efecto de la perturbación en la señal de referencia. Así entonces, la combinación de un algoritmo de gradiente y el filtro LANF permite obtener un sistema ANC de banda estrecha muy eficiente desde el punto de vista computacional. Los resultados experimentales demuestran la robustez del filtro LANF propuesto y la eficiencia del filtro ANC de banda estrecha.

En ese mismo año, Park & Lee realizan la estimación en tiempo real de la frecuencia respiratoria (RR) de un ftohograma (PPG) usando un filtro *notch Lattice* adaptativo. Se tenía conocimiento de que muchos investigadores intentaron adquirir información de la RR a partir del PPG en razón a que la respiración afecta la forma de onda del PPG. La mayoría de estos registros son difíciles de operar en tiempo real debido a su complejidad o requerimientos computacionales. Teniendo en cuenta lo anterior, los autores buscan obtener información de la RR adoptando una estructura de filtrado y una técnica de estimación de frecuencia secuencial que extrae una frecuencia dominante de la señal dada; para el efecto, utilizan un filtro *notch* adaptativo en celosía (ALNF) para estimar la RR de un PPG junto con un ritmo cardiaco adicional que se utiliza como parámetro de adaptación del método. Adicionalmente diseñan un sistema de filtrado *notch IIR* para eliminar la componente cardiaca y sus armónicos de la PPG; se compara el método propuesto con el modelo AR y de Burg utilizado en la estimación de la RR de un PPG. Se determina estadísticamente que la red de tipo adaptativo de la frecuencia respiratoria estimada (ALRE) es significativamente más precisa que el modelo AR y de Burg.

La revisión bibliográfica al respecto no registra a la fecha aplicaciones de algoritmos adaptativos tipo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre la estructura *Lattice*, constituyendo el presente estudio un nuevo aporte en el comportamiento de los filtros adaptativos para el procesado digital de señales.

Contribución del estudio

En una investigación previa titulada “Efecto de la configuración *Affine* en el Algoritmo Acelerador versión γ (AR γ)”, Rivera (2013) analizó el comportamiento del algoritmo adaptativo AR γ en una configuración *Affine*. Se observó que, aunque se tienen cuatro parámetros de ajuste (tres del algoritmo AR γ y uno de la configuración *Affine*) la respuesta obtenida del sistema ofrecía una buena adaptabilidad, mejoramiento de características como: velocidad, reducción del error de medida final, buena capacidad de seguimiento (*tracking*) y desajuste; identificándolo como un filtro que ofrece un buen comportamiento entre la velocidad de convergencia y el error residual inherente al filtro.

Con base en estos resultados, el presente trabajo de investigación contribuye a analizar el efecto de implementar la configuración *Affine* sobre una estructura en celosía o *Lattice* teniendo como soporte de adaptación el algoritmo AR γ . Para analizar las propiedades y el comportamiento en la adaptabilidad de los coeficientes de reflexión y el componente de error de predicción de la estructura *Lattice* cuando se hace uso del algoritmo Acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine*, se recurre al concepto de causalidad de Granger (1980) el cual, se fundamenta en que “en el tiempo la causa siempre precede a los efectos; es decir, si una serie de tiempo es causa de otra, el conocimiento del primer proceso ayudaría a predecir los valores futuros del otro.

Teniendo en cuenta la conformación de la arquitectura *Lattice*, específicamente, las ecuaciones que la componen, además de su funcionamiento, la obtención de los predictores tanto de adelanto como de atraso, así como los coeficientes de reflexión, que se presuponen compatibles con las características de la configuración *Affine* potencializada con el uso del algoritmo AR, el estudio realizó la implementación de las dos estructuras con el fin de analizar y validar la optimización de los resultados obtenidos en sistemas *Lattice* convencionales.

En este contexto se llevó a cabo la implementación y validación del comportamiento del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre una estructura *Lattice* en el marco de una metodología de implementación de algoritmos basada en la simulación para la evaluación de la dinámica de las variables de los algoritmos y validación de las implementaciones obteniéndose como resultado un nuevo producto que corresponde a un filtro adaptativo para procesamiento digital de señales con optimización de la adaptabilidad y rendimiento de sus propiedades de velocidad de convergencia, capacidad de seguimiento y mínimo error cuadrático medio. El registro de la señal de error permite concluir que al aplicar la adecuación *Affine-Lattice* al filtro AR γ ofrece una más rápida estabilidad si se compara con la de los filtros AR γ -*Lattice* y AR γ básico.

La aplicación de la estructura *Lattice* a los filtros LMS, NLMS y AR γ se traduce en un mejor comportamiento de los filtros adaptativos en lo relativo a mínimo error cuadrático medio, velocidad de convergencia y capacidad de seguimiento, destacándose el algoritmo AR γ como el mejor de los filtros. Así mismo se puede afirmar que la adecuación de los filtros anteriores a la estructura *Affine-Lattice* ofrece una mejora notable en el comportamiento de los mismos y continúa observándose el predominio del algoritmo AR γ como el mejor.

Características de la estructura en celosía o *Lattice*

Como referente teórico-conceptual se observa que en el campo del procesamiento digital de señales es frecuente utilizar estructuras de filtro que pueden modelar y analizar la señal digital con base en sus características o en la retroalimentación de su salida. Este tipo de estructuras de filtro ofrece ventajas especialmente para efectos de la cuantificación. Como caso de particular importancia se destacan las denominadas estructuras de filtrado adaptable en cascada, en paralelo y en celosía.

El término filtrado hace referencia a dispositivos ya sea hardware o software que aplicado a un conjunto de datos con ruido permite extraer información de interés. El ruido puede provenir de diversas fuentes y los datos obtenidos pueden corresponder a los resultados de la medición de sensores con ruido o pueden representar un componente de la señal que se ha contaminado por la trasmisión a través de un canal de comunicación, lo que hace necesario el uso de un filtro que permita realizar las tres operaciones básicas del procesamiento de la información:

1. **Filtrado:** implica la extracción de información de interés a un instante de tiempo t .
2. **Suavizado:** a diferencia del filtrado, la información de interés no necesita estar disponible en un instante de tiempo t y los datos medidos después del tiempo t pueden ser utilizados obteniendo esta información.
3. **Predicción:** hace referencia al pronóstico del proceso de la información, busca derivar la información acerca de cómo será la cantidad de interés en cierto tiempo $t + r(\tau)$, para $r(\tau) > 0$ mediante el uso de los datos medidos incluyendo el tiempo t .

Se puede afirmar que el filtro es lineal cuando la cantidad de interés filtrada, suavizada o de predicción a la salida del dispositivo es una función lineal de las observaciones aplicadas a la entrada del filtro. La predicción lineal tiene aplicaciones en una amplia variedad de áreas, como por ejemplo el tratamiento de señales de voz, el tratamiento de imágenes y la supresión del ruido en sistemas de comunicaciones (Galindo, 2008).

Así mismo, se entiende por filtros adaptativos aquellas estructuras ajustables que tienen la capacidad de cambiar su respuesta automáticamente para mejorar su desempeño, es identificado igualmente como aquel dispositivo autodiseñable con base en un algoritmo recursivo que permite al filtro desempeñarse satisfactoriamente en un ambiente en el cual no se dispone de un conocimiento amplio de las características relevantes de la señal; es decir, el algoritmo parte de algunas condiciones iniciales predeterminadas que evidencian completa ignorancia del ambiente. Tales aplicaciones incluyen la ecualización del canal, la cancelación de ruido y el modelado de sistemas, entre otras, así mismo, se emplean filtros con coeficientes ajustables y que son los propiamente identificados como filtros adaptativos por incorporar algoritmos que permiten adaptar los coeficientes del filtro a los parámetros estadísticos de la señal (Rivera, 2013).

Los filtros adaptativos se han utilizado ampliamente en sistemas de comunicaciones, sistemas de control y otros sistemas en los que las características estadísticas de las señales que deben ser filtradas eran desconocidas a priori o, en algunos casos, eran variantes en el tiempo (señales no estacionarias), como aplicaciones de los filtros adaptativos se conocen:

1. **Sistemas de antena adaptativa:** en las que los filtros adaptativos se emplean para dirigir el haz y eliminar las interferencias indeseadas (Widrow et al., 1967).

2. **Receptores digitales de comunicaciones:** en los que los filtros adaptativos se emplean para ecualizar la interferencia intersímbolos y para identificar el canal (Nichols et al., 1977; Picinbono and Skwirzynski, 1978).
3. **Técnicas de cancelación de ruido adaptativas:** en las que los filtros adaptativos se utilizan para estimar y eliminar un componente de ruido de la señal deseada (Ketchum & Proakis, 1982).
4. **Modelado de sistemas:** donde los filtros adaptativos se usan como modelos para estimar las características de un sistema desconocido (Proakis and Manolakis, 2007).

Con base en lo anteriormente expuesto se lleva a cabo la implementación del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre la estructura *Lattice*, incidiendo específicamente en los coeficientes de reflexión buscando potenciar su adaptabilidad y optimizar el rendimiento de sus propiedades de velocidad, reducción del error de medida final, capacidad de seguimiento (*tracking*) y mínimo desajuste. El propósito es, por lo tanto, mejorar la respuesta de un sistema *Lattice* adaptativo cuando sobre ésta estructura se utiliza una configuración *Affine* soportada en el algoritmo adaptativo AR γ .

Como objetivo general se tiene identificar las propiedades que ofrece el algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* al adecuarlo a la estructura de Celosía o *Lattice*. Y en cuanto a los específicos: establecer el efecto de los parámetros de ajuste en el comportamiento de la estructura *Lattice-Affine* soportada en el algoritmo AR γ . Especificar las ecuaciones de diseño de la estructura adaptativa *Lattice* haciendo uso de la configuración *Affine* con el algoritmo AR γ como soporte. Comparar el comportamiento del Algoritmo Acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre la estructura *Lattice* con sistemas *Lattice* adaptativos convencionales con base en un análisis cualitativo y cuantitativo de los algoritmos implementados.

De esta manera se tendrá como resultado un filtro adaptativo para procesamiento digital de señales con optimización de la adaptabilidad y rendimiento de sus propiedades de velocidad de convergencia y capacidad de seguimiento (*tracking*).

En consecuencia, la formulación del problema de investigación responde a la pregunta: ¿Cuál es el efecto sobre la respuesta de un sistema adaptativo, cuando sobre ésta estructura se utiliza una configuración *Affine-Lattice* soportada en el algoritmo adaptativo AR γ ?

METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el estudio obedece al proceso de investigación científica tecnológica en Ciencias de la ingeniería, la cual se orienta a generar conocimientos aplicables a la producción de bienes y servicios. Se direcciona específicamente a la solución de un problema, mediado por una hipótesis de solución, buscando una respuesta a los interrogantes, mediante el logro de objetivos ejecutados, a través de la simulación apoyándose en la herramienta matemática computacional MATLAB. Lo anterior se traduce en la implementación del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre la estructura de Celosía o *Lattice*, incidiendo específicamente en los coeficientes de reflexión buscando potenciar su adaptabilidad y optimizar el rendimiento de sus propiedades de velocidad, reducción del error de medida final, capacidad de seguimiento (*tracking*) y mínimo desajuste (ver *Tabla 1*).

Tabla 1.

El Algoritmo Acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine y su aplicación en estructura de Celosía o Lattice.

El Algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine y su aplicación en estructura de Celosía o Lattice						
Marco referencial	Formulación del problema	Hipótesis de solución	Objetivos	Ejecución	Nuevo producto	
				Simulación		
Propiedades del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine	¿Se puede mejorar la respuesta de un sistema Lattice adaptativo cuando sobre ésta estructura se utiliza una configuración Affine soportada en el algoritmo adaptativo AR γ ?	La implementación, del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine sobre la estructura Lattice, optimiza la adaptabilidad y el rendimiento de sus propiedades de velocidad de convergencia y capacidad de seguimiento.	General: Optimizar las propiedades que ofrece el algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine al adecuarlo a la estructura de Celosía o Lattice.	Herramienta matemática computacional MATLAB	Filtro adaptativo para procesamiento digital de señales con optimización de la adaptabilidad y rendimiento de sus propiedades de velocidad de convergencia y capacidad de seguimiento (tracking).	
Características, usos y aplicaciones de la estructura de Celosía o Lattice.			Específicos: Analizar el efecto de los parámetros de ajuste en el comportamiento de la estructura Lattice-Affine soportada en el algoritmo AR γ			Verificación del comportamiento del algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración Affine sobre la estructura Lattice
Concepto de causalidad de Granger			Especificar las ecuaciones de diseño de la estructura adaptativa Lattice haciendo uso de la configuración Affine con el algoritmo AR γ como soporte.			<p>Especificaciones:</p> <p>Verificación del comportamiento de:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Convergencia de la señal de error. - Coeficientes de los filtros. - Coeficientes de reflexión.
Estado del Arte			Comparar el comportamiento del Algoritmo acelerador Versión γ (AR γ) en configuración Affine sobre la estructura Lattice con sistemas lattice adaptativos convencionales.	<ul style="list-style-type: none"> - Señales de predicción (adelanto y atraso). - Error cuadrático medio. 		

Fuente: elaboración propia

Como parte de la hipótesis de solución se plantea la implementación del Algoritmo Acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre la estructura *Lattice* optimiza la adaptabilidad y el rendimiento de sus propiedades de velocidad de convergencia y capacidad de seguimiento.

En cuanto a la ejecución-simulación la verificación del comportamiento del Algoritmo Acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* sobre la estructura *Lattice*, se soporta en la herramienta matemática computacional MATLAB, con especificaciones relativas a:

- Convergencia de la señal de error.
- Coeficientes de los filtros
- Coeficientes de reflexión.
- Señales de predicción (adelanto y atraso).
- Error cuadrático medio.

RESULTADOS

La estructura de filtros *Lattice* es una alternativa para realizar una función de transferencia de un filtro digital que no tiene un número mínimo de multiplicadores y sumadores para la realización de una función de transferencia, pero si ofrece muchas propiedades ventajosas como por ejemplo cascadeo de secciones idénticas, coeficientes con magnitudes menores a la unidad, prueba de estabilidad por inspección, buenas características de redondeo numérico y es particularmente útil para el filtrado adaptable dado que la solución recursiva de la estimación de los mínimos cuadrados produce naturalmente un filtro de estructura *Lattice*. Así mismo se caracteriza porque ortogonaliza la señal de entrada en una base de etapa a etapa permitiendo capacidades de rápida convergencia y seguimiento.

No obstante que muchas técnicas alternativas han sido desarrolladas para estimar los coeficientes de reflexión que parametrizan la estructura *Lattice*, el método de los mínimos cuadrados recursivos actualiza la estimación de los mínimos cuadrados a través de la observación de cada muestra. Este procedimiento conlleva una estimación óptima y requiere únicamente un costo computacional ligeramente mayor al de otras técnicas (Galindo, 2008).

Las técnicas de estimación adaptables modifican los parámetros estimados del filtro de acuerdo a los datos observados actualizados, para cada nueva muestra, la estimación recursiva utilizando el filtro *Lattice* genera nuevos coeficientes de reflexión y errores de predicción para cada orden del filtro. Cambiar cada coeficiente del filtro para cada nueva muestra resulta importante en las aplicaciones donde la rápida convergencia o el seguimiento (*tracking*) de señales altamente variables son necesarias. Sin embargo, para aplicaciones donde la dinámica es lenta, los resultados de observar la señal por cierto tiempo resultan importantes (Cowan & Grant, 1986). Así entonces, la estructura de Celosía o *Lattice* está motivada por la teoría del modelo auto-regresivo de la señal. Estructura modular fundamentada en un bloque denominado cruz o escalera el cual se va añadiendo uno a uno dependiendo del orden del filtro (*Figura 1*).

Dicha estructura está constituida por bloques y cada bloque consta de un retardo (z^{-1}) unidos a través de líneas horizontales, puntos de suma, líneas cruzadas de coeficientes, denominados coeficientes de reflexión

(k_m), los cuales son estimados en cada muestra con el fin de minimizar el error de predicción de adelanto $f_0(n)$ y de atraso $g_0(n)$ como se muestra en la *Figura 2*.

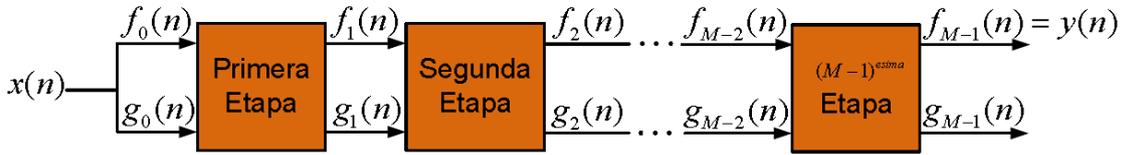


Figura 1. Estructura Lattice de M-1 etapas
Fuente: Apolo y Córdova (2010)

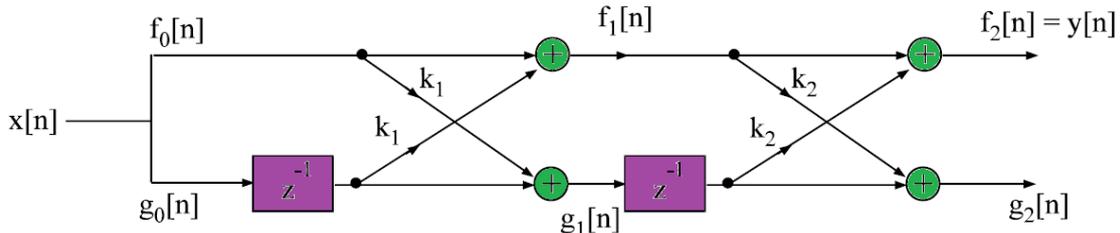


Figura 2. Estructura Lattice de filtro FIR de segundo orden
Fuente: Apolo y Córdova (2010)

De esta forma se observa que las ecuaciones recursivas que describen la estructura *Lattice* son:

$$f_m(n + 1) = f_{m-1}(n + 1) + K_m(n + 1)g_{m-1}(n) \tag{1.1}$$

$$g_m(n + 1) = g_{m-1}(n) + K_m(n + 1)f_{m-1}(n + 1) \tag{1.2}$$

$$f_0(n) = g_0(n) = x(n) \tag{1.3}$$

Donde $f_m(n + 1)$ y $g_m(n + 1)$ son las secuencias del error de predicción de adelanto y atraso respectivamente, $K_m(n + 1)$ es el coeficiente de reflexión y $m = 1, 2, \dots, M$ según el orden del filtro.

La estructura *Lattice* presenta una serie de propiedades de gran interés para aplicaciones de filtrado adaptativo. En la siguiente *Tabla 2* ilustra de manera comparativa dichas propiedades con las correspondientes a los filtros FIR e IIR.

Tabla 2.
Propiedades y características comparativas de la arquitectura de Celosía o Lattice

	IIR	FIR	LATTICE
USOS Y APLICACIONES	Equivalentes a filtros análogos.	Transmisión de datos.	Procesamiento digital de señales de voz.
		Audio digital.	Implementación de Filtros adaptativos.
		Procesamiento de imágenes.	Tratamiento de señales geofísicas.

VENTAJAS	Memoria infinita	Estructura del filtro siempre es estable.	Número reducido de coeficientes permite que grandes bloques de datos puedan ser modelados en tiempo real.
	En un mismo diseño de filtro, la longitud del filtro IIR más corta que en FIR.	Diseño para tener respuesta en fase lineal.	
	Mejor atenuación que los FIR.	No entran en oscilación debido a que no tienen realimentación.	
	Pueden proporcionar pendientes de corte muy pronunciadas.		
DESVENTAJAS	Producen en general distorsión de fase, es decir la fase no es lineal con la frecuencia.	Para especificaciones dadas requieren un filtro de orden mucho mayor que los filtros IIR.	El filtro de estructura ceclosía puede ser FIR o IIR por tanto también posee sus desventajas.
	Transitorio que no se limita a un intervalo de tiempo finito.	Memoria finita.	
		Número de operaciones y tiempo de procesamiento altos comparados con los de IIR.	

Fuente: elaboración propia

Predictor de adelanto

Lo primero es predecir un valor futuro (predicción de adelanto) de un proceso aleatorio a partir de la observación de valores pasados. Al considerar una muestra y formar la predicción del valor $x(n)$ mediante la combinación lineal de valores pasados $x(n-1), \dots, x(n-p)$, se obtiene el valor lineal anterior de es:

$$\hat{x} = - \sum_{k=1}^p a_p(k)x(n-k) \tag{1.4}$$

Donde los $\{-a_p(k)\}$ representa los pesos de los coeficientes de predicción del predictor lineal de una muestra de orden p .

La predicción lineal se puede ver de forma equivalente al filtrado lineal (Proakis, 2007) donde el predictor se integra en el filtro lineal (Figura 3).

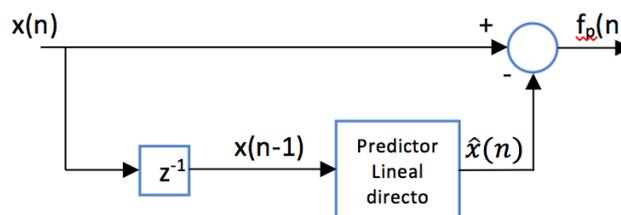


Figura 3. Predictor de adelanto
Fuente: Proakis (2007)

La equivalencia al filtro *Lattice* se ve en la *Figura 4*. Donde la función del sistema es:

$$A_p(z) = \sum_{k=0}^p a_p(k)z^{-k} \quad (1.5)$$

Por definición, $a_p(0) = 1$.

El filtro FIR en forma directa es equivalente a un filtro *lattice* de sólo ceros.

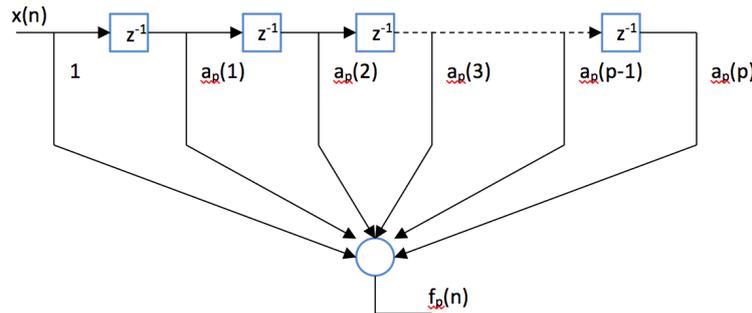


Figura 4. Filtro de error de predicción.
Fuente: Proakis (2007)

De la equivalencia entre el filtro FIR de error de predicción y el filtro *Lattice* la salida del filtro *lattice* de p etapas es:

$$f_p(n) = \sum_{k=0}^p a_p(k)x(n-k), \quad a_p(0) = 1 \quad (1.6)$$

El valor cuadrático medio del error de predicción de adelanto $y_p(n)$ es:

$$\begin{aligned} \varepsilon_p^f &= E[|f_p(n)|^2] \\ &= \gamma_{xx}(0) + 2\Re\left[\sum_{k=1}^p a_p^*(k)\gamma_{xx}(k)\right] + \sum_{k=1}^p \sum_{l=1}^p a_p^*(l)a_p(k)\gamma_{xx}(l-k) \end{aligned} \quad (1.7)$$

ε_p^f es una función cuadrática de los coeficientes del predictor y su minimización lleva a la ecuación:

$$\gamma_{xx}(l) = -\sum_{k=1}^p a_p(k)\gamma_{xx}(l-k), \quad l = 1, 2, \dots, p \quad (1.8)$$

Siendo estas las ecuaciones normales para los coeficientes del predictor lineal. El error de predicción cuadrático medio mínimo (MSE, *minimum mean-square error*) es:

$$\min[\varepsilon_p^f] \equiv E_p^f = \gamma_{xx}(0) + \sum_{k=1}^p a_p(k)\gamma_{xx}(-k) \quad (1.9)$$

Predictor de atraso

Ahora se amplía el problema de predecir anterior en la dirección opuesta, es decir, atrás en el tiempo. La secuencia de datos $x(n), x(n-1), \dots, x(n-p+1)$ de un proceso aleatorio estacionario y se desea predecir el valor del proceso. Así el predictor de atraso es:

$$\hat{x}(n - p) = - \sum_{k=0}^{p-1} b_p(k)x(n - k) \tag{1.10}$$

El error de predicción de atraso es la diferencia entre el valor $x(n - p)$ y el estimado $\hat{x}(n - p)$ denotándose como $f_p(n)$:

$$\begin{aligned} g_p(n) &= x(n - p) + \sum_{k=0}^{p-1} b_p(k)x(n - k) \\ &= \sum_{k=0}^p b_p(k)x(n - k), \quad b_p(p) = 1 \end{aligned} \tag{1.11}$$

Los coeficientes del predictor de atraso son los complejos conjugados de los coeficientes del predictor de adelanto, luego se tiene:

$$b_p(k) = a_p^*(p - k), \quad k = 0, 1, \dots, p \tag{1.12}$$

La relación implica que los ceros del filtro FIR cuya función de sistema es $G_p(z)$ son simplemente los recíprocos (conjugados) de los ceros de $A_p(z)$, de forma que el polinomio inverso de $A_p(z)$ es $G_p(z)$ así:

$$\begin{aligned} B_p(z) &= \sum_{k=0}^p b_p(k)z^{-k} \\ &= \sum_{k=0}^p a_p^*(p - k)z^{-k} \\ &= z^{-p} \sum_{k=0}^p a_p^*(k)z^k \\ &= z^{-p} A_p^*(z^{-1}) \end{aligned} \tag{1.13}$$

Al considerar la minimización del error cuadrático medio en un predictor de atraso. El error de predicción de atraso es:

$$\begin{aligned} g_p(n) &= x(n - p) + \sum_{k=0}^{p-1} b_p(k)x(n - k) \\ &= x(n - p) + \sum_{k=1}^p a_p^*(k)x(n - p + k) \end{aligned} \tag{1.14}$$

Su valor cuadrático medio es $\epsilon_p^b = E [|g_p(n)|^2]$ y la minimización de ϵ_p^b con respecto a los coeficientes de predicción proporciona las mismas ecuaciones lineales que (8). Así el error cuadrático mínimo (MSE) es:

$$\min[\epsilon_p^b] \equiv E_p^b = E_p^f \tag{1.15}$$

El que se determina de la ecuación (9).

Características del algoritmo acelerador regresivo versión γ (AR γ) en configuración *Affine*

El algoritmo acelerador regresivo versión γ (AR γ) en configuración *Affine* se caracteriza por no tener limitación en el parámetro de mezcla, máxima velocidad de convergencia, buena capacidad de seguimiento, óptimo resultado en desajuste; el filtro combinado resultante tiende a comportarse como el mejor de los filtros y en algunos casos se comporta mejor que los filtros a combinar y alivia el compromiso entre la velocidad de convergencia y el error residual inherente al filtro.

El algoritmo se puede describir con las ecuaciones siguientes para cada filtro:

$$y_1(n) = x(n)w_1(n) \quad (2.1)$$

$$e_1(n) = y_1(n) - d(n) \quad (2.2)$$

$$g_1(n) = \frac{e_1(n)\gamma_1 x^T(n)q_1(n-1)}{1 + \alpha_1 \gamma_1 x^T(n)m_1 x(n)} \quad (2.3)$$

$$q_1(n) = \frac{\gamma_1}{\alpha_1 + \gamma_1} [q_1(n-1) - \alpha_1 g_1(n)m_1 x(n)] \quad (2.4)$$

$$w_1(n) = w_1(n-1) + \alpha_1 q_1(n) \quad (2.5)$$

Ecuaciones Filtro 2.

$$y_2(n) = x(n)w_2(n) \quad (2.6)$$

$$e_2(n) = y_2(n) - d(n) \quad (2.7)$$

$$g_2(n) = \frac{e_2(n)\gamma_2 x^T(n)q_2(n-1)}{1 + \alpha_2 \gamma_2 x^T(n)m_2 x(n)} \quad (2.8)$$

$$q_2(n) = \frac{\gamma_2}{\alpha_2 + \gamma_2} [q_2(n-1) - \alpha_2 g_2(n)m_2 x(n)] \quad (2.9)$$

$$w_2(n) = w_2(n-1) + \alpha_2 q_2(n) \quad (2.10)$$

Para la configuración *Affine* se tiene:

$$y(n) = y_1(n)\lambda(n) + y_2(1 - \lambda(n)) \quad (2.11)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (2.12)$$

$$\lambda(n+1) = \lambda(n) + \mu_\lambda e(n)(y_1(n) + y_2(n)) \quad (2.13)$$

μ_λ corresponde al parámetro de adaptación del filtro en combinación *Affine* y cada algoritmo acelerador AR γ tienen sus propios parámetros de ajuste que son α , γ y m_γ .

El algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine* requiere aproximadamente $12M+9$ multiplicaciones, $11M+4$ sumas y 2 divisiones, ya que los parámetros μ_λ , α , γ y m_γ permanecen constantes durante la operación del sistema.

El algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en combinación *Affine* sobre la estructura *Lattice* y su relación con otros filtros adaptativos

El algoritmo acelerador versión γ (AR γ) en combinación *Affine* se fundamenta en la suma ponderada de las salidas de dos filtros adaptativos sometidos a una misma entrada cuyo factor de ponderación es un parámetro calculado mediante un mecanismo adaptativo con el propósito de lograr un mejor rendimiento. La

configuración *Affine* ofrece una buena adaptabilidad mejorando características como velocidad, reducción del error, una buena capacidad de seguimiento (*tracking*) y buenos resultados en desajuste.

La estructura *Lattice* se caracteriza por un bloque denominado cruz o escalera, el cual se va añadiendo uno a uno dependiendo del orden del filtro; esta constituida por bloques y cada bloque consta de un retardo unidos a través de líneas horizontales, puntos de suma de líneas cruzadas de coeficientes, denominados coeficientes de reflexión los cuales son estimados en cada muestra con el fin de minimizar el error de predicción de adelanto o de atraso (ver *Figura 5*). El presente capítulo ilustra de manera comparativa el comportamiento de otros filtros adaptativos como el LMS y NLMS sometidos a la estructura *Affine-Lattice*.

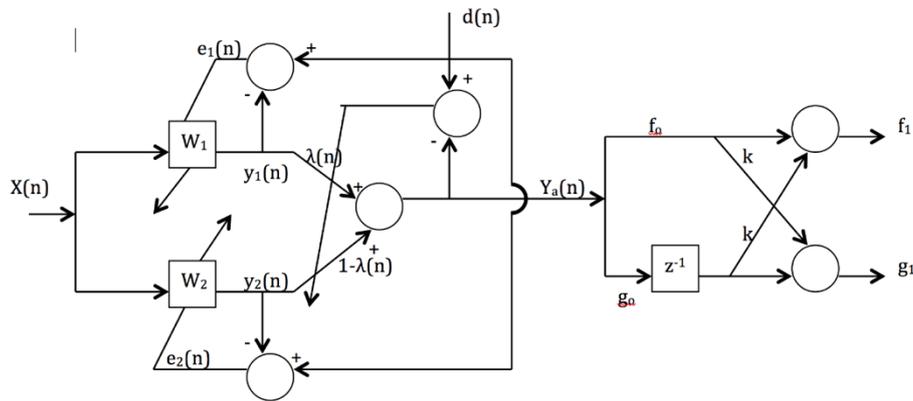


Figura 5. Combinación Affine y Estructura Lattice
Fuente: elaboración propia

Adaptabilidad de los coeficientes de reflexión de la estructura *Lattice* en la implementación de un filtro adaptativo

Con base en la conformación de la estructura *Lattice*, las ecuaciones que la componen, su funcionamiento, la obtención de los predictores tanto de adelanto como de atraso, los coeficientes de predicción, además, el conocimiento de las características del algoritmo acelerador regresivo en configuración *Affine*; se tiene como objetivo lograr una adecuación de la estructura *Lattice* con el algoritmo acelerador regresivo versión γ (AR γ) en configuración *Affine*, para determinar el comportamiento que tienen los coeficientes de reflexión en el ámbito adaptativo y establecer su comportamiento.

Para el efecto se inicia con la adecuación de un filtro adaptativo en la arquitectura *Lattice*, como se ilustra en la *Figura 6*, donde se puede precisar la adaptabilidad de los coeficientes de reflexión de la estructura *Lattice*.

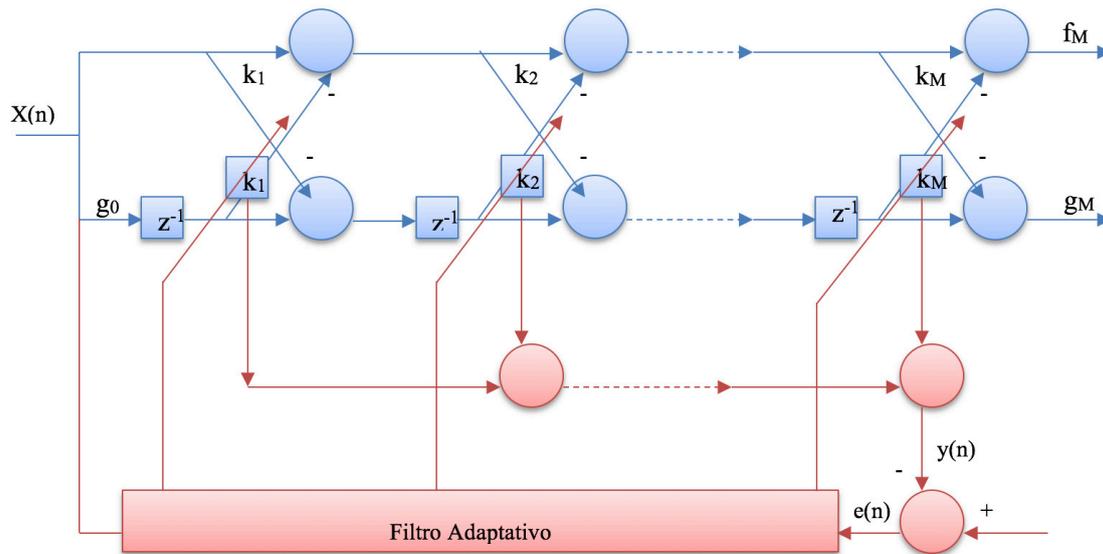


Figura 6. Estructura Lattice y filtro adaptativo.
Fuente: elaboración propia

A continuación, se da una descripción de las ecuaciones propias del filtro y su adaptación a la estructura *Lattice*.

Filtro AR y *Lattice*

Las ecuaciones que identifican al filtro AR y en estructura *Lattice* son:

$$y(n) = f_m(n)K(n) \quad (3.1)$$

$$e(n) = y(n) - d(n) \quad (3.2)$$

$$g_m(n) = \frac{e(n)\gamma f_m^T(n)q(n-1)}{1 + \alpha\gamma f_m^T(n)m_1 f_m(n)} \quad (3.3)$$

$$q(n) = \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} [q(n-1) - \alpha g(n)m_1 f_m(n)] \quad (3.4)$$

$$K_m(n) = K_m(n-1) + \alpha [f_m(n)g_{m-1}(n-1) + g_m(n)f_{m-1}(n)] \quad (3.5)$$

En la *Figura 7* se observa el comportamiento del filtro AR y al hacer la aplicación de la estructura *Lattice*, inicialmente se tiene la señal de error presentando una buena convergencia (*figura 7-a*), los coeficientes propios del filtro mostrando un buen comportamiento para el sistema de identificación implementado (*figura 7-b*) y finalmente los coeficientes de reflexión mostrando un comportamiento similar a los coeficientes propios del filtro (*figura 7-c*), siendo este un comportamiento singular ya que los coeficientes de reflexión siempre toman el mismo valor según la teoría presentada.

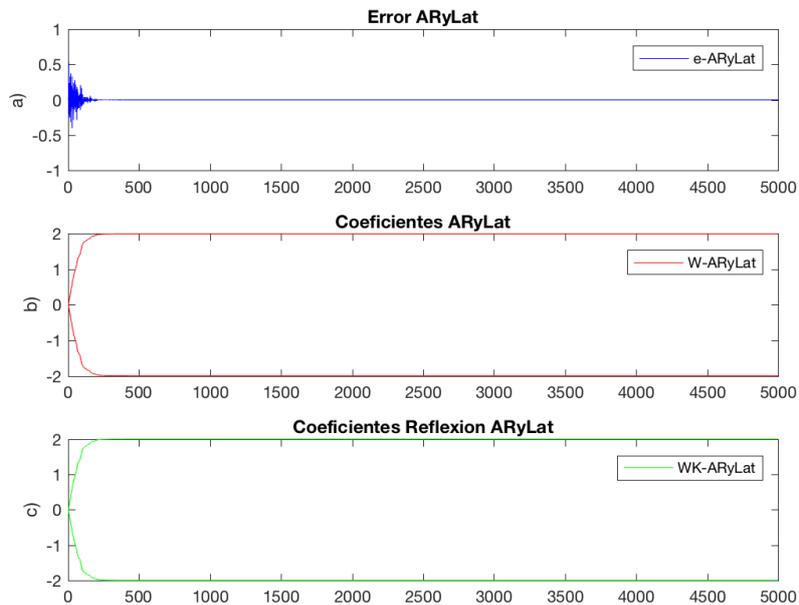


Figura 7. Comportamiento del filtro AR y la estructura Lattice. a) señal de error, b) coeficientes propios del filtro y c) coeficientes de reflexión.

Fuente: elaboración propia

En la *Figura 8* se observa el registro de la señal de predicción de adelanto y atraso del filtro AR y su implementación a la estructura Lattice.

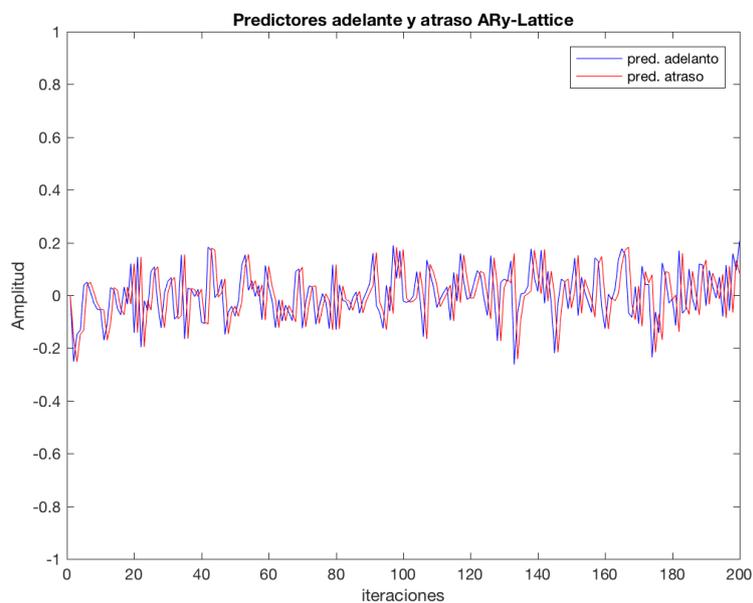


Figura 8. Señal de predicción de adelanto (azul) y atraso (roja) del filtro AR y al aplicar la estructura Lattice.

Fuente: elaboración propia

La señal de error del filtro AR y en su forma básica y la señal de error del filtro AR y al aplicar la estructura Lattice se ilustra en la *Figura 9* donde se evidencia que la velocidad de convergencia presenta un comportamiento similar.

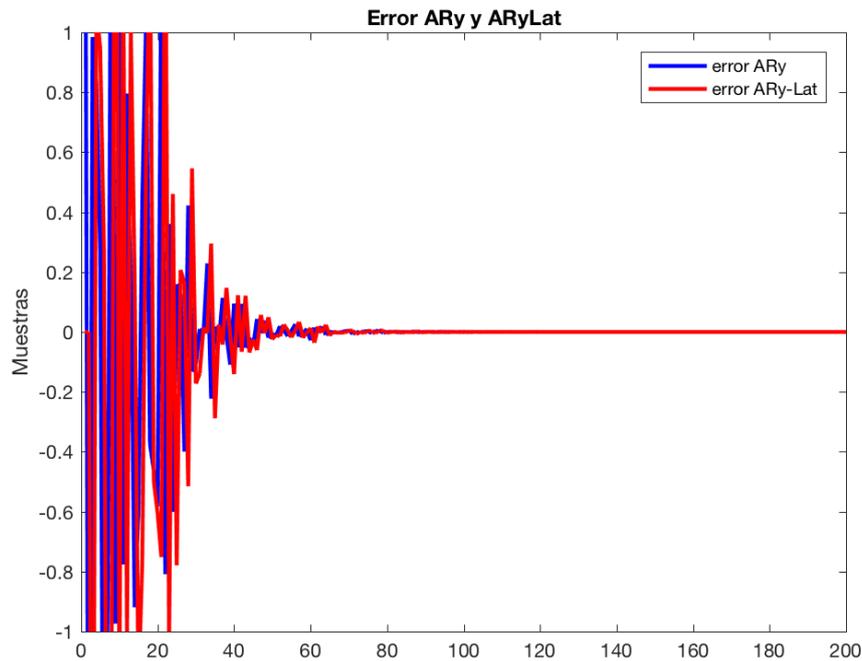


Figura 9. Señales de Error Filtros AR γ (azul) y AR-Lattice (rojo).
Fuente: elaboración propia

En la *Figura 10* se observa con mayor precisión que el filtro AR γ ofrece una mejor convergencia que cuando se aplica la estructura *Lattice* y con respecto al valor numérico del error cuadrático medio se reafirma lo dicho anteriormente por cuanto su valor es muy próximo. Como lo ilustran los valores obtenidos ($eqm_AR\gamma = 9.0530e-31$, $eqm_AR\gamma Lat = 9.0544e-31$).

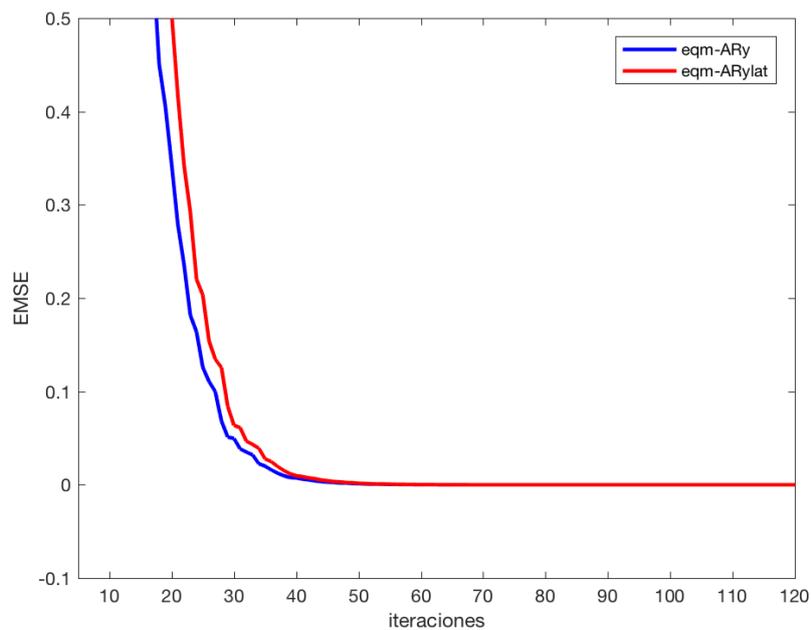


Figura 10. Convergencia de los filtros AR γ (azul) y AR-Lattice (rojo).
Fuente: elaboración propia

Filtro *Affine-Lattice-AR* y

Las ecuaciones que identifican al filtro *Affine-AR* y en estructura *Lattice* son:

$$y(n) = f_m(n)K(n) \tag{3.6}$$

$$e(n) = y(n) - d(n) \tag{3.7}$$

$$g_m(n) = \frac{e(n)\gamma f_m^T(n)q(n-1)}{1 + \alpha\gamma f_m^T(n)m_1 f_m(n)} \tag{3.8}$$

$$q(n) = \frac{\gamma}{\alpha + \gamma} [q(n-1) - \alpha g(n)m_1 f_m(n)] \tag{3.9}$$

$$y(n) = y_1(n)\lambda(n) + y_2(1 - \lambda(n)) \tag{3.10}$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{3.11}$$

$$\lambda(n+1) = \lambda(n) + \mu_\lambda e(n)(y_1(n) + y_2(n)) \tag{3.12}$$

$$K_m(n) = K_m(n-1) + \alpha [f_m(n)g_{m-1}(n-1) + g_m(n)f_{m-1}(n)] \tag{3.13}$$

En la *Figura 11* se ilustra el comportamiento del filtro AR y al aplicarlo a la estructura *Affine-Lattice*, en la cual se observa el registro de la señal de error (figura 11-a), seguido de las señales de predicción de adelanto y atraso (figura 11-b) donde se evidencia el buen comportamiento que ofrece la adecuación del algoritmo en estudio. En lo referente a los coeficientes de reflexión se observa que el registro correspondiente a la adecuación *Affine-Lattice* no difiere en sus valores comparativamente como se muestra en la figura 11-c, comentada anteriormente. Finalmente, la figura 11-c registra el comportamiento esperado de los coeficientes del filtro al aplicar el sistema de identificación aplicado durante la simulación.

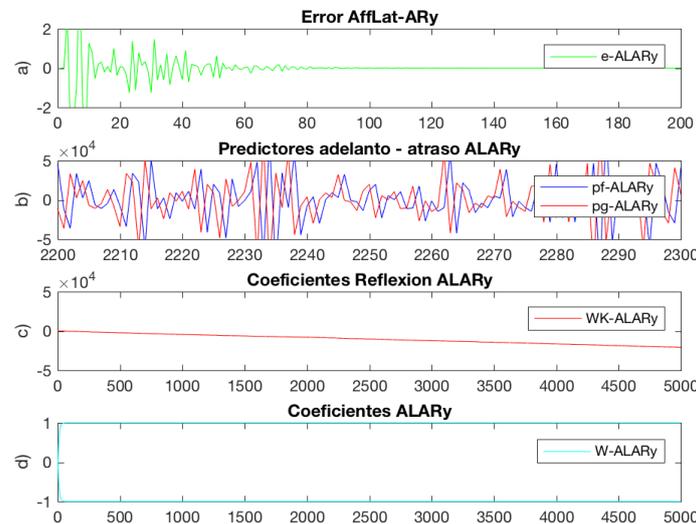


Figura 11. Comportamiento del filtro AR y la estructura *lattice*. a) señal de error, b) coeficientes propios del filtro y c) coeficientes de reflexión.

Fuente: elaboración propia

El registro observado en la *Figura 12* permite concluir una estabilidad mucho mas rápida al aplicar la adecuación *Affine-Lattice* al filtro AR y comparativamente con la aplicación del filtro AR y en *Lattice* y el filtro AR y en su forma convencional.

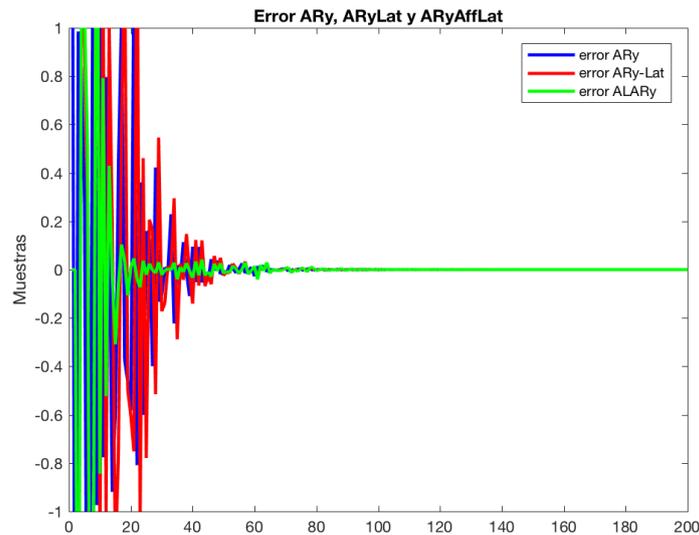


Figura 12. Señales de Error Filtros AR y (azul), AR-Lattice (rojo) y AR-Affine Lattice (verde).
Fuente: elaboración propia

Lo observado en el registro de la *Figura 13* permite afirmar que el filtro AR y *Affine-Lattice* ofrece una mejor convergencia comparativamente con los filtros AR-Lattice y AR y básico. Los valores numéricos para el error cuadrático medio responden a $eqm_ARy = 8.0413e-31$, $eqm_ARyLat = 8.0166e-31$, $eqm_AffLatARy = 4.4517e-31$ donde es evidente que el menor valor es el obtenido al aplicar la adecuación *Affine-Lattice*.

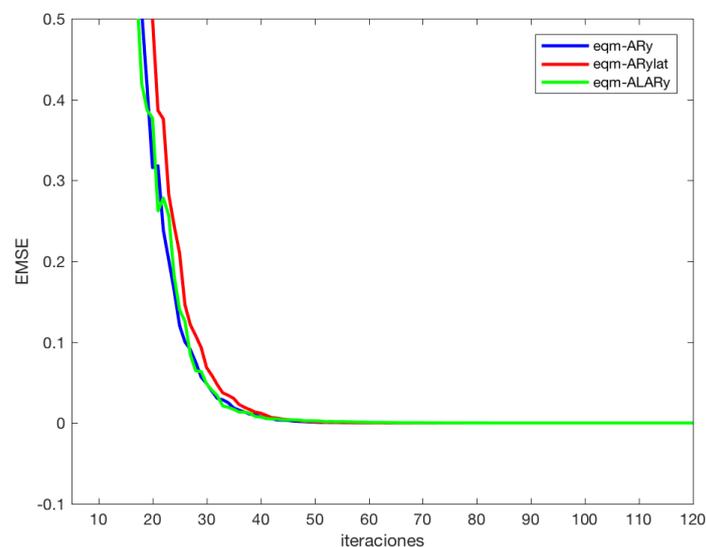


Figura 13. Convergencia de los filtros AR y (azul), AR-Lattice (rojo) y AR-Affine Lattice (verde).
Fuente: elaboración propia

Aplicación de la estructura *Lattice* a los filtros LMS y NLMS

Se realiza la adaptabilidad a la estructura lattice de los filtros básicos LMS y NLMS y se describen las ecuaciones al aplicar dicha estructura (Haykin, 2002).

Filtro LMS-*Lattice*

Un filtro adaptativo básico para realizar esta adecuación es el LMS cuyas ecuaciones son:

$$e_0(n) = d(n) - g_0(n)w_0(n) \quad (4.1)$$

$$e_m(n) = e_{m-1}(n) - g_m(n)w_m(n) \quad (4.2)$$

$$w_m(n+1) = w_m(n) + \mu e_m(n)g_m(n) \quad (4.3)$$

Ahora bien, las ecuaciones que describen la estructura *Lattice* son las siguientes:

$$f_m(n+1) = f_{m-1}(n+1) + K_m(n+1)g_{m-1}(n) \quad (4.4)$$

$$g_m(n+1) = g_{m-1}(n) + K_m(n+1)f_{m-1}(n+1) \quad (4.5)$$

$$f_0(n) = g_0(n) = x(n) \quad (4.6)$$

La estimación de los coeficientes de reflexión aplicando los métodos convencionales de algoritmos adaptativos, resulta de la aplicación de la estructura *Lattice* al algoritmo LMS, para el efecto, los coeficientes de reflexión se calculan como coeficientes de correlación cruzada entre los predictores de adelanto y atraso en cada etapa del filtro *Lattice* adaptativo.

La configuración del filtro *Lattice* ilustrada en la *Figura 2*, se puede expresar de forma general como

$$y(n) = f_m(n) = f_0(n) - \sum_{m=1}^M K_m(n)g_{m-1}(n-1) \quad (4.7)$$

En donde $f_m(n)$ es la salida del filtro *Lattice* con sus componentes $f_0(n)$ que es un valor de predicción y la sumatoria de los coeficientes de reflexión $K_m(n)$ por el error de predicción de atraso $g_{m-1}(n-1)$.

El segundo componente de la ecuación (4.7) se puede considerar como un filtro FIR de error de predicción como se ilustró en las secciones anteriores. Con base en las metodologías utilizadas en los tratamientos de los filtros FIR en lo relativo a la estimación de coeficientes, para los filtros *Lattice* el procedimiento resulta similar.

Así mismo, al minimizar el error de predicción de adelanto final se obtendrían los coeficientes de reflexión usando la siguiente estimación al hacer uso del algoritmo LMS:

$$K_m(n+1) = K_m(n) + \mu [f_m(n)g_{m-1}(n-1) + g_m(n)f_{m-1}(n)], \quad 0 < m \leq M \quad (4.8)$$

$$e_0(n) = d(n) - g_0(n)w_0(n) \quad (4.9)$$

$$e_m(n) = e_{m-1}(n) - g_m(n)w_m(n) \quad (4.10)$$

$$w_m(n+1) = w_m(n) + \mu e_m(n)g_m(n) \quad (4.11)$$

El método de Burg garantiza que los coeficientes de reflexión sean menores a la unidad.

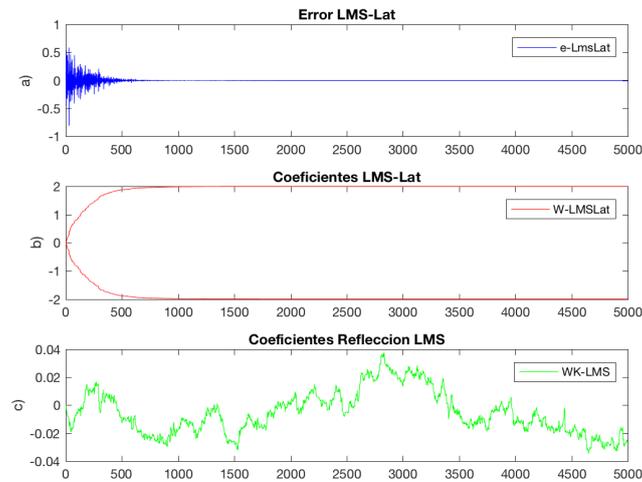


Figura 14. Filtro LMS-Lattice. a) error LMS-Lattice, b) coeficientes filtro LMS-lattice y c) coeficientes de reflexión LMS-Lattice.
Fuente: elaboración propia

La *Figura 14* ilustra el comportamiento del filtro LMS en estructura *Lattice* observándose la señal de error (figura 14-a), coeficientes propios del filtro LMS-Lattice (figura 14-b) y finalmente los coeficientes de reflexión que permiten concluir la generación de una sola señal (figura 14-c).

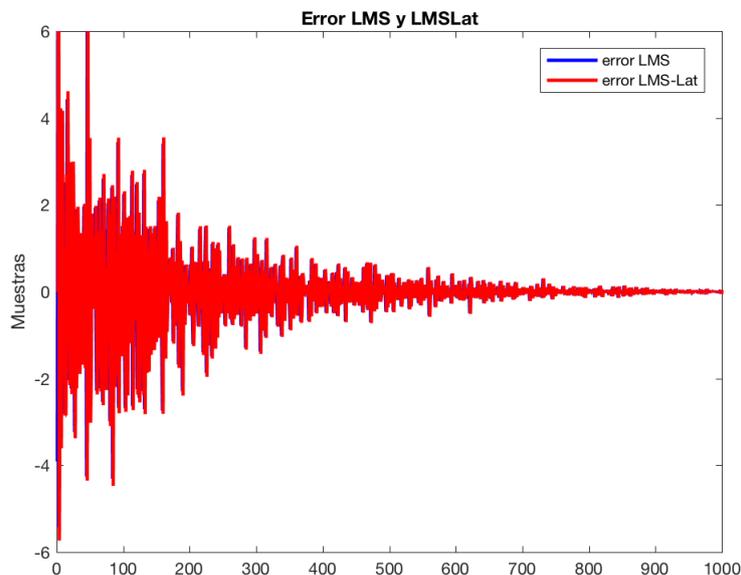


Figura 15. Error Filtro LMS (rojo) y error filtro LMS-Lattice (azul).
Fuente: elaboración propia

La *Figura 15* registra el comportamiento de la señal de error del filtro LMS en su forma básica y al aplicar la estructura *Lattice*. Se concluye que ofrecen un comportamiento similar con respecto a la convergencia, característica que se observa igualmente en la *Figura 16*, donde se destaca el comportamiento del error cuadrático medio del filtro LMS en estructura *Lattice* y el filtro LMS en su diseño convencional. El filtro en estudio ofrece una buena adecuación no obstante que su convergencia no ofrece mejora significativa.

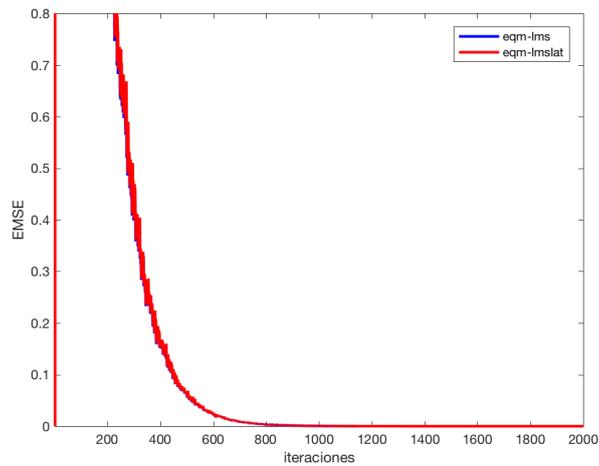


Figura 16. Convergencia filtro LMS (azul) y LMS-Lattice (rojo).
Fuente: elaboración propia

Filtro LMS Affine-Lattice

$$e_0(n) = d(n) - g_0(n)w_0(n) \tag{4.12}$$

$$e_m(n) = e_{m-1}(n) - g_m(n)w_m(n) \tag{4.13}$$

$$w_m(n+1) = w_m(n) + \mu e_m(n)g_m(n) \tag{4.14}$$

$$y(n) = y_1(n)\lambda(n) + y_2(1 - \lambda(n)) \tag{4.15}$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{4.16}$$

$$\lambda(n+1) = \lambda(n) + \mu_\lambda e(n)(y_1(n) + y_2(n)) \tag{4.17}$$

$$K_m(n+1) = K_m(n) + \mu[f_m(n)g_{m-1}(n-1) + g_m(n)f_{m-1}(n)], \quad 0 < m \leq M \tag{4.18}$$

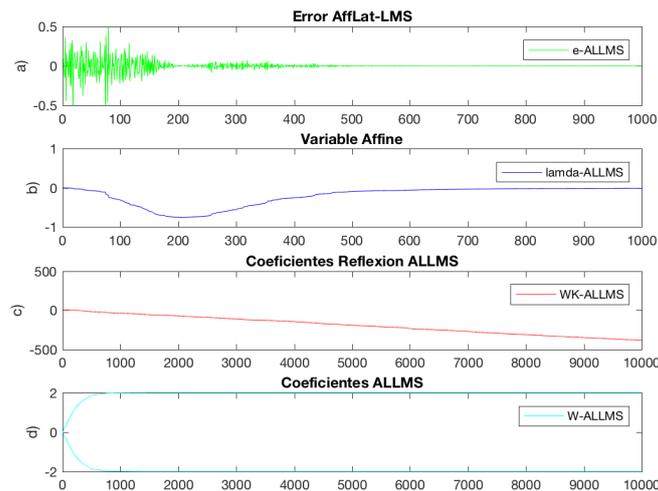


Figura 17. Filtro LMS Affine-Lattice. a) error LMS Affine-Lattice, b) Variable combinación Affine, c) coeficientes de reflexión filtro LMS Affine-lattice y d) coeficientes LMS Affine-Lattice.
Fuente: elaboración propia

La aplicación de la estructura *Affine-Lattice* al filtro LMS se ilustra en la *Figura 17* con: señal de error (figura.17-a), variable *Affine* (figura 17-b), coeficientes de reflexión (figura 17-c) y coeficientes propios del filtro (figura 17-d).

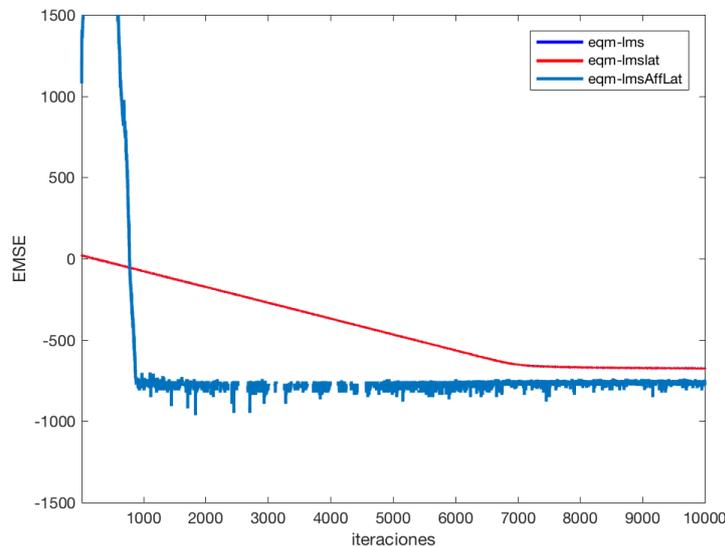


Figura 18. Error cuadrático medio del filtro LMS (azul) al aplicar la estructura *Lattice* (rojo) y con la aplicación de la combinación *Affine* y estructura *Lattice* (azul claro).
Fuente: elaboración propia

Al realizar la adecuación del filtro LMS en combinación *Affine* y luego al aplicar la estructura *Lattice* se observa una mejora significativa respecto a la velocidad de convergencia como se evidencia en la *Figura 18*.

Respecto a los coeficientes propios del filtro LMS se puede observar que al aplicar el sistema de identificación se obtiene la respuesta esperada (figura 17-d y figura 14-b) y con respecto a los coeficientes de reflexión de los filtros LMS-*Lattice* y LMS-*Affine-Lattice*, el registro presenta el mismo valor luego de la aplicación de la combinación *Affine* (Ver figuras 14-c y 17-c).

Filtro NLMS-*Lattice*

Al hacer uso del filtro NLMS y aplicar la estructura *Lattice* los coeficientes de reflexión están dados por la siguiente ecuación:

$$K_m(n+1) = K_m + \mu \frac{f_m(n)g_m(n-1)}{(g_{m-1}(n-1))^2} \quad (4.19)$$

La *Figura 9* registra el comportamiento del filtro NLMS adecuado a la estructura *Lattice* donde se observa la señal de error (figura 19-a), los coeficientes propios del filtro (figura 19-b) y coeficientes de reflexión (figura 19-c).

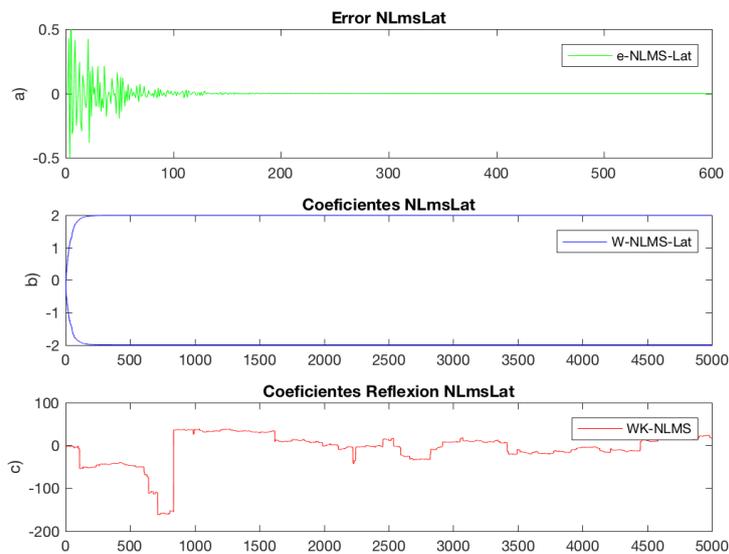


Figura 19. Filtro NLMS-Lattice. a) error NLMS-Lattice, b) coeficientes filtro NLMS-lattice y c) coeficientes de reflexión NLMS-Lattice. Fuente: elaboración propia

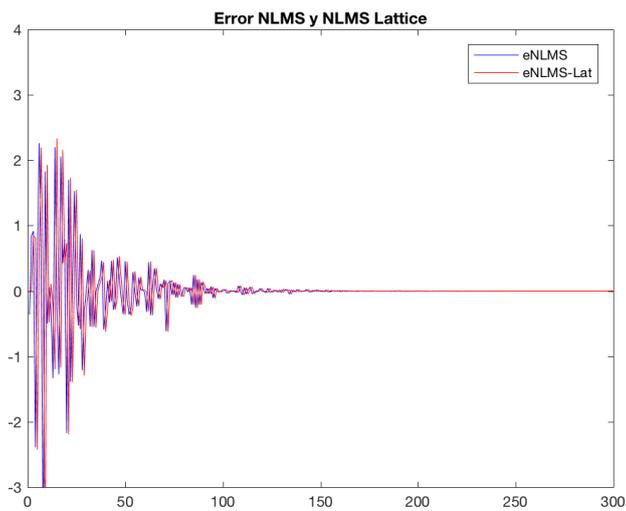


Figura 20. Error NLMS (azul) y Error NLMS-Lattice (rojo) Fuente: elaboración propia

La Figura 20 ilustra la comparación del comportamiento similar de la señal de error que ofrecen los filtros NLMS y NLMS en estructura Lattice.

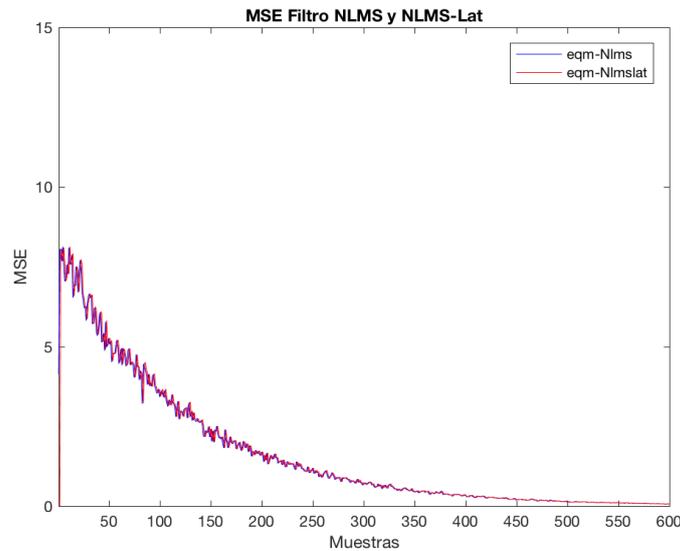


Figura 21. Convergencia filtro NLMS (azul) y NLMS-Lattice (rojo).
Fuente: elaboración propia

Cuando se aplica la estructura *lattice* al filtro NLMS se observa una buena adecuación (ver Figura 19) aunque su velocidad de convergencia no es significativa como se ilustra en la Figura 21.

Filtro NLMS-Affine-Lattice

$$y(n) = y_1(n)\lambda(n) + y_2(1 - \lambda(n)) \quad (4.20)$$

$$e(n) = d(n) - y(n) \quad (4.21)$$

$$\lambda(n+1) = \lambda(n) + \mu_\lambda e(n)(y_1(n) + y_2(n)) \quad (4.22)$$

$$K_m(n+1) = K_m + \mu \frac{f_m(n)g_m(n-1)}{(g_{m-1}(n-1))^2} \quad (4.23)$$

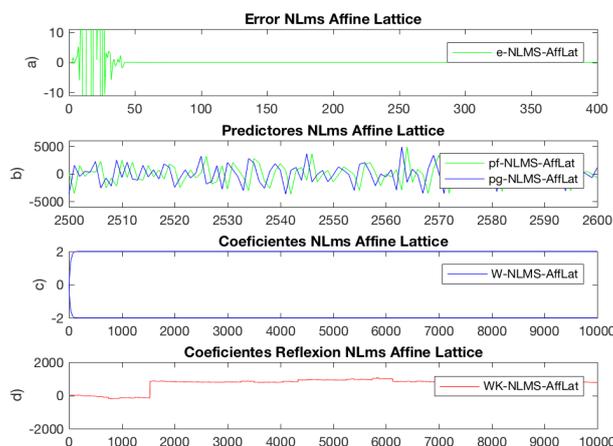


Figura 22. Filtro NLMS Affine-Lattice. a) error NLMS Affine-Lattice, b) Predictores de adelanto y atraso, c) Coeficientes filtro NLMS Affine-lattice y d) coeficientes de reflexión NLMS Affine-Lattice.

Fuente: elaboración propia

Los registros presentados en la *Figura 22* obedecen al comportamiento del filtro NLMS en configuración *Affine-Lattice* en sus variables de señal de error (figura 22-a), predictores de adelanto y atraso (figura 22-b), coeficientes propios del filtro (figura 22-c) y coeficientes de reflexión (figura 22-d).

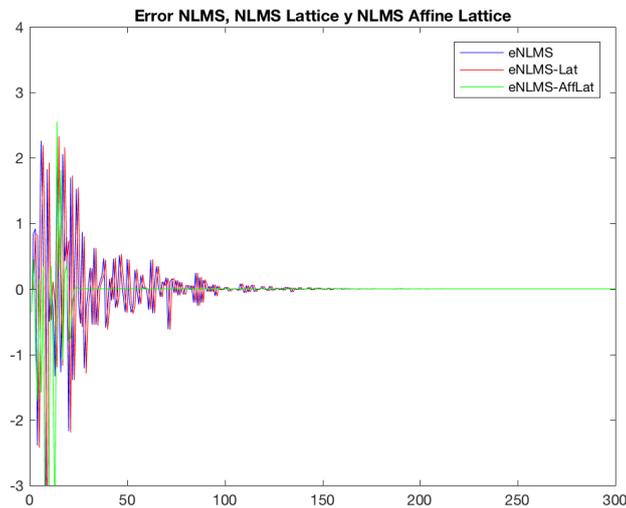


Figura 23. Error NLMS (azul), error NLMS Lattice (rojo) y Error NLMS Affine-Lattice (verde)
Fuente: elaboración propia

La convergencia de la señal de error para los filtros NLMS, NLMS-Lattice y NLMS-Affine-Lattice se puede observar en la *Figura 23* destacando el mejor comportamiento dado por el filtro NLMS-Affine-Lattice en comparación con los filtros NLMS y NLMS-Lattice.

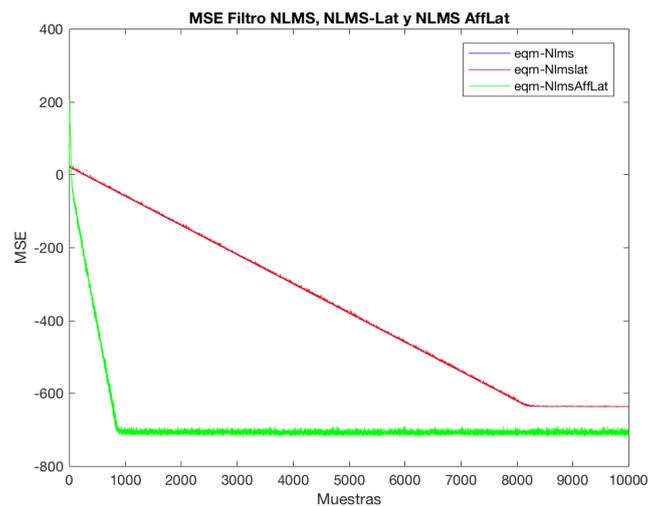


Figura 24. Convergencia de los filtros NLMS (azul), NLMS-Lattice (rojo) y NLMS Affine-Lattice (verde).
Fuente: elaboración propia

En la *Figura 24* se observa que con la aplicación de la combinación *Affine* y la estructura *Lattice* se obtiene una respuesta en convergencia más rápida que solo aplicando la estructura *Lattice*.

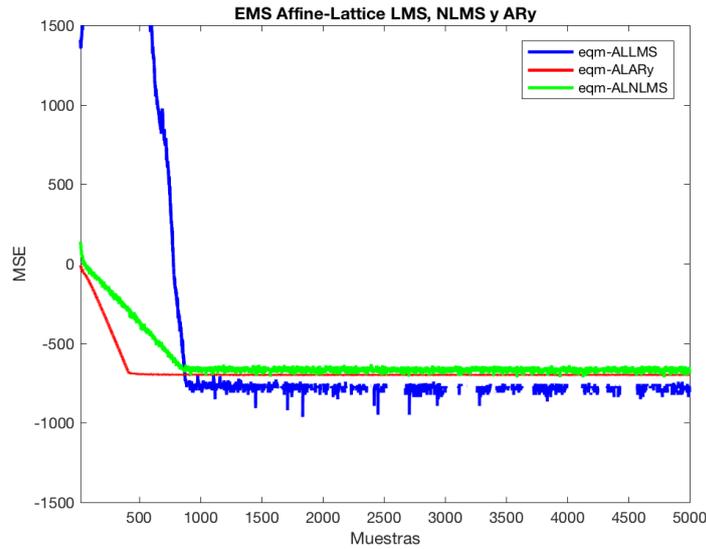


Figura 25. Convergencia de los filtros LMS Affine-Lattice (azul), AR y Affine-Lattice (rojo) y NLMS Affine-Lattice (verde).
Fuente: elaboración propia

La Figura 25 permite deducir que con respecto a la convergencia el filtro AR y Affine-Lattice ofrece el mejor comportamiento al relacionarlo con los filtros LMS y NLMS en configuración Affine-Lattice.

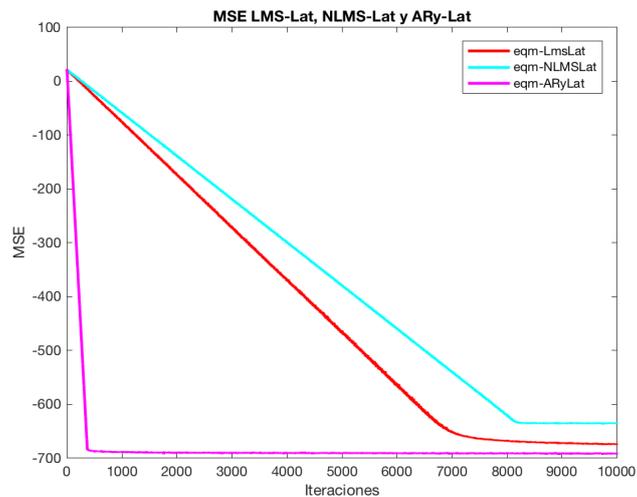


Figura 26. Convergencia de los filtros LMS Lattice (rojo), NLMS Lattice (cian) y AR y Lattice (magenta).
Fuente: elaboración propia

Después de la aplicación de la estructura Lattice y la combinación Affine-Lattice a los filtros LMS, NLMS y AR y y de observar el comportamiento de la señal de error cuadrático medio en las Figuras 25 y 26 se concluye que la convergencia más rápida se obtiene con el filtro AR y.

Análisis de tracking

Se examina el funcionamiento de los algoritmos en un ambiente no estacionario. El *tracking* es un fenómeno de estado estacionario que debe contrastarse con la convergencia como fenómeno transitorio. Para que un filtro adaptativo realice su *tracking*, inicialmente debe pasar de un estado transitorio a un estado estable y debe haber un ajuste continuo de los parámetros del filtro. En general, la velocidad de convergencia y el *tracking* son propiedades diferentes del algoritmo. Un algoritmo de filtrado adaptativo con buenas propiedades de convergencia no necesariamente posee una buena capacidad de seguimiento (*tracking*) y viceversa.

A continuación, se describe un sistema de identificación para un modelo de variación en el tiempo siguiendo un proceso de Markov el cual se describe en la *Figura 27*, que seguidamente se usa como base para evaluar el rendimiento de la capacidad de seguimiento (*tracking*) de los algoritmos LMS, NLMS y AR y que operan en un ambiente no estacionario.

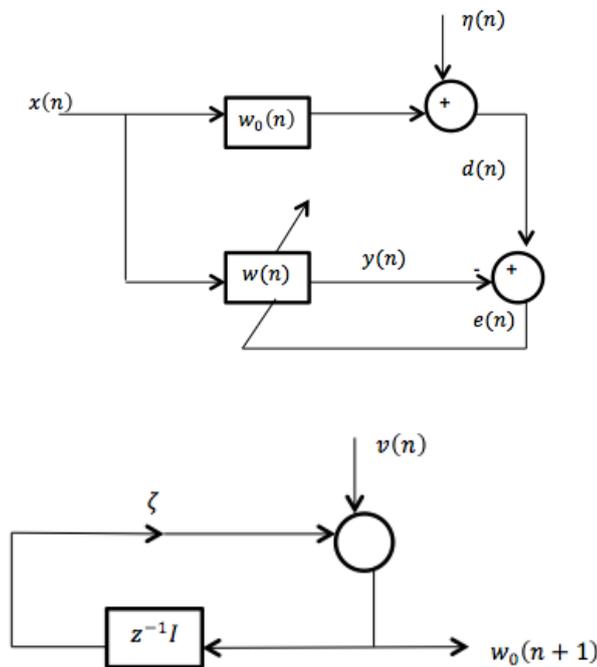


Figura 27. Modelo del Proceso de Markov y sistema de identificación
Fuente: elaboración propia

El proceso de Markov se describe de forma vectorial así:

$$w_0(n + 1) = \zeta w_0(n) + v(n) \tag{5.1}$$

- ζ = parámetro fijo (aproximado a 1)
- $v(n)$ = vector de ruido con media cero.
- $w_0(n)$ = coeficientes del sistema a ser identificado
- $\eta(n)$ = ruido blanco gaussiano con media cero y varianza σ_η^2
- $x(n)$, $v(n)$ y $\eta(n)$ = estadísticamente independientes.

Para verificar el análisis se efectúan diferentes experiencias con las siguientes condiciones:

$$L = \text{longitud de la señal} = 30000$$

$$\sigma_v^2 = \text{varianza del proceso de Markov} = 0.01$$

$$\sigma_x^2 = \text{varianza de la señal de entrada} = 0.1$$

$$\sigma_\eta^2 = \text{varianza del ruido de medida} = 0.05$$

Seguidamente se observan los valores para el error cuadrático medio de los filtros AR y, LMS y NLMS en su forma básica, en estructura *Lattice* y *Affine-Lattice*, tomando diferentes valores de zeta (ζ) siendo el mejor resultado cuando $\zeta=0.99$, como se detalla en las *Tablas 3, 4 y 5*.

Tabla 3.

Error Cuadrático Medio para diferentes valores de ζ del filtro AR y aplicando estructura Lattice y Affine-Lattice.

ζ	Eqm AR y	Eqm AR y Lattice	Eqm AR y Affine - Lattice
0.99	1.2008e-31	1.1955e-31	1.1028e-31
0.9998	1.4038e-31	1.4035e-31	1.2194e-31
1	1.3879e-31	1.3953e-31	1.2215e-31

Fuente: elaboración propia

Tabla 4.

Error Cuadrático Medio para diferentes valores de ζ del filtro LMS aplicando estructura Lattice y Affine-Lattice.

ζ	Eqm LMS	Eqm LMS Lattice	Eqm LMS Affine - Lattice
0.99	6.4837e-13	6.6236e-13	1.4458e-14
0.9998	6.8851e-13	7.0190e-13	1.5335e-14
1	7.1655e-13	7.3095e-13	1.5959e-14

Fuente: elaboración propia

Tabla 5.

Error Cuadrático Medio para diferentes valores de ζ del filtro NLMS aplicando estructura Lattice y Affine-Lattice.

ζ	Eqm NLMS	Eqm NLMS Lattice	Eqm NLMS Affine - Lattice
0.99	0.0796	30.8524	6.8844e-34
0.9998	0.0790	137.1053	6.6239e-34
1	0.0794	4.6045e+04	6.7269e-34

Fuente: elaboración propia

Para los valores de tomados se observa un mínimo valor para el error cuadrático medio con el filtro NLMS al aplicarlo a la combinación *Affine* y la estructura *Lattice*.

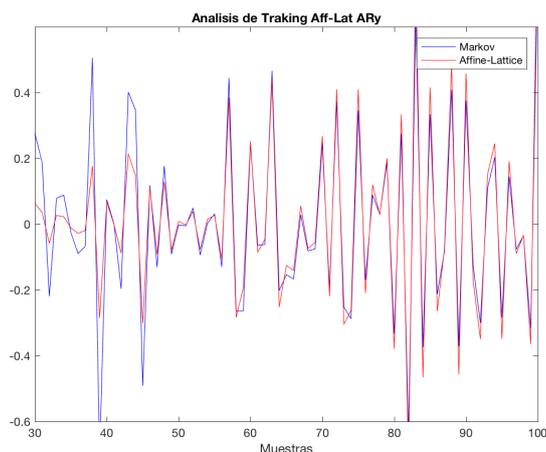


Figura 28. Algoritmo AR y en combinación Affine con estructura Lattice y proceso de Markov.
Fuente: elaboración propia

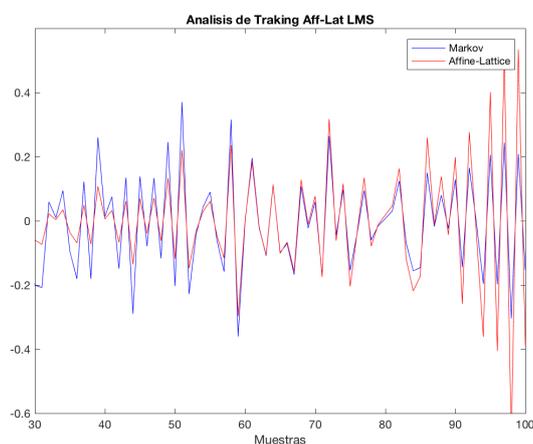


Figura 29. Algoritmo LMS en combinación Affine con estructura Lattice y proceso de Markov.
Fuente: elaboración propia

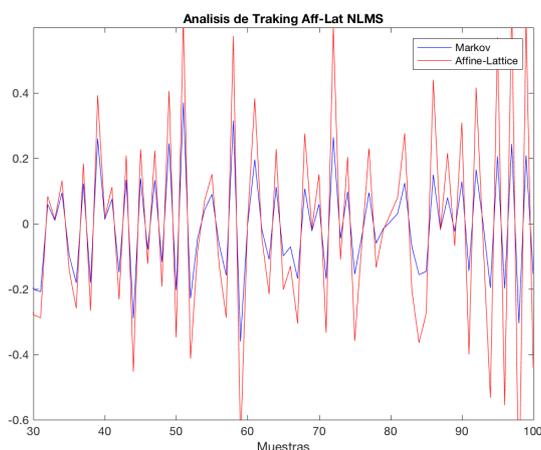


Figura 30. Algoritmo NLMS en combinación Affine con estructura Lattice y proceso de Markov.
Fuente: elaboración propia

En las Figuras 28, 29 y 30 se observa que el mejor seguimiento se obtiene del filtro AR y en combinación Affine en estructura Lattice.

CONCLUSIONES

Los filtros digitales constituyen una de las herramientas utilizadas en el procesamiento de señales y su clasificación se realiza con base en la estructura o arquitectura que la caracteriza. Para la implementación de filtros adaptativos es frecuente el uso denominado realización en celosía o estructura *Lattice*, en la que los parámetros en celosía, o *coeficientes de reflexión*, están relacionados con los coeficientes del filtro de la estructura FIR (*finite-duration-impulse-response*) en la forma directa.

Así mismo, permite convertir los coeficientes del filtro FIR en los coeficientes de reflexión y viceversa. Los algoritmos de filtrado adaptativo en los que la estructura del filtro es una celosía, también denominada *Lattice*, tienen como fundamento el método de mínimos cuadrados, ofrecen diversas propiedades deseables, incluyendo la eficiencia y robustez en los cálculos de los errores de redondeo, ventajas que hacen al filtro en celosía o *Lattice* muy atractivo para aplicaciones de filtrado adaptativo.

La característica común de estas aplicaciones con esquema de filtrado adaptable, es que todas involucran un proceso de filtrado de algún tipo de señal para coincidir con una respuesta deseada. Los parámetros del filtro son actualizados obteniendo un conjunto de medidas de las señales subyacentes para ser aplicadas al filtro adaptativo de manera tal que, la diferencia entre la salida del filtro y la respuesta deseada sea minimizada ya sea en un sentido estadístico o determinístico. Así entonces, son reconocidas aplicaciones de: modelado, modelado inverso, predicción lineal y cancelación de interferencias.

El Algoritmo Acelerador versión γ (AR γ) en configuración *Affine-Lattice* responde a un filtro adaptativo para procesamiento digital de señales con optimización de la adaptabilidad y rendimiento de sus propiedades de velocidad de convergencia, capacidad de seguimiento y mínimo error cuadrático medio

El registro de la señal de error permite concluir que al aplicar la adecuación *Affine-Lattice* al filtro AR γ ofrece una estabilidad mucho más rápida si se compara con la de los filtros AR γ -*Lattice* y AR γ básico.

La experiencia permite afirmar que la adecuación de la estructura *Lattice* a los filtros LMS, NLMS y AR γ se traduce en un mejor comportamiento de los filtros adaptativos en lo relativo a mínimo error cuadrático medio, velocidad de convergencia y capacidad de seguimiento, destacándose el algoritmo AR γ como el mejor de los filtros. Así mismo se puede afirmar que la adecuación de los filtros anteriores a la estructura *Affine-Lattice* ofrece una mejora notable en el comportamiento de los mismos y continúa destacándose el algoritmo AR γ como el mejor.

Los filtros adaptativos por su naturaleza constituyen sistemas autodiseñables que son también autoajustables a diferentes ambientes, razón por la que tienen aplicación en diversos campos como control, comunicaciones, procesamiento de señales de radar o sonar, cancelación de interferencias, control activo de ruido, ingeniería biomédica, etc.

Se recomienda la implementación del algoritmo AR γ en configuración *Affine-Lattice* en otros ambientes como cancelación de ruido y equalización de canal, incluyendo el efecto del ruido con diferentes SNR, así mismo en otro tipo de señales como las geofísicas.

REFERENCIAS

- Apolo, H. N. & Córdova, A. E. (2010). *Modelación matemática y simulación de un filtro digital híbrido FIR adaptativo lineal óptimo*. Tesis. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Cowan, C. F., & Grant, P. M. (Eds.). (1985). *Adaptive filters* (Vol. 152). Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Fujii, K., Tanaka, M., Sasaoka, N., & Itoh, Y. (2007). Method estimating reflection coefficients of adaptive lattice filter and its application to system identification. *Acoustical science and technology*, 28(2), 98-104. <https://doi.org/10.1250/ast.28.98>
- Galindo, H. (2008). Estudio e implementación de algoritmos de filtrado adaptable en aritmética de punto fijo. Tesis de Maestría, universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Granger, C. W. (1980). Testing for causality: a personal viewpoint. *Journal of Economic Dynamics and control*, 2, 329-352. [https://doi.org/10.1016/0165-1889\(80\)90069-X](https://doi.org/10.1016/0165-1889(80)90069-X)
- Haykin, S. (2002). *Adaptive Filter Theory*, 4a. Ed., Upper Saddle River, Prentice Hall, New Jersey.
- Ketchum, J., & Proakis, J. (1982). Adaptive algorithms for estimating and suppressing narrow-band interference in PN spread-spectrum systems. *IEEE Transactions on communications*, 30(5), 913-924. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1982.1095542>
- Kim, D., De Wilde, P (2000). *Performance analysis of signed self-orthogonalizing adaptive lattice filter*. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Analog and Digital Signal Processing, Volume: 47, Issue: 11, Nov. <https://doi.org/10.1109/82.885130>
- Kim, S. W., Park, Y. C., Seo, Y. S., & Youn, D. H. (2014). A robust high-order lattice adaptive notch filter and its application to narrowband noise cancellation. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2014(1), 1-12. <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2014-137>
- Lee, D. H., & Sung, W. (2011). Parallel computation of adaptive lattice filters. In *2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)* (pp. 1601-1604). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2011.5946803>
- Lu, J., Shen, C., Qiu, X., & Xu, B. (2003). Lattice form adaptive infinite impulse response filtering algorithm for active noise control. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 113(1), 327-335. <https://doi.org/10.1121/1.1529665>
- Nichols, H., Giordano, A., & Proakis, J. (1977). MLD and MSE algorithms for adaptive detection of digital signals in the presence of interchannel interference. *IEEE Transactions on Information Theory*, 23(5), 563-575. <https://doi.org/10.1109/TIT.1977.1055775>
- Panahi, I. M. S., Kannan, G., Hunt, L. R., MacFaelane, D. L. y Tong, J. (2005). Lattice filter with adjustable gains and its application in optical signal processing. In *IEEE/SP 13th Workshop on Statistical Signal Processing*, 2005, pp. 321-326. <https://doi.org/10.1109/SSP.2005.1628614>
- Park and Lee: Real-time estimation of respiratory rate from a photoplethysmogram using an adaptive lattice notch filter. *BioMedical Engineering OnLine* 2014 13:170

- Park and Lee: Real-time estimation of respiratory rate from a photoplethysmogram using an adaptive lattice notch filter. *BioMedical Engineering OnLine* 2014 13:170
- Park, C., & Lee, B. (2014). Real-time estimation of respiratory rate from a photoplethysmogram using an adaptive lattice notch filter. *Biomedical engineering online*, 13(1), 1-17. <https://doi.org/10.1186/1475-925X-13-170>
- Park and Lee: Real-time estimation of respiratory rate from a photoplethysmogram using an adaptive lattice notch filter. *BioMedical Engineering OnLine* 2014 13:170
- Picinbono, B. & Skwirzynski, J. K. (1978). Adaptive Signal Processing for Detection and Communication. En *Communication Systems and Random Process Theory*, Paises Bajos.
- Proakis, J. G. & Manolakis, D. G. (2007). Tratamiento digital de señales, 4ed, Pearson Education S.A. Madrid.
- Qi, H. (2009). Qi, H. (2009, February). Performance Analysis of Gradient Adaptive Lattice Joint Processing Algorithm. In *2009 International Asia Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* (pp. 199-202). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CAR.2009.40>
- Rivera. M. F. (2013). Efecto de la configuración *Affine en el Algoritmo Acelerador versión γ (AR γ)*. Tesis de Maestría, Universidad del Cauca, Popayan, Colombia.
- Sukhumalwong, S., Benjangkprasert, C., Anantrasirichai, N., & Janchitrapongvej, K. (2006). Echo cancellation using the new variable step-size algorithm adaptive lattice filters. In *2006 SICE-ICASE International Joint Conference* (pp. 3169-3172). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SICE.2006.314827>
- Supino, L. (2014). *U.S. Patent No. 8,797,673*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. <https://patents.google.com/patent/US8797673B2/en>
- Takemoto, T., Sasaoka, N., Itoh, Y., & Fujii, K. (2010). Speech enhancement system based on lattice filter and system identification. In *2010 10th International Symposium on Communications and Information Technologies* (pp. 441-446). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISCIT.2010.5664880>
- Theverapperuma, L. S., & Kindred, J. S. (2006). Adaptive feedback canceller: Entrainment. In *2006 IEEE 12th Digital Signal Processing Workshop & 4th IEEE Signal Processing Education Workshop* (pp. 245-250). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DSPWS.2006.265384>
- Theverapperuma., L - US Patent 8,452,034. (2013). *Entrainment avoidance with a gradient adaptive lattice filter*
- Widrow, B., Mantey, P. E., Griffiths, L. J., & Goode, B. B. (1967). Adaptive antenna systems. *Proceedings of the IEEE*, 55(12), 2143-2159. <https://doi.org/10.1109/PROC.1967.6092>

SISTEMA INTEGRAL DE HOGAR INTELIGENTE BASADO EN HOME ASSISTANT Y RASPBERRY PI

INTEGRAL SMART HOME SYSTEM BASED ON HOME ASSISTANT AND RASPBERRY PI

Manuel Asdrual Montaña Blacio

Instituto Superior Tecnológico Sudamericano, Ecuador

mamontano@tecnologicosudamericano.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6816-0439>

Johana Elizabeth Briceño Sarmiento

Instituto Superior Tecnológico Sudamericano, Ecuador

jebriceno@tecnologicosudamericano.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1072-1261>

Oscar Geovany Jiménez Sarango

Instituto Superior Tecnológico Sudamericano, Ecuador

ojimenez@tecnologicosudamericano.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-1824-5930>

Edgar Emanuel González Malla

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

eegonzalez@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3485-8649>

RESUMEN

Los sistemas de automatización de hogar han sido objeto de una atención considerable, al igual que los avances de las tecnologías digitales como el Internet de las Cosas (IoT). El deficiente uso del IoT, el alcance de las comunicaciones inalámbricas, interfaces de usuario no centralizadas, la interoperabilidad de dispositivos de diferentes marcas y tecnologías, además de los elevados costos, son limitantes de los sistemas de hogares inteligentes actuales. Por tal razón, este estudio propone una arquitectura viable para un sistema de automatización de hogar basado en IoT, que permite el control local y remoto con interfaces amigables e intuitivas compatibles con teléfonos inteligentes e interfaz web.

Se implementa la arquitectura a través del servidor home assistant, montado sobre un Raspberry Pi 3 que permite la centralización de objetos, el monitoreo y control de los dispositivos en tiempo real y en cualquier lugar. El sistema hace uso de las tarjetas NodeMCU ESP8266 para alojar los firmwares de los dispositivos domóticos comerciales, con el fin de abaratar costos y demostrar la interoperabilidad del sistema entre diferentes dispositivos comerciales o desarrollados, así mismo, hace uso de asistentes virtuales (Alexa y Google Home) para mejorar la interacción usuario - hogar, y en la etapa de potencia un conjunto de módulos relés para el control de electrodomésticos. La propuesta de automatización de hogar controla fácil y eficientemente los dispositivos a través del Internet, resguardando la seguridad de los datos, es de bajo costo, confiable, ofrece comodidad, seguridad familiar y reduce el consumo de energía.

PALABRAS CLAVE

Home assistant, IoT, Raspberry pi, Alexa, Google Home, MQTT

ABSTRACT

Home automation systems have received considerable attention, as have advances in digital technologies such as the Internet of Things (IoT). The poor use of IoT, the scope of wireless communications, non-centralized user interfaces, interoperability of devices of different brands and technologies, in addition to high costs, are limitations of current smart home systems. For such reason, this study proposes a viable architecture for an IoT-based home automation system, which allows local and remote control with friendly and intuitive interfaces compatible with smartphones and web interface.

The architecture is implemented through the home assistant server, mounted on a Raspberry Pi 3 that allows the centralization of objects, monitoring and control of devices in real time and anywhere. The system makes use of NodeMCU ESP8266 cards to host the firmwares of commercial home automation devices, in order to reduce costs and demonstrate the interoperability of the system between different commercial or developed devices, likewise, it makes use of virtual assistants (Alexa and Google Home) to improve user - home interaction, and in the power stage a set of relay modules for the control of household appliances. The home automation proposal easily and efficiently controls devices through the Internet, safeguarding data security, is low cost, reliable, offers comfort, family safety and reduces energy consumption.

KEYWORDS

Home assistant, IoT, Raspberry pi, Alexa, Google Home, MQTT

INTRODUCCIÓN

La tecnología, con el transcurso del tiempo, va mejorando y facilitando la interacción humana con objetos con el fin de ofrecer seguridad, confort, ahorro, accesibilidad y comunicación, una de las incorporaciones tecnológicas que facilita estos beneficios es la domótica, que como eje primordial permite automatizar el hogar controlando diversos dispositivos como luminarias, enchufes, ventiladores, electrodomésticos, sistemas de seguridad, sensores, entre otros, con el objeto de facilitar la interacción de los usuarios con sus hogares (Bejarano et al., 2016). La domótica toma un sentido más amplio gracias a la expansión del Internet de alta velocidad, el Internet de las Cosas (IoT), computación en la nube y diversas tecnologías de comunicación, haciendo posible concebir la idea del hogar inteligente.

Actualmente la perspectiva de un sistema inteligente de hogar, con un enfoque mínimo de supervisión, es altamente demandado para mejorar el estilo de vida. Los sistemas domóticos inteligentes se expanden debido a nuevas técnicas, facilidad, sencillez de control y monitoreo, a través de comunicación inalámbrica, Internet y teléfonos inteligentes, y con ello, la calidad en servicios va mejorando; cuenta con diversos propósitos, entre ellos, seguridad (Heartfield et al., 2018; Yared & Abulrazak, 2018), control de hogar (Vujović & Maksimović, 2015), gestión de energía (Joo & Choi, 2017; Khalid et al., 2019) e incluso una vida asistida (Ghayvat et al., 2015; Rafferty et al., 2017; Yared & Abulrazak, 2018). Sin embargo, indistinto de su propósito, deben brindar interoperabilidad que permita la vinculación de múltiples sistemas u objetos de diferentes marcas o fabricantes logrando un sistema heterogéneo centralizado.

Para crear un hogar inteligente eficaz, y que brinde las condiciones de interoperabilidad, es necesario seleccionar las herramientas, tanto de software, como hardware, y la tecnología de comunicación adecuada para su desarrollo y funcionamiento coherente. En este enfoque de gestión inteligente, el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) juega un papel esencial, logrando la conexión de varios dispositivos a través de la red, trabajando de manera colaborativa. Sin embargo, no solo se requiere de un sistema cooperativo en hardware, software y tecnología, se necesita también de una interfaz de usuario que permita al cliente interactuar con el hogar de forma eficiente. Las aplicaciones móviles de control se han desarrollado para facilitar su uso, y con ello se han implementado controles por voz y la posibilidad de incrementar o agregar asistentes inteligentes que faciliten la operatividad.

Existen algunas ventajas al hacer uso del concepto de hogar inteligente. Desde el punto de vista de centralización y gestión de dispositivos de hogar permite la forma activa de los hogares, en entornos de redes inteligentes con la facilidad de la interoperabilidad con los usuarios. Muchos trabajos e investigaciones se han realizado en base a este concepto, con el objetivo de brindar una mejor interacción entre dispositivos; conceptualizando un ambiente de hogar digital, donde se conjuga la correlación de servicios, plataformas y redes de comunicación. Dentro de este contexto digital se involucra activamente al concepto del IoT, para el despliegue de sistemas autónomos, capaces de realizar tareas con comportamientos inteligentes y asistidos a través del procesamiento y análisis de datos.

Bajo el concepto de hogar inteligente se encuentran varios aportes científicos, entre ellos los sistemas que aplican asistentes virtuales para facilidad de control. En Calvopiña et al. (2020) proponen a través del asistente Alexa de Amazon y Raspberry Pi, una solución de hogar inteligente de monitoreo de temperatura y clima, enfocada al uso de la voz como forma de interacción hombre-máquina, ofreciendo una alternativa al uso de un teléfono inteligente o una página web. En Chayapathy et al. (2018) desarrollan un asistente personal de bajo costo con una Raspberry Pi, usando la interfaz de aplicación de reconocimiento de voz de Google, el objetivo es ofrecer a los usuarios una forma de controlar los dispositivos a través de la voz o gestos, para lograr una experiencia más amigable a 1/3 del costo de un asistente comercial como Amazon

Echo, usan una cámara web simple con una función limitada de alcance y la dirección del habla, así como en el procesamiento de imágenes.

Así mismo, se resaltan varios aportes científicos de hogares inteligentes bajo los beneficios del IoT. En Ibrahim et al. (2015) construyen un dispositivo de monitoreo ambiental usando una Raspberry Pi y Python como lenguaje de programación, en la que se puede remotamente controlar y acceder haciendo uso de una plataforma IoT, logrando un sistema de bajo costo con grandes funcionalidades. Mientras que en Sooraj et al. (2020) presentan un asistente de hogar basado en IoT, haciendo uso de Arduino y Raspberry Pi con el propósito que sea un sistema de ayuda a las personas de tercera edad y con discapacidades, incorporando al sistema comunicación inalámbrica y reconocimiento de voz por inteligencia artificial para acceder, monitorear y controlar remotamente diversos dispositivos fácilmente, el sistema propuesto es modular y escalable.

Se evidencia que los trabajos realizados se enfocan en desarrollar sistemas domóticos haciendo uso de la voz, como principal mejora, en comparación a otros sistemas, no centrándose en la interoperabilidad de dispositivos, por eso la limitación principal de los sistemas domóticos es la baja interoperabilidad entre los diversos fabricantes, si bien existe un amplio grupo de dispositivos compatibles, pero no es su totalidad, lo que no permite adaptar bajo un mismo sistema de control gran variedad de soluciones existentes en el mercado, según la necesidad, sin duda, poder integrar en un solo sistema cualquier tipo de dispositivos, ya sean comerciales o desarrollados, es el objetivo de esta investigación, y para ello surge la necesidad de optar por plataformas de código abierto y poder integrar diferentes dispositivos domóticos y tecnologías a un costo reducido, además, dotar de seguridad a la información del usuario al tener un servidor local y no depender de servidores en la nube.

Con la parte introductoria abordada, se procede a detallar la metodología propuesta para el desarrollo del sistema, por consiguiente al diseño metodológico se da a conocer la arquitectura para solventar los problemas domóticos encontrados, se presentan las características y funcionalidades esenciales del modelo de software y hardware que se adaptan para implementar la arquitectura, con el sistema implementado se evalúa y optimiza la propuesta con el objetivo de eliminar errores, se lo valida en base al funcionamiento del prototipo y se concluye con la problemática resuelta.

METODOLOGÍA

Esta sección describe la metodología usada, la misma que incluye una revisión de antecedentes investigativos, las etapas del diseño y la implementación del sistema domótico. Así mismo, se detallan los componentes y su congruencia para cumplir con el objetivo del estudio, que es la propuesta de una arquitectura de hogar digital. En la *Figura 1* se muestra el flujo conceptual del estudio.

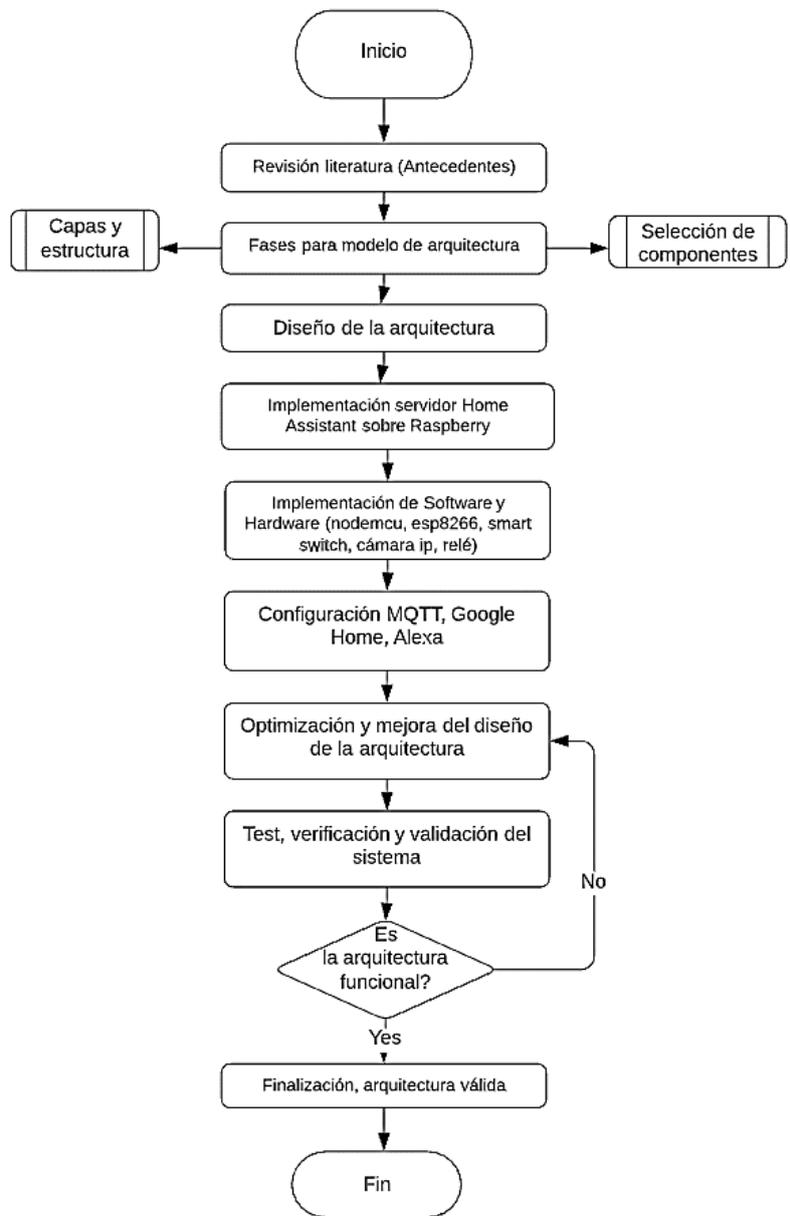


Figura 1. Diagrama de flujo metodológico
Fuente: elaboración propia

La presente investigación inicia identificando la problemática de los sistemas domóticos existentes. Dando a conocer que los problemas más relevantes son los altos costos de implementación inicial, las interfaces de interacción con los usuarios son poco amigables, pero radica aún más el problema en cuestión de interoperabilidad de sistemas y dispositivos indistintos de fabricación y tecnología.

La fase del modelado de la arquitectura se centra en la selección de los componentes y materiales para construir el prototipo de hogar digital y desarrollar así la arquitectura del sistema centralizado de dispositivos. El sistema de hogar digital está diseñado bajo el software de *home assistant* y el servidor se lo monta sobre una Raspberry Pi 3, se hace uso de una puerta de enlace (router) para la centralización de todos los dispositivos en una misma red. Las conexiones y el cableado de los diferentes objetos (luminarias, interruptores, ventilador, cámara y sensor) del prototipo se conectan a los diferentes elementos de alimentación, control y manejo de carga (NodeMCU, Esp8266, relés, y fuentes DC y AC). Después de las conexiones entre los microcontroladores y los elementos de hogar, se realizan las peticiones al servidor de las actividades

requeridas de funcionalidad, si existiese algún error se vuelve a analizar el diseño para identificar el problema, y con esto verificar la eficacia del sistema.

Arquitectura propuesta

La arquitectura propuesta en la *Figura 2* permite la interoperabilidad entre diferentes dispositivos de hogar, entre ellos sensores y actuadores conocidos como nodos clientes o nodos finales, conectados a través de una red inalámbrica WiFi doméstica. Lo medular de la arquitectura se basa en los beneficios y potencialidades de los sistemas abiertos, como lo es el servidor de *home assistant*, que se implementa para el control y centralización de todos los elementos.

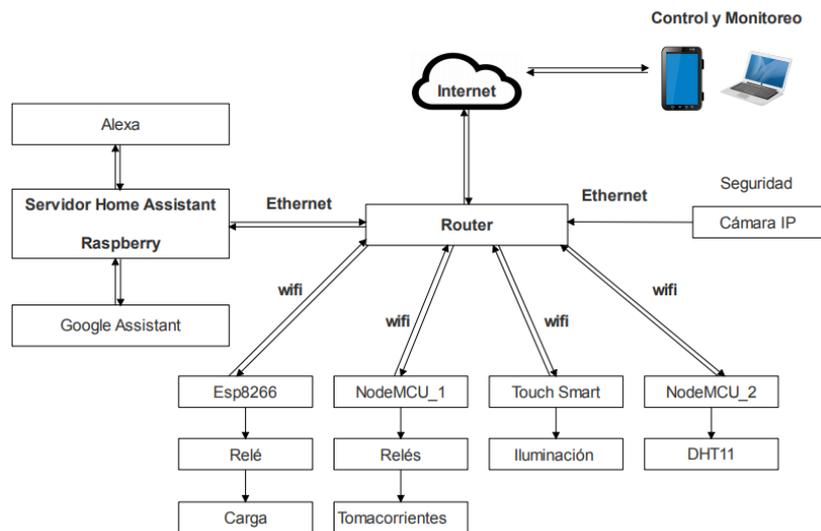


Figura 2. Arquitectura propuesta para la automatización de hogar inteligente
Fuente: elaboración propia

La arquitectura se distribuye por capas de la siguiente manera. El estándar IEEE 802.11 es usado en la capa física como acceso de los dispositivos a la red a una frecuencia de 2.4GHz, el método CSMA/CA se utiliza como acceso al medio para lograr que varios dispositivos usen el mismo medio inalámbrico de comunicación, en la capa de red se hace uso del protocolo IP, y con ello en la capa de transporte usar TCP con el objetivo de garantizar la confiabilidad de la recepción de los datos en los nodos, en la capa de aplicación se utiliza el protocolo MQTT para la comunicación con los usuarios finales, a través de la aplicación móvil e interfaz web. El sistema propuesto aprovecha al máximo las ventajas de IoT y tecnología integrada, cuenta con las siguientes características:

- Interoperabilidad: con la arquitectura propuesta, y el uso del servidor *home assistant*, se logra un sistema que permite en su totalidad la interoperabilidad de diversos dispositivos domóticos independiente de la marca o tecnología, de esta manera se ofrece al usuario final una amplia gama de opciones, sin limitaciones para la automatización de hogar.
- Control de dispositivos: en base a interfaces de usuario intuitivas y amigables, mismas que pueden ser instaladas en sistemas operativos Android e iOS, se puede controlar y monitorear diferentes dispositivos tales como electrodomésticos, luces, persianas, entre otros, a su vez poder gestionar el hogar desde un entorno local o través del Internet.

- **Monitoreo de variables ambientales:** a través de sensores conectados al entorno de hogar se puede adquirir datos de temperatura, humedad relativa y gases, que posibilita la gestión climática y contaminante dentro de su entorno, los usuarios pueden monitorear este sector climático en cualquier momento y lugar, con este factor imprescindible se puede manejar de una manera efectiva alguna escena anormal que se suscite en relación con el cambio abrupto de alguna variable.
- **Videovigilancia:** con la integración de un sistema de cámaras conectadas a la puerta de enlace de la red doméstica, los usuarios pueden visualizar el entorno de su hogar a través de un teléfono inteligente o página web, con el objetivo de resguardar la seguridad familiar, logrando ver las escenas en tiempo real.
- **Conectividad:** los dispositivos pueden conectarse al servidor a través de diferentes tecnologías de acceso, tanto inalámbricas, como cableadas, con la finalidad de lograr un entorno centralizado, poder gestionar y manipular los dispositivos desde entornos locales, como remotos, ofrecer al usuario la facilidad de acceder al sistema desde cualquier lugar que tenga conectividad a Internet.

Selección de componentes

En la *Tabla 1* se presenta los componentes de hardware, y en la *Tabla 2* los componentes de software necesarios para la implementación del sistema en base a la arquitectura propuesta, con el objetivo de levantar el prototipo de hogar digital bajo las consideraciones de la problemática planteada, así mismo, se da a conocer los costos referenciales de elementos de acuerdo con el mercado local (Ecuador).

Tabla 1.
Componentes de hardware

Componentes	Características	
	Hardware	Costos
Raspberry pi 3 B+	RAM 1GB, Wi-Fi 802.11 b/g/n, Puerto Gigabit Ethernet, SD Card 32 GB.	\$70.00
NodeMCU	RAM 128KB, 4MB Memoria Flash, 10 GPIO, Wi-Fi 802.11 b/g/n.	\$8.00
Esp8266	RAM 64 KB, 96 KB Memoria Flash, 4 GPIO, Wi-Fi 802.11 b/g/n.	\$3.50
L293D	Corriente de salida de 600 mA por canal. Corriente pico de salida 1,2A por canal. Tensión nominal de entre 5V y 12 V. Consumo de 55 mA.	\$5.75
Módulo relé	Voltaje de Operación: 5V DC. Señal de Control: TTL (3.3V o 5V). Capacidad máxima: 10A/250VAC, 10A/30VDC. Corriente máxima: 10A (NO), 5A (NC). Tiempo de acción: 10 ms / 5 ms.	\$4.00

Tira led RGB	Tensión de alimentación: 12V DC. Largo de la tira: 1 metros. Potencia: 14,4 Watt por metro. Cantidad de LEDs: 60.	\$3.00
Sensor DHT11	Voltaje de Operación: 3V - 5V DC. Rango de medición de temperatura: 0 a 50 °C. Precisión de medición de temperatura: ±2.0 °C. Resolución Temperatura: 0.1°C Rango de medición de humedad: 20% a 90% RH. Precisión de medición de humedad: 5% RH. Tiempo de sensado: 1 seg.	\$3.00
Tira led monocromática	Funcionamiento a 24VDC máximo. Led de alto brillo y bajo consumo BSLIGHT. Temperatura de trabajo: -20°C~50°C. Larga vida, más de 50.000h.	\$2.50
Alexa	Echo Dot 3ª generación. Conectividad: Wi-Fi doble banda compatible con redes 802.11 a/b/g/n (2.4 GHz y 5 GHz). Sonido: Altavoz integrado con salida de audio AUX de 3,5 mm para uso de altavoces externos.	\$54.00
Google Home Mini	Compatibles: Android e iOS. Conexión inalámbrica: WiFi y Bluetooth. Altavoz: sonido en 360 grados. Micrófono: reconocimiento de voz de campo lejano.	\$45.00
Interruptor inteligente	Conexión WiFi 2.4Ghz. APP Smart Life o TUYA Smart. Compatible con Google Home y Alexa. Voltaje 110V hasta 240V AC.	\$25.00
Enchufe inteligente	Potencia máxima: 2000W. Wireless 802.11. b/g/n. Compatible con Google Home y Alexa.	\$9.00
Cámara IP	Resolución de 2 megapíxeles. Alcance IR de 30m. Puerto RJ45 10/100Mbps.	\$56.00
Router inalámbrico	Estándar 802.11 b/g/n. Seguridad: WEP - WPA - WPA2.	\$19.00
Fuente de alimentación	Salida: 5 V DC a 3 A.	\$10.00

Fuente: elaboración propia

Tabla 2.
Componentes de software

Componentes	Características	
	Software	Costos
Home Assistant	Código abierto Control domótico Compatible con IFTTT.	NA
Protocolo MQTT	Protocolo de comunicación M2M. Basado en la pila TCP/IP.	NA
Tasmota	Firmware alternativo para dispositivos basados en Esp8266. Protocolos de comunicación MQTT o HTTP.	NA
Tasmotizer	Herramienta de flasheo con todas las funciones para Tasmota.	NA
Aplicaciones (Amazon Alexa – Google home – Tuya Smart – Smart Life – Home Assistant)	Configurar y monitorear dispositivos integrados	NA

Fuente: elaboración propia

Con la selección de los dispositivos se procede con el diseño y fabricación del sistema de hogar inteligente. Antes de iniciar con el desarrollo, se discute sobre los componentes de hardware del sistema a implementar.

Raspberry Pi 3 B+ (Raspberry, 2019), como se muestra en la *Figura 3*, es una pequeña computadora de bajo costo, se utiliza como el elemento central del sistema, donde se monta el servidor que permite el control y monitoreo de todos los dispositivos conectados a la red. Raspberry pi 3 B+ cuenta con un procesador de cuatro núcleos de 64 bits a 1.4Ghz, un chip para el control de gráficos, memoria RAM de 1Gb, comunicación inalámbrica IEEE 802.11, puerto RJ45 de 1 Gigabit Ethernet, alimentación de 5 V CC a 2,5 A, además de varias interfaces y conectores. Por lo tanto, Raspberry Pi es un dispositivo ideal para la automatización de hogar, aún más con sus características físicas que puede encajar en espacios reducidos como una caja eléctrica.



Figura 3. Raspberry Pi 3 B+
Fuente: elaboración propia

NodeMCU (*Figura 4*) es una tarjeta de código abierto de hardware y software de bajo costo, se utiliza como elemento de control de los dispositivos de hogar. El NodeMCU (Mattoo & Kumar, 2019) está basado en el chip Esp8266, es utilizado comúnmente en proyectos de IoT, sobre todo en la generación de dispositivos IoT, esto se debe gracias a su chip incorporado para conexión inalámbrica Wi-Fi 802.11 b/g/n, inteligencia, regulador de potencia, un potente procesador y las diferentes facilidades en cuanto a librerías y plataformas de programación como Arduino IDE. NodeMCU se alimenta con 3.3V a 500mA, cuenta con una API que per-

mite controlar las entradas y salidas facilitando la configuración, incorpora una memoria RAM de 20KB, con 4MB de memoria para almacenamiento y 10 puertos generales para propósito específico (GPIO). Así mismo, se hace uso del microchip Esp8266 para el control de cargas unitarias como focos, lámparas, electrodoméstico, etc. Al igual que el NodeMCU, es de bajo costo y cuenta con la capacidad de ofrecer conectividad a la red a través de WiFi.



Figura 4. NodeMCU
Fuente: elaboración propia

Para la etapa de potencia, se utilizan los módulos relés de 5V CC de 1 y 2 canales para realizar la conmutación de los dispositivos domóticos de control de luminosidad, como tira led RGB, tira led monocromática y foco. Los relés se activan o se desactivan en función de las señales recibidas del NodeMCU y Esp8266, estos reciben directamente los comandos del cliente a través del servidor central que se encarga de la gestión y administración de toda la red domótica. Para alimentar los módulos relés, se hace uso de una fuente externa de 5 V CC, debido a que supera la tensión generada por los controladores, con la ayuda de estos módulos se puede controlar cargas de corriente alterna 120 V AC y 240 V AC. Para la etapa de control de brillo y luminosidad del entorno del hogar se utiliza el controlador L293D, mismo que permite manejar cargas de media potencia hasta una corriente de 600 Ma, con una tensión que oscila entre 4.5 V a 36 V.

En el monitoreo de variables ambientales se utiliza el sensor DHT11, mismo que cumple la función de captar señales de temperatura y humedad relativa del entorno, estas señales ingresan a un puerto GPIO del NodeMCU para su procesamiento y visualización en las interfaces de control. El sensor DHT11 es un dispositivo electrónico que cuenta con diversas ventajas, es estable, su margen de error es aceptable, cuenta con salida digital, calibración precisa, excelente calidad y bajo costo.

El sistema de seguridad familiar propuesto basa su funcionalidad en la agregación de una cámara IP a la red del servidor. La cámara IP cuenta con una resolución de 2 megapíxeles, un alcance IR de 30m y un puerto RJ45 10/100Mbps para conexión cableada. El servidor es el encargado de centralizar y permitir que el video se pueda visualizar de forma remota a través del Internet y los usuarios estén atentos a cualquier evento no adecuado dentro de su hogar.

Para el sistema de control de interruptores y tomacorrientes, se hace uso de dispositivos comerciales, esto con el objetivo de demostrar una de las potencialidades de la arquitectura propuesta, la interoperabilidad dentro de un sistema centralizado. En la propuesta se usa dos asistentes virtuales (Alexa y Google Home) como aporte sustancial para el confort de los usuarios, para control de su hogar a través de comandos de voz establecidos y así mejorar la interoperabilidad humano - hogar. Estos asistentes se sincronizan al servidor a través de la red doméstica, haciendo uso de un router que opera en el estándar 802.11 b/g/n.

La propuesta hace uso de múltiples actuadores análogos a los electrodomésticos de hogar, con ello se expresa que cualquier actuador puede ser reemplazado por algún electrodoméstico, que será objeto de conmutación desde la interfaz de control. Se debe considerar la corriente de manejo nominal del relé para estar seguros del electrodoméstico a conectar, el relé soporta una corriente máxima de 10A. En función de la

placa de potencia y ahorro energético, el sistema de iluminación se basa en la tecnología led, estos sistemas son energéticamente eficientes y son compatibles con el diseño propuesto. Para la implementación del prototipo se utiliza un foco de bajo consumo, requiere de 60 mili vatios para funcionar, así mismo, se maneja el control de luminosidad de acuerdo con el tipo de ambiente como modo cine, disco, romántico, entre otros, esto se logra con el uso de la tecnología RGB y neopixel. Estos sistemas pueden ser instalados en diversos lugares del hogar y ser controlados por el usuario remotamente de acuerdo con sus necesidades.

El software utilizado para el sistema propuesto se discute a continuación. *Home assistant* (Figura 5) es una plataforma de código abierto habilitada para la automatización de hogar. El servidor se utiliza como elemento central encargado de la gestión y administración de todos los elementos en la red. Se opta por una solución de código abierto porque no existe un estándar adoptado para la automatización de hogar, en el mercado actual existen muchos dispositivos domóticos como focos, reproductores de audio, termostatos, entre otros, con limitaciones en el control, cada uno de los elementos desconoce del accionar del resto, y como usuario, es tedioso el control de cada objeto desde diferentes aplicaciones, con estos modelos de automatización es imposible hacer que los dispositivos se comuniquen entre ellos.

Home assistant cumple con los requerimientos de la propuesta, permite la agregación de múltiples dispositivos de diferentes marcas, brinda seguridad, permite ser instalado de forma local, maneja interfaces móviles y web para configuración, y sobre todo permite hacer modificaciones para adaptar nuevos elementos codificados bajo la plataforma de Arduino IDE e implementados en el chip Esp8266.

La arquitectura de *home assistant* que se presenta en la Figura 5 basa su funcionalidad en cuatro partes, bus de eventos, máquina de estado, registro de servicios y temporizador. El bus se encarga de la escucha de las solicitudes y facilita la activación, este módulo es el eje central del servidor. La máquina de estados es el módulo encargado de realizar el seguimiento de estados de los objetos de hogar conectados, y envía un evento de cambio de estado cuando el objeto ha sido conmutado. El registro de servicios se encarga de la escucha de los eventos sobre el bus de servicio de llamada y publica el servicio para ser gestionado por el bus de eventos. El temporizador cumple con la función de enviar un intervalo de tiempo para cada cambio de evento y con ello evitar conflictos. En la sección de componentes se alojan todos los dispositivos de hogar, estos se representan en el servidor como entidades, es posible crear nuevas entidades para alojar diversidad de elementos a la plataforma.

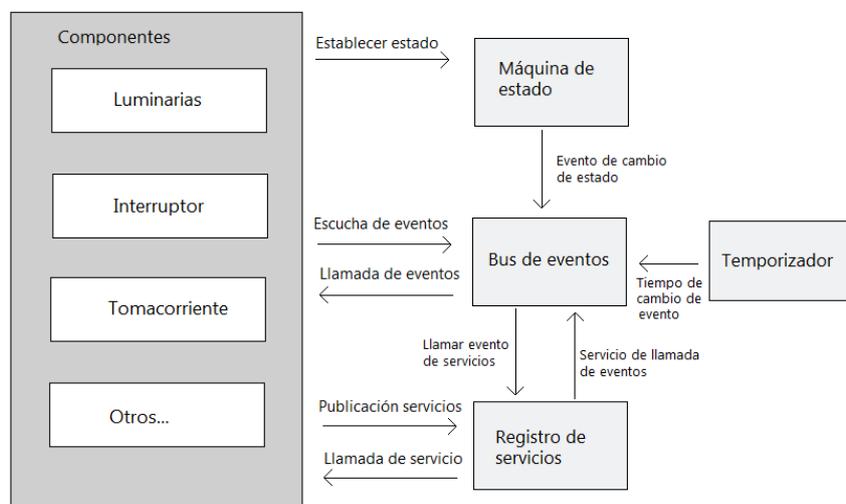


Figura 5. Arquitectura servidor
Fuente: elaboración propia

En este estudio, *home assistant* es el servidor para monitorear las condiciones del hogar y controlar los electrodomésticos a través de Internet mediante el protocolo MQTT. Los datos de detección, que incluyen las medidas del sensor y el estado del relé (encendido o apagado), se cargan en el servidor a través del NodeMCU. La manipulación de la interfaz por parte del usuario crea las acciones en el NodeMCU, este envía una señal de conmutación a los relés. El protocolo MQTT es el encargado de la publicación de mensajería, está basado en la pila TCP/IP y es altamente usado para enviar mensajes cortos, y mensajería ligera de máquina a máquina.

Los dispositivos del hogar inician una conexión TCP/IP con el *broker* de MQTT montado en el servidor, el *broker* mantiene las tablas de registro de los dispositivos conectados y la conexión se mantiene habilitada hasta que el NodeMCU y el Esp8266 finalice la acción. Para efectuar una conexión los controladores (NodeMCU, Esp8266) envían un mensaje CONNECT que contiene la información (nombre, contraseña e identificador) del dispositivo, el *broker* recibe el paquete y contesta con un mensaje CONNACK, que conlleva el resultado de la conexión si es aceptada o rechazada. Si la conexión se acepta, para enviar los mensajes el cliente hace uso de mensajes PUBLISH que se forma con el *Topic* y el *payload*. El cliente periódicamente envía mensajes de PINGREQ al servidor para mantener activa la conexión, y el servidor le responde con un PINGRESP. Realizada la petición o actividad en los dispositivos, el cliente se desconecta enviado un mensaje de DISCONNECT.

Para la construcción de los dispositivos de hogar se hace uso de Tasmota, esto con el objetivo de ofrecer interoperabilidad con tarjetas *open source* y así abaratar costos a la propuesta. Tasmota es un firmware de código abierto para tarjetas basadas en el chip Esp8266, este software proporciona interfaz web, actualizaciones inalámbricas y compatibilidad con diversidad de sensores, permitiendo el control a través de diferentes protocolos como HTTP, MQTT, Serial y KNX. Para cargar el firmware a las tarjetas, se utiliza el software Tasmotizer, que es la interfaz para la configuración de credenciales de red y el protocolo MQTT, con estas configuraciones realizadas se puede acceder a la interfaz web de Tasmota, para el control de estado de los dispositivos de hogar y comprobar el funcionamiento.

La aplicación *Smart Life* se utiliza para integrar en primera instancia los dispositivos comerciales domóticos, posterior a ello, se hace uso de la aplicación Tuya Smart para vincular estos dispositivos al servidor mediante la red inalámbrica, así mismo, se hace uso de las aplicaciones de Amazon Alexa, *Google Home*, para la configuración e integración de los asistentes virtuales a la plataforma central de *home assistant* y poder brindar interoperabilidad de diversos dispositivos.

Implementación de la propuesta

Para la instalación del servidor de *home assistant* sobre la Raspberry Pi, es necesario ciertos requisitos a nivel de hardware: almacenamiento SD mínimo de 4GB, memoria RAM de 1 GB, una conexión a internet de 20Mbps, y en la etapa de potencia una fuente de alimentación de 2.5 A. El sistema operativo seleccionado es Hassio, una versión desarrollada por los creadores de *home assistant* que contiene una imagen del servidor bajo una distribución de Linux para ser manejado sobre algún hardware específico. Esta distribución es el resultado de la concatenación de *home assistant* y Hassio-supervisor, el sistema se maneja por contenedores llamados docker e incluye Add-Ons para facilitar la instalación de ciertas herramientas y actualizaciones.

El sistema operativo Hassio se monta sobre un Raspberry Pi 3 B +, con una memoria SD de 32 GB y una fuente de alimentación de 3 A. Para la configuración del servidor se puede acceder a través de diferentes protocolos de aplicación, TELNET, SSH y HTTP. Se seleccionó el protocolo HTTP para acceder a la Raspberry, a través de la dirección IP asignada por router mediante DHCP, con esta IP identificada se procede a digitar

en un navegador, tomando en cuenta que el puerto de comunicación es el 8123. Si el sistema se levanta correctamente, se visualizará en la página web el inicio del servidor, se completa la instalación con el nombre del administrador y contraseña.

Con el servidor ejecutándose correctamente, se procede a indicar las características del servicio, que comprende el nombre del hogar a automatizar, la ubicación, la altura respecto al nivel del mar y la zona horaria, respectivamente como se detalla a continuación; nombre: Homedy: latitud: -3,999, longitud: -79,202, elevación: 2060m, sistema de medida: metros, zona horaria: America/Bogota, como se muestran en la *Figura 6*.

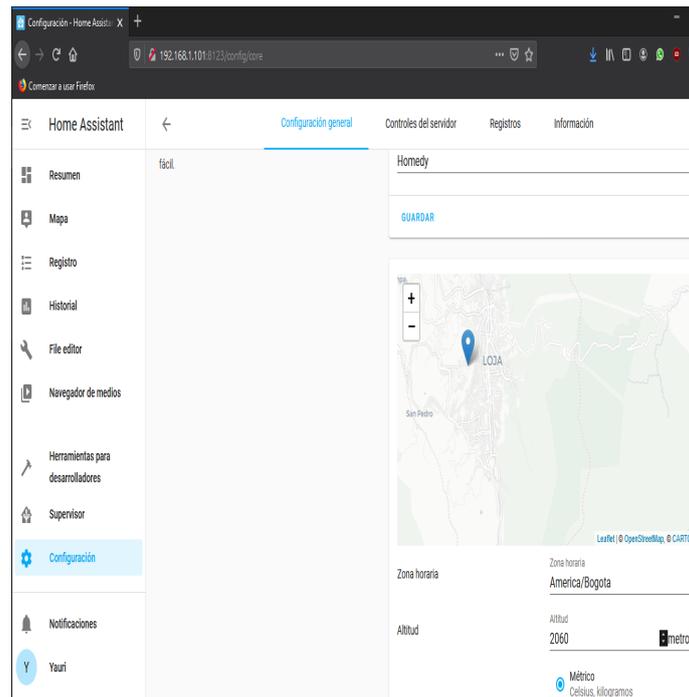


Figura 6. Configuraciones básicas del servidor
Fuente: elaboración propia

El diagrama de flujo del funcionamiento del servidor sobre la arquitectura propuesta se muestra en la *Figura 7*, con el servidor ejecutándose, el primer paso es sondear la conexión a la red, al no encontrar conexión disponible, el servidor queda en un bucle hasta cumplir con la condición, si se realiza el enganche a la red hace un barrido sobre la red local para identificar qué dispositivos de índole comercial o desarrollados se encuentran conectados, los centraliza y ejecuta las actividades o acciones emitidas por los usuarios, caso contrario, al no identificar ningún dispositivo, emite un informe de las actividades ejecutadas. Con este flujo, el servidor cumple con la interoperabilidad de todos los dispositivos, aplicaciones y servicios, además, se encarga del control de eventos y actualización de los servicios en las plataformas móvil y web.

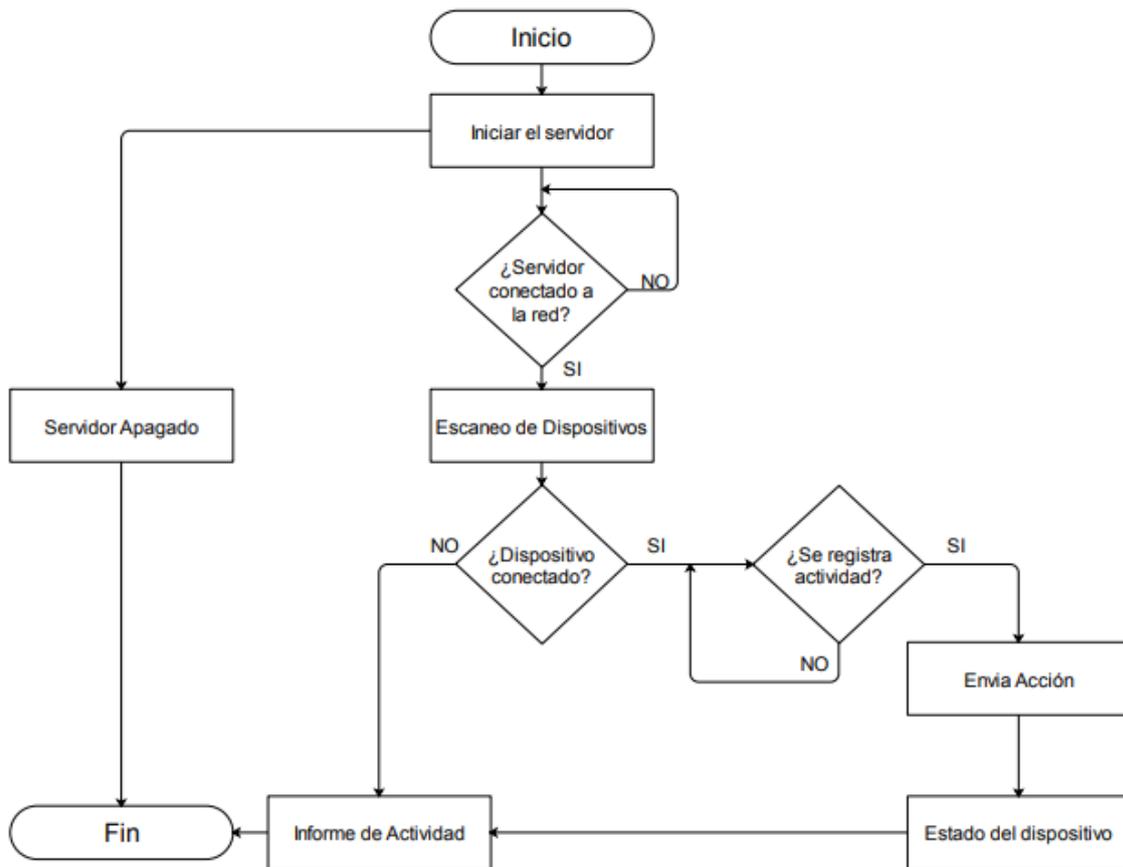


Figura 7. Diagrama de flujo del funcionamiento del servidor
Fuente: elaboración propia

Cada nodo inteligente en la propuesta consiste en el dispositivo, el controlador y la conectividad que ofrecen la funcionalidad de inteligente. El servidor cuenta con un módulo de descubrimiento automático de dispositivos y servicios alojados en la red, siempre y cuando estos se encuentren agregados mediante un escrito YAML en los archivos de configuración; sin embargo, para agregar otros dispositivos se debe instalar Mosquitto broker MQTT dentro del servidor, completar la configuración asignando un nombre de usuario y una contraseña e inicializar Mosquitto broker. Para desarrollar dispositivos domóticos funcionales se emplea las tarjetas NodeMCU y Esp8266, se hace uso del firmware Tasmota.bin, que es la versión de Tasmota recomendada para estos fines, porque cuenta con la mayoría de los controladores adjunto a su distribución binaria.

Mediante el software Tasmotizer se carga el nuevo firmware a las tarjetas, subido el sistema, estos módulos se comportan como puntos de acceso, en la lista de redes se mostrará la nueva red WiFi llamada *tasmota*, al conectarse se le asigna una dirección IP, misma que sirve como enlace para la configuración de los dispositivos, esto a través de un navegador. En la siguiente *Figura 8* se muestran los parámetros de configuración básicos para conectar los dispositivos domóticos a la red del servidor, que comprende el nombre de la red y la contraseña.

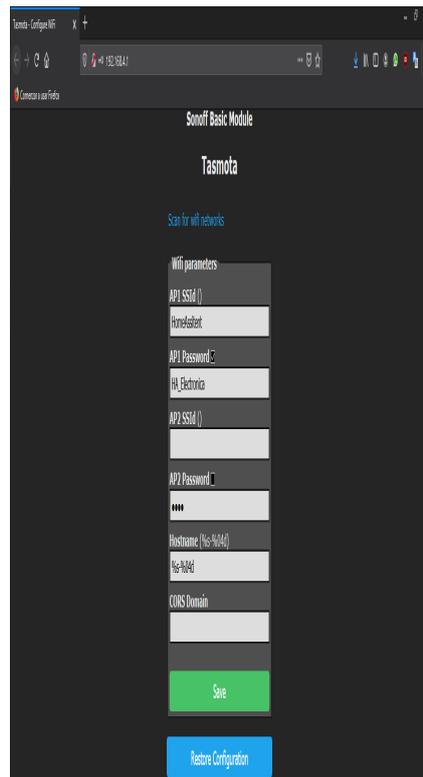


Figura 8. Interfaz Tasmota para la configuración de red de los dispositivos
Fuente: elaboración propia

Con las configuraciones de conexión a la red realizadas, se identifica la IP asignada a los dispositivos, esta dirección se coloca en un navegador (Figura 9) para completar la integración al servidor, el modo de funcionamiento de los puertos GPIO de las tarjetas y el protocolo de comunicación MQTT; todas estas configuraciones se encuentran dentro de la sección *Configuration*. Se identifican tres apartados dentro de la sección de *Configuration*, primero la *Module parameters* (Figura 10), en este caso seleccionar asignar actividad a los pines del NodeMCU y Esp8266 respectivamente, segundo *MQTT parameters* (Figura 11), donde se debe ingresar la IP del servidor, usuario y contraseña del broker MQTT, tercero *configurar otros* (Figura 12), en esta apartado se le asigna un nombre al dispositivo domótico y el *Friendly Name 1,2,3,4,5*, para identificar la comunicación MQTT, realizados estos pasos los dispositivos se encuentran vinculados al servidor.



Figura 9. Interfaz Tasmota para configuración del firmware
Fuente: elaboración propia

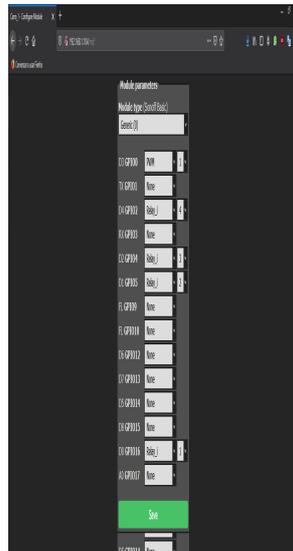


Figura 10. Configuración de los parámetros de los controladores.
Fuente: elaboración propia



Figura 11. Configuración de los parámetros del protocolo MQTT
Fuente: elaboración propia

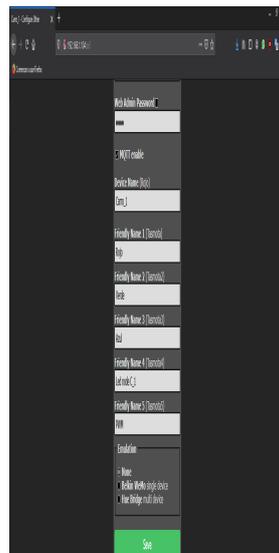


Figura 12. Configuración de parámetros del dispositivo
Fuente: elaboración propia

El sistema de seguridad familiar se maneja mediante un cámara IP, para agregar este dispositivo al servidor se debe activar el puerto de comunicación TCP/UDP 554 en el router, con este puerto activo se accede a la cámara mediante la dirección IP asignada, dentro de la misma, revisar en la sección de configuración que los puertos 80 (HTTP), 554 (RTSP), 443 (HTTPS) y 8000 estén habilitados. En la parte de servidor ingresar al archivo de *configuration.yaml* en la ruta */config/configuration.yaml*, sobre este archivo *yaml* editar, nombre, contraseña, dirección IP y nombre de la cámara como se presenta en la *Figura 13*.

```

/config/configuration.yaml
ffmpeg: ~
stream: ~
camera: ~
  - platform: ffmpeg
    input: rtsp://admin:jdmb2011@192.168.0.105:554/stream
    name: camara-salon
  
```

Figura 13. Configuración para integrar la cámara IP
Fuente: elaboración propia

Para vincular los dispositivos comerciales (interruptor y tomacorriente) se debe instalar la aplicación *Tuya*, sobre esta se registran los dispositivos y se configura el SSID y la contraseña de la red de hogar. En la sección de configuración del servidor en la ruta */integraciones/añadir integración* (*Figura 14*) se registra el usuario y contraseña para vincular la aplicación *Smart Life* al sistema. Con esta agregación, se logra que el servidor centralice la aplicación, pueda usar todas sus funciones para enrutar a esta las peticiones de los usuarios y mantener actualizado el estado de los dispositivos.



Figura 14. Integración de la aplicación Tuya al servidor
Fuente: elaboración propia

En la fase de interacción de los usuarios con el hogar, se utilizan asistentes virtuales para brindar comodidad mediante el control por voz. Para vincular al servidor estos asistentes (Alexa y Google Home) se hace uso de *home assistant Cloud* (Figura 15) que permite la agregación de forma fácil, mediante correo electrónico. En el servidor se activa Alexa y Google Home en el *Skill of Home Assistant* (Figura 16 - 17). Habilitado estos servicios, se debe ingresar a la nube de Amazon y Google respectivamente y activar el asistente de hogar (Figura 18). Se configuran las entidades que van a hacer controlados por los asistentes virtuales, y se sincroniza para identificarlos en las aplicaciones tanto de Amazon, Alexa, como Home de Google, con las aplicaciones instaladas en los teléfonos inteligentes, se procede a vincular los asistentes Echo Dot (Alexa) y Google Home mini.

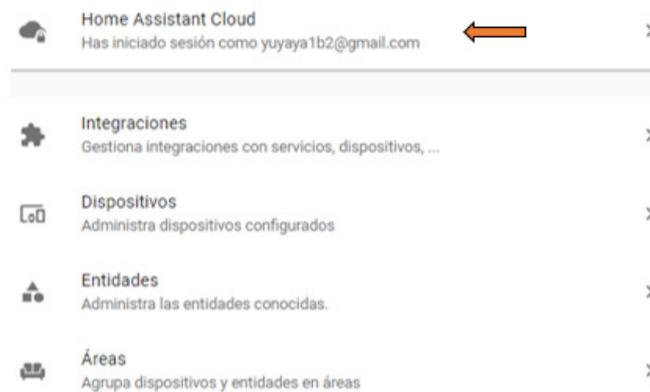


Figura 15. Inicio de Home Assistant Cloud.
Fuente: elaboración propia

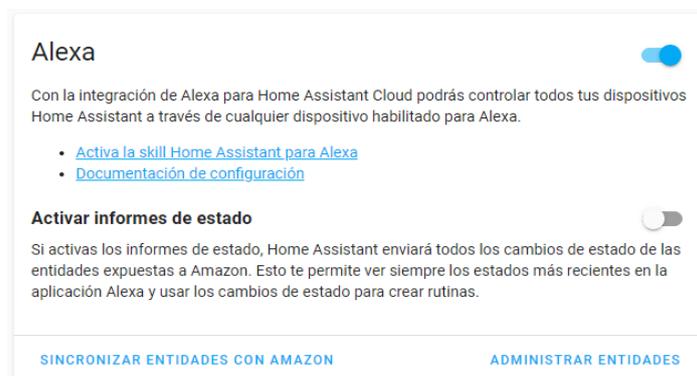


Figura 16. Activación Skill of Home Assistant para Alexa
Fuente: elaboración propia



Figura 17. Activación Skill of Home Assistant para Asistente de Google
Fuente: elaboración propia

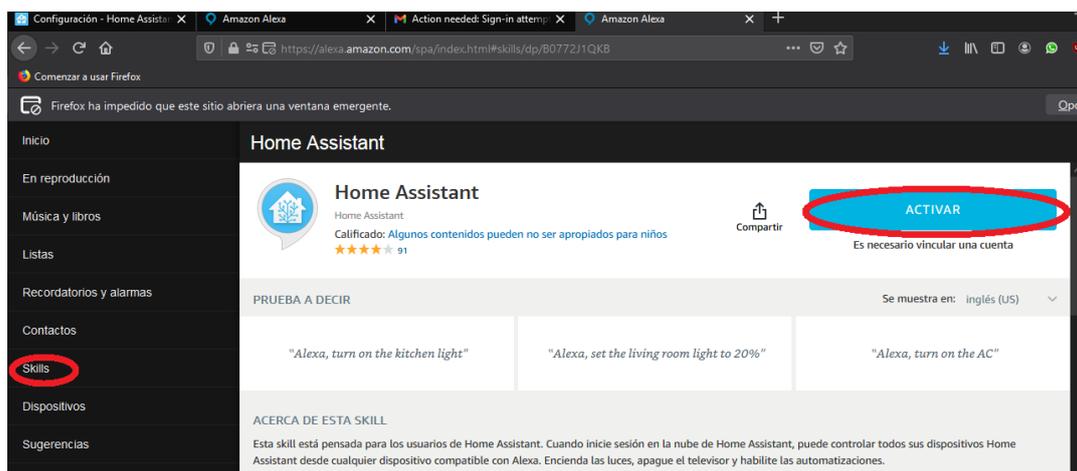


Figura 18. Activación servicio Home Assistant en la plataforma de Amazon y Google
Fuente: elaboración propia

El diagrama de flujo de la interacción entre el servidor *home assistant* y los asistentes virtuales se muestra en la *Figura 19*, los asistentes virtuales revisan su conectividad a Internet para acceder a la nube y ejecutar las acciones emitidas por los usuarios, caso contrario, al no tener acceso a Internet, el sistema de control por voz queda en un ciclo finito hasta cumplir la condición. Cuando el usuario emite una solicitud, los asistentes envían la petición al servidor para que enrute esta información a la nube de Amazon o Google. Las plataformas en la nube se encargan de verificar si los dispositivos en cuestión se encuentran vinculados o no al sistema, si es así, se realiza la acción sobre los dispositivos inteligentes y se emite un informe de la actividad de conmutación realizada, si no existiera una petición el funcionamiento de flujo se mantiene en un bucle, hasta que el usuario reactive el control por voz.

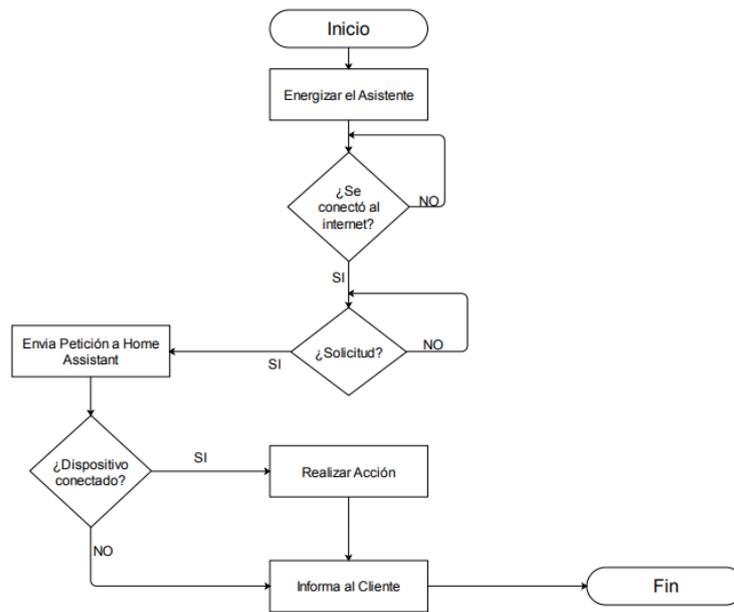


Figura 19. Diagrama de flujo de funcionamiento de los asistentes virtuales
Fuente: elaboración propia

Los dispositivos desarrollados para el control de iluminación y variables climáticas de la propuesta se muestran en la Figura 20, donde se evidencia la conexión, se trabaja con las tarjetas de control Esp8266 y NodeMCU, en la etapa de potencia se utiliza los módulos relés y circuito integrado L293D. De acuerdo con las configuraciones efectuadas en los dispositivos se utiliza los puertos GPIO a su elección, en el caso del Esp8266 se utiliza el puerto 3 para la conmutación del foco, el NodeMCU de control de intensidad de luminosidad usa el puerto D0, D1, D2 para el control RGB, el puerto D3 control PWM, el puerto D4, D5 control de la tira led azul y verde; en el dispositivo de medición de variables climáticas utiliza el puerto 2 para registro de humedad y temperatura.

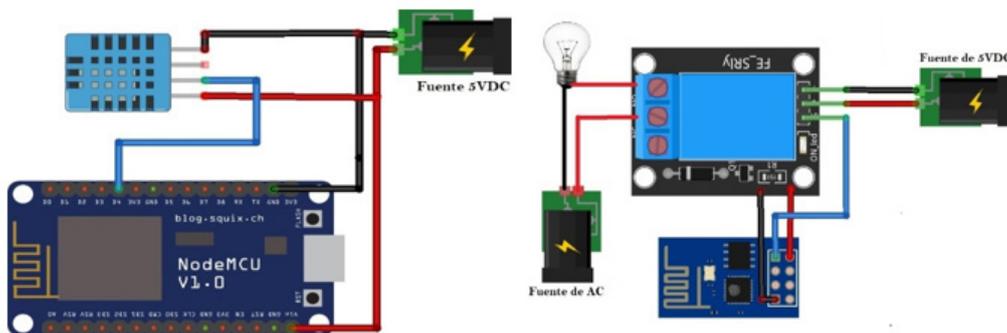


Figura 20. Diagrama de conexión de los dispositivos desarrollados
Fuente: elaboración propia

Mejora y optimización del diseño

Los componentes de hardware de la propuesta implementada bajo el prototipado se evalúan, se optimizan y mejora el diseño cuando se presentan errores, este proceso se ejecuta hasta que el sistema funcione correctamente de acuerdo con los requerimientos de interoperabilidad especificados. Esta fase es medular para comprobar el funcionamiento, rendimiento y sobre todo detectar posibles errores en las fases anteriores de la implementación y poder solventarlos oportunamente. Es decir, en la etapa de prototipado se utilizan

diferentes actuadores como reemplazo de los equipos de hogar, con el objetivo de emular el funcionamiento de las salidas del sistema de control. Después de cambiar el firmware a las tarjetas NodeMCU y Esp8266, compilar los códigos de programación y configurar la agregación de los dispositivos al servidor, se utilizan los actuadores como bombilla, tiras led, interruptor, tomacorriente, Alexa, Google Home, ventilador, módulos relés y circuito integrado L293D para las pruebas reales del sistema, como se muestra en la *Figura 21*.

Las conexiones realizadas a cada uno de los nodos del hogar se verifican mediante el uso del multímetro, se aísla cada una de las conexiones con cinta para evitar corto circuito. En esta etapa se comprueba y evalúa el sistema, se demuestra que los actuadores NodeMCU, Esp8266, sensor y asistentes virtuales están funcionando correctamente de forma eficaz a lo planteado.



Figura 21. Prototipo de la arquitectura propuesta
Fuente: elaboración propia

RESULTADOS

Este apartado presenta los resultados de funcionalidad de la arquitectura propuesta e implementada. Con el servidor implementado se logra la centralización e interoperabilidad de dispositivos, el sistema controla y monitorea con éxito los actuadores (luces, interruptores, tomacorrientes, ventilador, entre otros), así mismo, capta las señales ambientales (temperatura y humedad), y se presentan las actualizaciones en las interfaces de usuario (aplicación móvil e interfaz web), además, con los asistentes virtuales (Alexa y Google Home) y el uso de comandos de voz se brinda mayor comodidad en el control de hogar. Con la integración del Internet de las Cosas (IoT) a la arquitectura, los usuarios pueden monitorear y controlar su hogar en tiempo real desde cualquier lugar con acceso a Internet.

El aporte significativo del estudio es la agregación de múltiples dispositivos al sistema, ofrecer mejor interacción con el hogar a través de comandos de voz, facilitar las interacciones con múltiples usuarios y mejorar significativamente el entorno de hogar en cuanto a confort.

Los resultados experimentales de las pruebas de interfaz de usuario se muestran a continuación; en la *Figura 22* se observa la distribución de los objetos en el plano, como los dispositivos están distribuidos e integrados en el hogar, tomando en cuenta que es una analogía, la arquitectura se adapta a variedad de

objetos adicionales para completar un sistema de hogar. En la *Figura 23* se muestra la interfaz web del servidor, los usuarios pueden acceder a ella a través de la IP y las credenciales, usuario y contraseñas, con ello, podrán monitorear y controlar cualquier dispositivo, de igual forma a través de la aplicación móvil como se presenta en la *Figura 24*. Considerando las características del diseño de la arquitectura, los usuarios pueden obtener la información actualizada de los actuadores y sensores desde cualquier plataforma y poder encender/apagar los sistemas propuestos.



Figura 22. Plano de distribución de los dispositivos
Fuente: elaboración propia

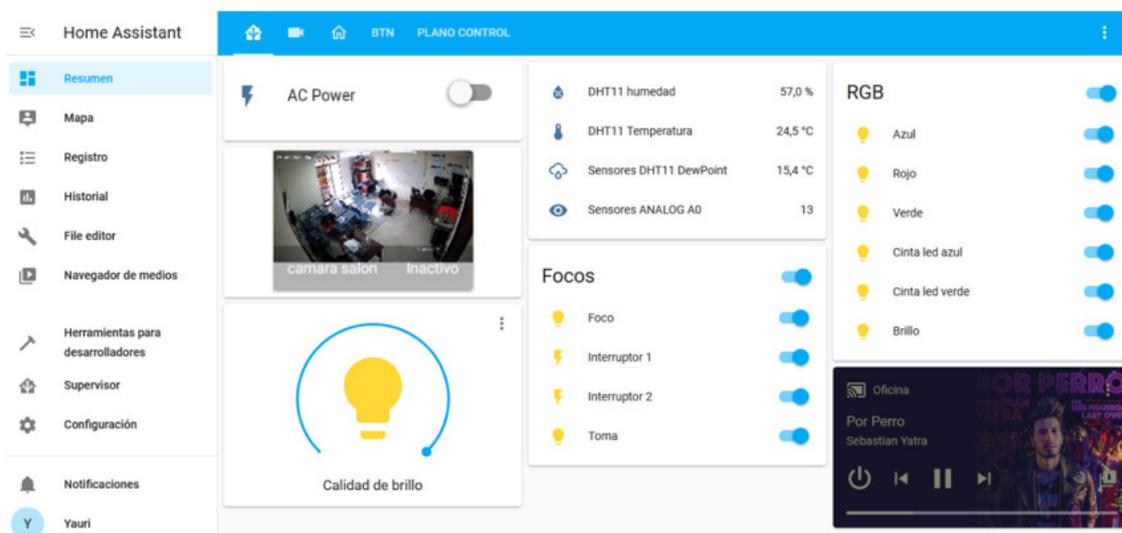


Figura 23. Interfaz web del servidor
Fuente: elaboración propia

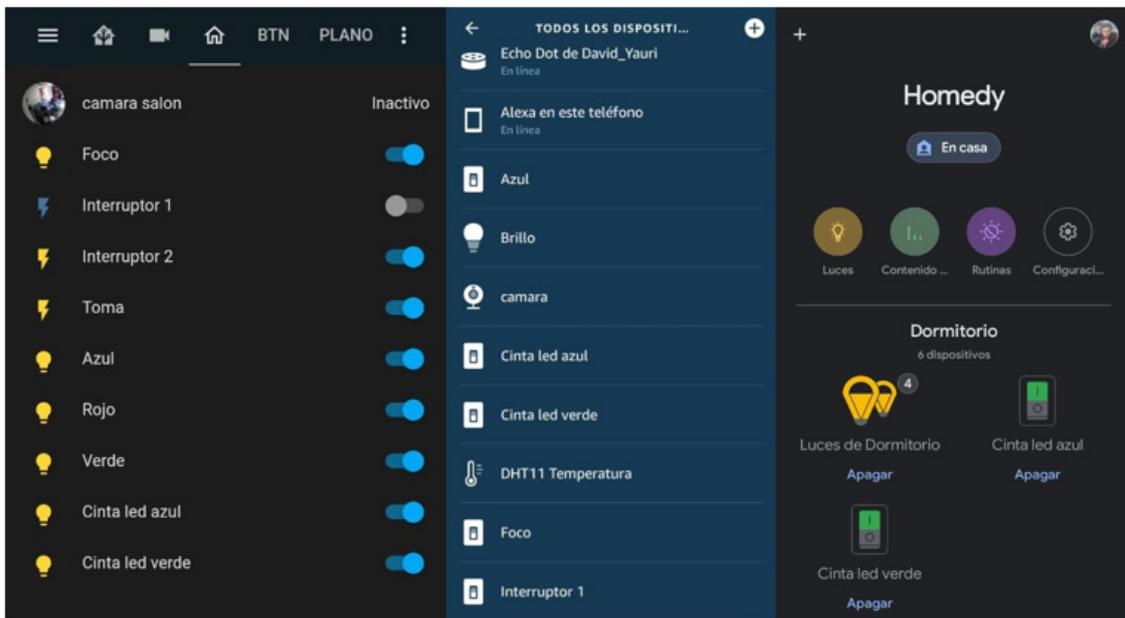


Figura 24. Interfaz móvil
Fuente: elaboración propia

Los datos obtenidos del sensor se emplean para mejorar la seguridad ambiental del hogar, se crean alarmas en el servidor para definir un rango de temperatura (20°C - 25°C), si el sensor envía datos fuera del rango superior, el servidor envía una notificación al sistema para activar el ventilador, así mismo, una notificación a los usuarios que podrán constatar a través de la cámara el evento sucedido oportunamente. Adicional, el sistema de videovigilancia permite monitorear el hogar, con el fin de resguardar la integridad de los miembros familiares y sus pertenencias. Con la propuesta se demuestra que se puede lograr integrar cualquier modelo de cámara que se maneje bajo protocolo IP.

La eficacia del sistema propuesto se valida evaluando las funcionalidades en el prototipo implementado. Durante la fase de pruebas, una de las problemáticas encontradas fue la lectura y actualización de los actuadores y sensores, que provocó que la conmutación de los actuadores se retrase un tiempo estimado de 12ms en entorno local y remotamente un tiempo de 760ms, se resolvió este problema mejorando la velocidad de conexión del servidor a Internet de 5Mbps a 20Mbps, así mismo, se cambió la conexión del servidor al router de un acceso WiFi a uno cableado, dando como resultado un tiempo de repuesta de 7ms en entorno local y de 62ms desde un entorno remoto.

El uso de las tarjetas NodeMCU y Esp8266 funcionaron correctamente con el nuevo firmware cargado, se evidenció la funcionalidad de acuerdo con Tasmota y su integración en el servidor mediante la configuración del protocolo MQTT, como resultado se puede emular dispositivos domóticos comerciales viables a bajo costo, reduciendo un promedio del 50% del costo de los dispositivos comerciales, se pueden constatar los costos en la *Tabla 3*. Con el sistema de control implementado, se procede a las pruebas de potencia, tomando en cuenta que los dispositivos relés manejan cargas no mayores a 10A. Con este dato referencial se puede controlar los electrodomésticos tales como: televisor, equipo de audio, luminarias, sistema eléctrico de cocina, puertas de garaje, controles de acceso, alarmas, sensores, entre otros.

Tabla 3.
Comparativa de costos

Dispositivo Desarrollado	Costo	Dispositivo Comercial	Costo
Control de luminaria	\$10.00	Boquilla inteligente WiFi sonoff RF	\$20.00
Dispositivo de sensado de temperatura y humedad	\$10.00	Sonoff switch compatible con sensor de temperatura y humedad	\$19.00
Control luminosidad	\$20.00	Interruptor dimmer sonoff con control RF.	\$50.00

Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

Esta investigación presenta un modelo de arquitectura viable para la automatización de hogar basado en Internet de las Cosas. El sistema propuesto es de bajo costo, debido a la emulación de dispositivos domóticos comerciales a través de tarjetas basadas en el chip Esp8266 y el uso de software libre para la implementación del servidor. La propuesta se puede replicar con facilidad en un entorno real, permite el monitoreo de las variables climatológicas (temperatura y humedad), actualización de estados de los dispositivos y control de conmutación de los electrodomésticos. El modelo de arquitectura es escalable, permite alojar diversidad de dispositivos, se comporta como un sistema heterogéneo e interoperable, cuenta con la característica de centralizar diferentes servicios y aplicaciones que se ejecuten sobre un mismo entorno, brinda al cliente final una interfaz de usuario en diferentes plataformas (aplicación móvil e interfaz web) fáciles de usar y controlar desde cualquier lugar con acceso a Internet. Los comandos de voz, a través de los asistentes virtuales (Alexa y *Google Home*), facilitan la comunicación con el hogar y mejoran la movilidad del sistema.

Los resultados del estudio son prometedores, el sistema cuenta con seguridad a través de videovigilancia, inteligencia, control energético y confort para el usuario. Como trabajo futuro se puede implementar mayor cantidad de sensores para la recolección de datos y la toma de decisiones precisas a través del uso de técnicas de inteligencia artificial, así mismo, se puede modificar la etapa de potencia por un relé de estado sólido para controlar cargas superiores y reducir tiempos de conmutación.

REFERENCIAS

- Bejarano, A., Fernandez, B., Jimeno, M., Salazar, A., & Wightman, P. (2016). Towards the evolution of smart home environments: A survey. *International Journal of Automation and Smart Technology*, 6(3), 105-136.
- Calvopiña, A., Tapia, F., & Tello-Oquendo, L. (2020). Uso del asistente virtual Alexa como herramienta de interacción para el monitoreo de clima en hogares inteligentes por medio de Raspberry Pi y DarkSky API. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (36), 102-115. <https://doi.org/10.17013/risti.36.102-115>
- Chayapathy, V., Anitha, G. S., & Sharath, B. (2017, August). IOT based home automation by using personal assistant. In *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)* (pp. 385-389). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SmartTechCon.2017.8358401>
- Ghayvat, H., Liu, J., Mukhopadhyay, S. C., & Gui, X. (2015). Wellness sensor networks: A proposal and implementation for smart home for assisted living. *IEEE Sensors Journal*, 15(12), 7341-7348. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2475626>
- Heartfield, R., Loukas, G., Budimir, S., Bezemskij, A., Fontaine, J. R., Filippoupolitis, A., & Roesch, E. (2018). A taxonomy of cyber-physical threats and impact in the smart home. *Computers & Security*, 78, 398-428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cose.2018.07.011>
- Ibrahim, M., Elgamri, A., Babiker, S., & Mohamed, A. (2015). Internet of things based smart environmental monitoring using the Raspberry-Pi computer. In *2015 Fifth International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC)* (pp. 159-164). IEEE. <https://doi.org/10.1109 / IC-DIPC.2015.7323023>
- Joo, I. Y., & Choi, D. H. (2017). Distributed optimization framework for energy management of multiple smart homes with distributed energy resources. *Ieee Access*, 5, 15551-15560. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2734911>
- Khalid, R., Javaid, N., Rahim, M. H., Aslam, S., & Sher, A. (2019). Fuzzy energy management controller and scheduler for smart homes. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 21, 103-118. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.suscom.2018.11.010>
- Mattoo, A., & Kumar, S. (2019). Mattoo, A., & Kumar, S. (2019). 'Internet of Things: A progressive case study. *Handbook of IoT and Big Data*, 251-273. <https://doi.org/10.1201/9780429053290-12>
- Rafferty, J., Nugent, C. D., Liu, J., & Chen, L. (2017). From activity recognition to intention recognition for assisted living within smart homes. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 47(3), 368-379. <https://doi.org/10.1109/THMS.2016.2641388>
- Raspberry. (2019). Hardware Raspberry Pi. <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/README.md>

- Sooraj, S. K., Sundaravel, E., Shreesh, B., & Sireesha, K. (2020, September). IoT Smart Home Assistant for Physically Challenged and Elderly People. In *2020 International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)* (pp. 809-814). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOSEC49089.2020.9215389>
- Vujović, V., & Maksimović, M. (2015). Raspberry Pi as a Sensor Web node for home automation. *Computers & Electrical Engineering*, *44*, 153-171. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2015.01.019>
- Yared, R., & Abulrazak, B. (2017). Adaptable context-aware cooking-safe system. *IEEE Transactions on Services Computing*, *11*(2), 236-248. <https://doi.org/10.1109/TSC.2017.2662941>

SISTEMA DE SEGUIMIENTO DE REQUERIMIENTOS, EVENTOS E INCIDENTES PARA LOS CLIENTES DE LA EMPRESA TELCONET S.A EN LA CIUDAD DE QUITO

SYSTEM FOR TRACKING REQUIREMENTS, EVENTS AND INCIDENTS FOR CUSTOMERS
OF TELCONET S.A. IN THE CITY OF QUITO

Santiago Quilachamín Simbaña

TELCONET S.A., Ecuador

squilachamin@telconet.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6711-0197>

Fidel Parra Balza

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

fparra@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2283-4551>

Juan Chimarro Amaguaña

Instituto Superior Tecnológico Nelson Torres, Ecuador

juan.chimarro@intsuperior.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-9454-8357>

Maryorie Urdaneta Herrera

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

murdaneta@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-8773-5349>

RESUMEN

En la actualidad, las empresas se encuentran sumergidas en mercados globales cada vez más competitivos, donde todas esperan tener éxito para mantenerse operativas. La Empresa TELCONET presta diferentes servicios de soluciones de conectividad, Internet, centro de datos, entre otros. Como toda empresa de servicio, necesita conocer el estado y la disponibilidad de los mismos. Es por eso que se desarrolló este proyecto, con el propósito de diseñar una plataforma que permite dar seguimiento de los requerimientos, eventos e incidentes de los productos que tienen los clientes de la empresa situada en la ciudad de Quito. Se utilizó el enfoque cuantitativo para validar la funcionalidad de la plataforma, revisando características que permitan un mejor y ágil uso por parte del cliente. También se usó la ISO SGCI para garantizar la calidad del servicio, ISO SGSI para resguardar la información del cliente y prevalecer la confidencialidad del acceso y sus servicios, ITIL V4 para abarcar la responsabilidad del gobierno de TI y sus haberes, y SCRUM para el desarrollo de las etapas de todo el proyecto. Al ver la plataforma, se comparó con otras similares, pero ninguna se adapta, por tanto, se consideró desarrollar una propia donde tanto la empresa, como los clientes, tengan a su disposición, y en tiempo real, conocimiento del estado de sus servicios y su disponibilidad, aumentando la confianza del cliente en los servicios contratados.

PALABRAS CLAVE

Requerimientos, eventos, incidentes, plataforma, SLA

ABSTRACT

At present, companies are immersed in increasingly competitive global markets, where they all expect to be successful in order to remain operational. TELCONET provides different services of connectivity solutions, Internet, data center, among others. As any service company, it needs to know the status and availability of these services. That is why this project was developed, with the purpose of designing a platform that allows to track the requirements, events and incidents of the products that have customers of the company located in the city of Quito. The quantitative approach was used to validate the functionality of the platform, reviewing features that allow a better and agile use by the customer. ISO SGCI was also used to guarantee the quality of the service, ISO SGSI to safeguard the client's information and prevail the confidentiality of the access and its services, ITIL V4 to cover the responsibility of the IT governance and its assets, SCRUM for the development of the stages of the whole project. When looking at the platform, it was compared with other similar ones, but none of them fit, therefore, it was considered to develop its own platform where the company and customers have at their disposal in real time knowledge of the status of their services and their availability, increasing customer confidence in the contracted services.

KEYWORDS

Requirements, events, incidents, platform, SLA

INTRODUCCIÓN

A medida que el modelo de alojamiento en la nube va creciendo, la conectividad se hace más importante, y disponer de soluciones de conectividad, Internet, centro de datos que garanticen seguridad, disponibilidad y rapidez es un aspecto básico para el rendimiento y la productividad de cualquier negocio.

Las prácticas y los sistemas de información que hacen uso de información personal se rigen por las leyes y reglamentos para evitar el uso y la divulgación a no autorizados. El incumplimiento de estas leyes y regulaciones da lugar a enormes sanciones monetarias, que tanto las empresas privadas, como las administraciones públicas, desean evitar. Para cumplir con estas leyes, se requiere comprender la privacidad impuesta a los sistemas de información. Un enfoque holístico para la especificación de privacidad exige comprender no solo los derivados de la ley, sino también las necesidades de los ciudadanos con respecto a la privacidad (Gharib et al., 2016).

Como parte de los servicios inmersos prestados a los clientes, la forma de organizar la infraestructura de TI ahora se inclina cada vez más hacia la computación en la nube, lo que ha desencadenado el crecimiento del mercado de tecnología en la nube (Zharikov et al., 2018).

Cualquier empresa puede ajustar de manera flexible la cantidad de recursos consumidos según sus necesidades, utilizando recursos en la nube. Para los proveedores de la nube, el desafío es crear y actualizar Centros de Procesamiento de Datos (DPC) modernos, así como el mantenimiento y la asignación eficiente de recursos. Los principales indicadores que caracterizan los recursos en la nube son: la flexibilidad del modelo de servicio, calidad de servicio y tolerancia a fallos. En consecuencia, los aspectos más importantes en el trabajo del DPC son la carga de recursos, el consumo de energía y la complejidad de la gestión.

La Empresa TELCONET S.A es una portadora dedicada a ofrecer servicios de acceso a Internet y transmisión de datos que se encuentra en un proceso de migración de su red Gigabit Ethernet con tecnología *Internet Protocol* (IP) a su red diseñada que está siendo instalada con tecnología *Multi- Protocol Label Switching* (MPLS). El *backbone* de TELCONET S.A. es una red diseñada bajo el modelo jerárquico de tres capas (core, distribución y acceso), constituida por un conjunto de equipos de conmutación y enrutamiento.

El acuerdo de nivel de servicio es un contrato accesorio que permite regular el «incumplimiento tolerado» de algunas obligaciones asumidas por el proveedor en el contrato principal, que generalmente es un contrato de locación de servicios. En el SLA se entiende que estos incumplimientos no serán considerados “graves”, a los fines del contrato principal, y, por lo tanto, no habilitarán la rescisión o resolución del contrato, sino sólo la aplicación de una penalidad contractual, prevista también en el SLA.

Habitualmente, esta penalidad contractual consiste en una parte del precio pagado al proveedor del servicio. El origen histórico del SLA está vinculado con el negocio de las telecomunicaciones, pero en la actualidad se aplica prácticamente a cualquier servicio relacionado con la tecnología. Incluso, se utiliza frecuentemente para delimitar la responsabilidad del desarrollador de software, como accesorio al contrato de licencia. Los clientes cuentan con un acuerdo de servicio de disponibilidad SLA, en el cual contempla que los servicios de los clientes deben estar disponibles y accesibles, para conocer el estado de los mismos. Se identificó la necesidad que tener un sistema o plataforma de gestión, el cual permita llevar un registro y seguimiento (Veltani, 2014).

Cabe mencionar que las empresas no contaban con una plataforma de gestión que les permita ver el estado de sus servicios, reclamos y seguimiento de incidentes, en consecuencia, era imposible monitorear

el acceso a sus servicios contratados, tales como, Internet, datos, equipos, comunicaciones, etc. Debido a la necesidad, ahora existen varias empresas y aplicativos que permiten esta interacción entre el cliente y sus servicios. La gran mayoría de estas enfocadas a *help desk*, entre ellos se tienen los siguientes, *freshdesk*, *freshservice*, *Osticket*, entre otros.

Las mismas que permiten al cliente descargarse una versión gratuita entre 15 a 21 días, para posteriormente realizar la compra, que tiene un costo aproximado, partiendo desde la versión más básica, de 15 dólares y 109 dólares americanos.

El problema se debe a que los clientes de la Empresa TELCONET cuentan con varios servicios como Internet, datos o alquiler espacio, entre otros, a los cuales no tiene acceso para conocer el estado de disponibilidad y el seguimiento en caso de presentarse un problema.

Para solventar dicha situación, se realizó este proyecto donde se plantearon los aspectos prácticos y experimentales para cumplir con el propósito de desarrollar un sistema de seguimiento de requerimiento, eventos e incidente para los clientes de la empresa TELCONET S.A en la ciudad de Quito.

METODOLOGÍA

La investigación se realizó bajo el enfoque cuantitativo y con un diseño experimental, destacando que un experimento consiste en hacer un cambio en el valor de una variable (variable independiente) y observar su efecto en otra variable (variable dependiente) (Hernández Sampieri et al., 2014). En esta investigación se llevaron a cabo ciertas condiciones rigurosamente controladas, para determinar las causas por la que se produce una o varias situaciones o acontecimientos en particular.

Con base a lo antes mencionado, al realizar el estudio se determina la necesidad de los clientes de la Empresa TELCONET de la ciudad de Quito, para tener conocimiento del seguimiento de requerimientos, eventos e incidentes sobre los servicios contratados de los cuales disponen de manera más puntual. Así, en caso que uno de sus servicios tenga afectación o tengan problemas, puedan tener una retroalimentación más oportuna y saber el estado de gestión en el que se encuentra.

Cabe mencionar que “la estrategia de servicio en ITIL se encamina hacia el mismo sentido que la estrategia empresarial, pero ahora incluyendo en ésta la componente TI. Integra, pues a sus análisis nuevos objetivos y la evolución futura de las TI en la organización” (Huércano, 2018). ITIL busca alinear e integrar la tecnología con el negocio que los servicios tecnológicos implementan y se ofertan desde los departamentos de TI estén diseñados para apoyar al negocio.

Partiendo de lo indicado, el seguimiento que hacen los clientes del estado de sus servicios abarca el ámbito de estrategia de negocios de la empresa de forma global, y hacia cada una de las empresas que forman parte de su estructura. Así, de esa manera, se podrá brindar un mejor servicio y una mejora en la estrategia del negocio.

La investigación se enmarcó en el paradigma positivista cuantitativo, el cual busca la generalización y objetivación de los resultados a través de una muestra, para hacer inferencia a una población de la cual toda muestra procede (Sampieri, 2018).

Según los lineamientos de este paradigma, se obtuvo la información del cómo se debe presentar la interacción entre el usuario o cliente y la plataforma de requerimientos, eventos e incidentes. Adicional, se

adquirieron los datos, mismos que fueron agrupados luego de obtener una gran cantidad de información, la cual es modelada con el fin de que se presenten estadísticos de los requerimientos, eventos e incidente que manifiesten de manera real.

Se contó con una población de 102 clientes entre internos y externos, que proveen servicios en la ciudad de Quito. De aquí se obtuvo la muestra de estudio. De esta se obtuvo la información para el desarrollo del estudio y sobre la cual se efectúan la medición y la observación de las variables estudiadas (Sampieri, 2018). Así también, se seleccionó una muestra intencional, no probabilística, es decir, que se permiten seleccionar casos característicos de una población limitando la muestra sólo a estos casos. Se utiliza en escenarios donde la población es muy variable y consiguientemente la muestra es muy pequeña y de fácil acceso (Otzen & Manterola, 2017). En ese sentido, la muestra se limitó a 5 clientes internos y 34 clientes externos, dentro de los clientes internos se seleccionó: IPCCL2, *Networking*, OTN, IPCCL1 y TI que proveen servicio la empresa TELCONET S.A en la ciudad de Quito.

Con relación a los clientes externos, se consideraron: Bpacífico, Datafast, BIESS, CAPTEC, Datafast, Cedia, Kubiec, Cedia. Datafast, Google, Akamay, Biess, Hospital de los Valles, Hospital Metropolitano, Banco de Guayaquil. Kubiec, ENAE, Ayasa, Security Data, Transesmeraldas, Cajamarca y Banco Pichincha.

A su vez, se trabajó con las metodologías según ITIL, COBIT V5, experimental y con la metodología Scrum, la cual se describe con las siguientes 6 fases: inicial, definición, ejecución, entrega, soporte y mantenimiento, cierre del proyecto teóricamente (Castelo Martínez, 2019). A continuación, se detallan cada una de ellas.

Fase I: inicial

Los clientes de la empresa TELCONET de la ciudad de Quito tienen la necesidad de acceder al estado del seguimiento de sus servicios, tales como Internet, si están o no disponibles, qué cantidad de datos está utilizando al momento, qué cantidad de información se encuentran transmitiendo, y a qué ancho de banda, tanto de subida, como de bajada, renta de espacio físico, de igual manera saber si sus equipos están activos tanto físicamente, como lógicamente.

SLA de la empresa TELCONET

La empresa caso de estudio brinda varios servicios, dentro de los cuales tenemos servicios de comunicaciones, seguridad, datos, Internet y el monitoreo de sus servicios, tanto en la capa física como en la de virtualización. El SLA se muestra en el punto resumen de disponibilidad vs incidentes, eventos y requerimiento en los servicios que se entregan al cliente. La disponibilidad del servicio es calculada a través de la fórmula (1), previamente aceptada en el SLA:

$$D = ((TD*TM) / TT) * 100 [\%] \quad (1)$$

Dónde:

D (%) = disponibilidad mensual del servicio o componente, expresado como un porcentaje.

TD (horas) = tiempo que el servicio estuvo disponible en horas durante el mes.

TT (horas) = tiempo total de horas en un mes.

Este valor es fijo y dependiendo del mes será igual a: 24 horas a días del mes, durante al año.

TM (horas) = tiempo en mantenimiento, tiempo que el servicio o componente estuvo fuera de servicio debido a mantenimientos preventivos planificados por TELCONET y previamente aceptados por el CLIENTE; o a cualquiera de los motivos que se consideran como causas de fuerza mayor.

- Definición de requerimiento

Una solicitud de servicio involucra uno que ha sido pre aprobado y que una organización puede ofrecer a los usuarios finales. Se puede construir un catálogo de servicios que incluya variables de información que puedan ser recolectadas de los usuarios, y de los procesos que incluyan distintas tareas, para así enviarlas a otros grupos dentro de la compañía. Un catálogo de servicios significará un ahorro de tiempo con la recolección de datos y las tareas automatizadas (Maldonado, 2017).

- Definición de evento

Un evento es un hecho detectable por una herramienta que interviene en el sistema de información y que tiene un significado para la gestión de la infraestructura o para el suministro de los servicios. Por ejemplo, cuando llega a la oficina cada mañana, enciende su ordenador y abre su programa de mensajería electrónica, lo que va a generar un evento.

En el servidor de mensajería se registra una notificación de apertura de su buzón de mensajes en la traza del servidor de mensajería. Esta traza representa la lista de eventos producidos en el servicio de mensajería, por la tarde se registrará otro evento cuando se cierra su buzón de mensajes y apaga su ordenador. Se registra otro mensaje en la traza del servidor de mensajería (ISACA, 2012).

Existen tres tipos de eventos:

- Información: es para comunicar sobre el funcionamiento normal (inicio o fin de actividad). El ejemplo más claro es el buzón de mensajes, el final de algún trabajo en segundo plato.
 - Advertencia: este evento no es habitual, como por ejemplo un pico de actividad, en este caso se informa sobre una situación particular que se detecta cuando se supera un umbral.
 - Excepción: Este evento es una advertencia que informa una situación crítica que necesita una acción apropiada para evitar que esta situación se transforme en un incidente.
- Diagrama de flujo del proceso de gestión de eventos

El diagrama de flujo presentado en la *Figura 1* muestra las principales actividades del proceso de gestión de evento de manera muy resumida.

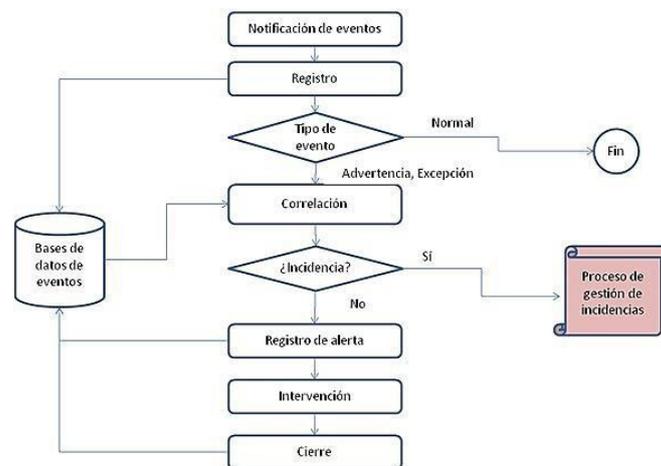


Figura 1. Diagrama de flujo del proceso de gestión de eventos
Fuente: elaboración propia

En la gráfica se muestra su relación con el proceso de gestión de incidentes. La base de datos de los eventos que se indica en el diagrama de flujo es una representación genérica de esta base de datos. De hecho, de manera operativa, los eventos normales se almacenan en un archivo de tipo traza. Por el contrario, las alertas o alarmas se deberían almacenar en una base de datos dedicada.

- Actividades del proceso de gestión de eventos
 - Notificación del evento: permite identificar un evento y desencadenar una notificación. Esta actividad está totalmente automatizada porque las notificaciones son responsabilidad de las herramientas de supervisión, explotación o control.
 - Registro: actividad que va a permitir almacenar la notificación del evento en un archivo de tipo traza. Se almacena, como mínimo, la fecha y hora, además de la identificación del o de los componentes afectados, el lugar, etc. Esta actividad está totalmente automatizada y se tiene en cuenta por las herramientas de supervisión, explotación o control.
 - Análisis del tipo de evento: actividad que permite, según el tipo de evento, tomar las acciones para tenerlo en cuenta (advertencia o excepción). Ver *Figura 1*.
- Definición de incidente

Antes de estudiar el proceso de gestión de incidentes, es importante entender la noción de incidente y, especialmente, no confundirlo con evento, ni con problema. Como recordatorio, un evento es un hecho detectable que ocurre en la infraestructura del sistema de información; un incidente es un evento que altera o degrada el servicio que se ofrece al usuario. Se dice que un incidente aparece cuando el servicio se detiene o la calidad del servicio se altera (ISACA, 2012).

Algunos ejemplos de incidentes son: la pantalla del PC no se enciende, una aplicación de negocio se bloquea, una transacción en un servidor remoto que dura una media de entre 2 y 3 segundos, no responde después de 10 segundos, la impresora no funciona u otros.

- Estado de servicios

Un servicio tiene tres estados posibles:

- **Nominal:** el servicio funciona como se ha establecido y diseñado. Por ejemplo, una aplicación funciona en modo compartición de carga en cinco servidores; los cinco servidores están operativos.
 - **Normal (o estándar):** funciona correctamente de acuerdo a los niveles de servicio (SLA). Por ejemplo, una aplicación funciona en modo compartición en cinco servidores, donde uno de ellos ha fallado, pero el rendimiento no se degrada y los usuarios no se dan cuenta.
 - **Degradado:** el servicio funciona como un nivel de calidad inferior al establecido en el acuerdo de nivel de servicio (SLA). Por ejemplo, tres de cinco servidores han fallado, la aplicación es mucho más lenta o limita el número de accesos concurrentes de usuarios. Los usuarios se percatan de este funcionamiento limitado.
- Ticket

Cuando un incidente ocurre, el usuario envía un *ticket*; después, el *service desk* lo recibe y lo procesa de acuerdo al flujo de trabajo establecido. En pocas palabras, el incidente es el evento, mientras que el *ticket* es la documentación del mismo. Se trata del vehículo por donde el service desk es alertado del incidente y el medio para poder responder a él. Las solicitudes de servicio no son tickets. Cabe destacar que los help desk más avanzados han automatizado su sistema para que los usuarios puedan enviar *tickets* o solicitar un servicio a través de una página web (Maldonado, 2017).

- Viabilidad técnica

Se tiene varias tecnologías, lenguajes de programación, bases de datos, aplicaciones, que permiten ser una guía para el modelamiento, más no una regla a seguir, las cuales son mostradas en la *Tabla 1*.

Tabla 1.
Plan de ejecución de tareas

Detalle	Especificación
Lenguajes de programación	Libres / Pagados
Aplicaciones	Cacti / Solaris / HP
Hypervisores	VMware / Hyper V / Ovm / Ovirt / Rhev / Oracle
Seguridades	Bloqueo de puertos / Software
Normas	ISO / Buenas practicas

Fuente: elaboración propia

Fase II: definición

Se define cada una de las actividades involucradas en el proceso, la creación de un diagrama de actividades, y de igual forma se crean planes de ejecución. A continuación, se detallan las actividades a realizar:

- Se realiza una encuesta telefónica a los clientes para saber si tiene conocimiento de sus servicios.
- Se consulta si requieren tener conocimiento del estado de sus solicitudes.
- Se recopila la información proporcionada.
- Se plantea la opción de crear una plataforma que permita interactuar con el cliente.
- Características que debe tener la plataforma.

A continuación, se detallan los planes con sus respectivos tiempos en la *Tabla 2*.

Tabla 2.
Plan de ejecución de tareas

Fechas	Actividades	Observaciones
12-sep-19	Recopilación de la información	Se debe solicitar al cliente como parte de su necesidad
14-sep-19	Inicio del Proyecto	
18-sep-19	Solicitud de software	Se hace el requerimiento a la empresa del software
30-sep-19	Opciones de plataformas	Se analiza cuál es la mejor opción
7-oct-19	Selección de software	BD, SO , Lenguaje de programación
7-oct-19	Análisis de tiempo de mano de obra	Contempla todo el tiempo del proyecto
21-nov-19	Revisión de avances del proyecto	Validación de la plataforma mediante la intención de la misma
30-nov-19	Ejecución de Pruebas y validaciones	Al interno
23-dic-19	Ejecución de Pruebas y validaciones	Con el cliente
12-feb-20	Ejecución de Pruebas y validaciones	Validaciones adicionales
1-ene-20	Entrega del Proyecto	En producción

Fuente: *elaboración propia*

Fase III: ejecución

1. Requisitos de la red

- Servicio de comunicaciones: datos e Internet.
- Ancho de banda recomendado: datos e Internet provisionado por TELCONET entre 5 a 10 MB por cliente, Internet provisionado por proveedor de 2 a 5 MB.
- Trafico UP/Down: mínimo de 500KB a un máximo de 1 a 2 MB o mayores.
- Recurso de la *virtual machine*: memoria, CPU. Disco, tarjeta de red
- Base de datos
- Seguridades

2. Virtualización

Se utiliza el Hypervisor de VMware para poder ingresar a las VMs del servidor como la base de datos. Se debe tener en cuenta que el acceso dentro las instalaciones, para manipulación y soporte de las VMs y al aplicativo, en caso se porte de gestión, es mediante la VPN con acceso restringido.

3. Provisión de recursos virtuales

Con base en las necesidades que se tiene, y la proyección de gestión de los clientes, se tiene un aproximado de recursos de la máquina virtual que se deben utilizar, las recomendaciones son:

- CPU de 8 VCPU, memoria RAM de 32 GB, disco sólido de 800 TB.
- Por temas de seguridad y disponibilidad se replica la VM
 - VM Base de Datos: Mysql
 - VM Servidor: Sistema Operativo Centos, Apache
- Lenguajes de programación
 - PHP y Javascript

4. Seguridades

Se tomaron ciertas acciones para prevenir algún tipo de ataque o ingreso no permitido.

- Certificado de seguridad SSL para el https:// de la página web.
- Se bloquearán los puertos 443 por temas de certificado, 3306 para la base de datos y el puerto 22 ssh para la conexión por consola.
- Se accede a la red de la empresa mediante VPN.

5. Disponibilidad de la plataforma

Debido a que se tendrá redundancia en la plataforma que se brinda al cliente, se utilizará la topología estrella. Las VMs, en caso que presenten problemas, van a migrar en tiempo real hacia la VM de *backup*, así, de esta forma, no sentir la migración de la VM, ya que se hace en tiempo real y el acceso en forma remota (ver *Figura 2*).

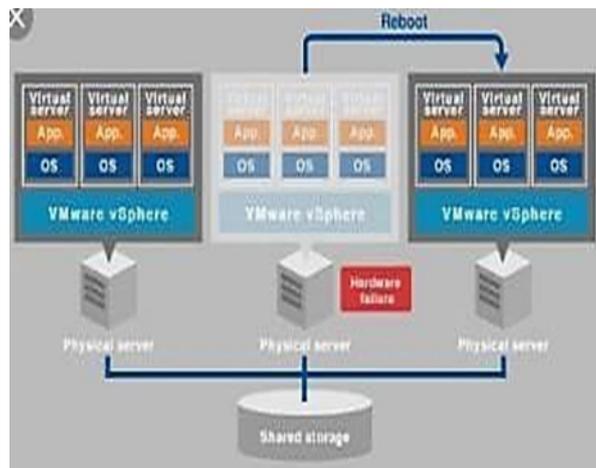


Figura 2. Redundancia de VM
Fuente: VMware (2018)

Fase IV: entrega

De manera oportuna, y con las pruebas realizadas por el cliente y aceptando que el proyecto está correctamente funcionando, se hace la entrega al cliente. A continuación, se evidencia la plataforma como se muestra ante el cliente (Figura 3 y Figura 4).

#	ID	Fase	Tarea	Fecha	Acc.
Soporte					
2610		FASE II	27490478	2020,02,20 18:45:50	→
2609		FASE II	27527582	2020,02,20 18:30:00	→

Figura 3. Plataforma vista 1 según Interface dueño TELCONET
Fuente: elaboración propia

2609 - Telcograf - https://telcograf.telconet.ec/thoyj3k0bnstex

Responsable: Boc
 Empresa: INSTITUTO SUPERIOR TECNOLOGICO ARGOS
 Login: argos-sinthomasmore
 Producto:
 Solicitante: BARBARA XIMENA BARRAGAN LASLUSA
 Fase: FASE II
 Sistema: Sistema A & B
 Sistema de Facilidades: Red Data center
 Storage / Computo / Red / Networking: WEBHOSTING-IN
 Equipo: Telcograf - https://telcograf.telconet.ec/thoyj3k0bnstex
 Ip Equipo:
 Tipo de Tarea: Requerimiento
 Tipo de Solicitud: Soporte
 Status Cliente: Ejecución

Asignación de Tarea # 27527582

Área	Responsable	Fecha	Status	SysCloud
Boc	SANTIAGO FERNANDO QUILACHAMIN SIMBANA	2020-02-21 10:00:00	Reprogramada	Ejecución

Detalle: de procederá con la revisión -> Actividad asignada para Ejecución -> Data Center Boc -> Fecha -> 2020-02-21 10:00 -> Tarea Reprogramada en Telcos

Seguimientos de Tiempo

# Tarea	Observación
27527582	de procederá con la revisión -> Actividad asignada para Ejecución -> Data Center Boc -> Fecha -> 2020-02-

Figura 4. Plataforma vista 2 según Interface dueño TELCONET
Fuente: elaboración propia

Fase V: soporte y mantenimiento

Se entrega un manual de usuario, el cual detalla el uso de la plataforma y las acciones que se deben tomar al momento de reportar una solicitud. El desarrollo de productos para el soporte, y se envía un manual de usuario, el cual permita tener conocimiento de todas las acciones que permite la plataforma.

Para temas de mantenimiento del aplicativo, se reciben las consultas hechas por la mesa de soporte 24 * 7. Se envía un correo de notificación en el cual se detallan las mejoras al aplicativo, en bien de mejora de sus servicios.

Fase VI: cierre del proyecto

Como parte del cierre se debe enviar documentación que valide el estado y la entrega del proyecto.

RESULTADOS

Entre los resultados obtenidos, se tienen las pruebas realizadas en la plataforma, mismas que se detallan en la *Tabla 3* presentada a continuación. Posteriormente se presentan los resultados de la encuesta realizada para determinar la calidad del servicio.

Tabla 3.
Detalle de resultados de interacción con la plataforma

Aplicar	Resultado	Observación
Ingreso a la plataforma	100	
Seguridad de la información que se maneja	100	Depende del cliente
Contenido claro	100	Podría mejorar
Detalles comprensibles	100	Una mejor redacción
Confiabilidad	100	
Seguimiento	100	

Fuente: elaboración propia

De estos resultados evidenciados en la *Tabla 3*, es importante hacer notar que la herramienta permite una fácil interacción entre el cliente y sus servicios; sin embargo, la seguridad de la información que se maneja depende del cliente, el contenido podría ser mejorado, y los detalles comprensibles deben tener una mejor redacción.

Como se utilizaron sistemas operativos libres sin licenciamiento, lenguajes de programación que permiten tener acceso gratuito, los temas de vulnerabilidad y seguridad deben ser más robustos, ya que se maneja información delicada de los servicios que tienen los clientes.

Para determinar la calidad, se detalló un banco de 10 preguntas, mismas que tienen un valor en la escala del 1 a 5, según le otorgue el usuario. La obtención de los resultados *system usability scale "SUS"*, en caso de las preguntas impares, se la hace restando el valor otorgado por el usuario menos 5. Para las preguntas pares, se lo hace restando 5 menos el valor de la pregunta otorgado por el usuario. El resultado se multiplica por 2.5 para obtener el resultado final (ver *Tabla 4*).

Las preguntas que se realizaron de acuerdo al SUS, fueron las siguientes:

- ¿Me gusta usar frecuentemente este software?
- ¿Encuentro que el software es complejo?
- ¿Pienso que es un software de fácil uso?
- ¿Pienso que necesito soporte de algún técnico para manejar el software?
- ¿Encontraré varias funciones en el sistema que fueron muy bien integradas?
- ¿Pienso que hay muchas inconsistencias en el software?
- ¿Imagino que la mayoría de la gente aprenderá a utilizar este sistema rápidamente?
- ¿Me pareció un sistema muy complicado de usar?
- ¿Me siento muy seguro al usar el sistema?
- ¿Necesito aprender bastantes cosas antes de manejar el software?

Tabla 4.
Detalle de preguntas de calidad

No. Preguntas	Usuario 1	Cálculo	Usuario 2	Cálculo	Usuario 3	Cálculo	Usuario 4	Cálculo
1	3	2	3	2	2	3	3	2
2	0	5	1	4	2	3	2	3
3	4	3	4	3	3	2	4	3
4	1	4	2	3	3	2	3	2
5	3	2	4	3	2	1	3	2
6	1	4	1	4	1	4	0	5
7	4	3	5	4	5	4	5	4
8	1	4	1	4	2	3	3	2
9	4	3	4	3	4	3	3	2
10	2	3	0	5	3	2	1	4
SUMA		33		35		27		29
Porcentaje		82,5%		87,5%		67,5%		72,5%

Fuente: elaboración propia

Como se observa en la *Tabla 4*, la mitad de los usuarios encuestados manifestaron que la plataforma está dentro de un rango aceptable, y los demás opinaron que está dentro del rango medianamente aceptable. Tomando en cuenta lo establecido de 0%: nada aceptable, 50%: medianamente aceptable, 75%: aceptable y 100%: muy aceptable. Sin embargo, se muestra un porcentaje de 67,5% que, aunque está en el rango medianamente aceptable, es el más bajo de todos.

Posteriormente se examinaron los beneficios obtenidos por los clientes con esta propuesta, los cuales se detallan a continuación:

- Validación de sus servicios.
- Actualización de sus servicios.
- Uso de sus servicios.
- Interacción con los empleados de la empresa.
- Ayuda continua sobre de sus solicitudes.
- Seguridad de su información.
- Disminuye el tiempo de soporte.
- Varias interacciones entre los empleados.
- Servicio de soporte 24/7.
- Fácil acceso a la plataforma.
- Pronta retroalimentación de sus solicitudes.

Los resultados de este estudio muestran que la seguridad de la información, manejada en la plataforma, depende del cliente; sin embargo, el estándar internacional ISO/IEC 27001, en el control de vulnerabilidades técnicas, establece que se debe obtener información oportuna sobre las vulnerabilidades técnicas de los sistemas de información en uso; se debe evaluar la exposición de la organización ante esas vulnerabilidades; y se deben tomar las medidas apropiadas para tratar el riesgo asociado.

Una solución a esto fue aplicada mediante herramientas que permitieron el escaneo de vulnerabilidades en la plataforma, las cuales fueron de fácil acceso y disponibilidad, estas también pueden ayudar a indagar sobre posibles errores cometidos, disminuyendo la brecha de seguridad y así bajar las tasas de ciberataques (Ovalle Velez, 2019).

Con relación a la calidad, se evidenció un hallazgo calificado como el porcentaje más bajo, de 67,5%, esto puede deberse a varios factores, entre los cuales se destacan la falta de sociabilización hacia una nueva herramienta, o la falta de predisposición al manejo de la misma. Hay que destacar que los clientes, en su mayoría, no son personas que tienen conocimiento técnico, se debería confirmar el grado de conocimiento del cliente con relación a sus servicios mediante charlas, reporte o correos electrónicos. Así mantener la interacción óptima entre el cliente, y el personal técnico de la empresa TELCONET.

CONCLUSIONES

Los fundamentos teóricos y metodológicos incidieron positivamente en el proceso de formulación de requerimientos, eventos e incidentes, porque definieron los requisitos del sistema en la empresa TELCONET de la ciudad de Quito.

Se determinó que al establecer los requerimientos, eventos e incidentes sobre los servicios que tiene el cliente, cubrieron de manera global las necesidades de estos, en tener una mejor gestión de sus solicitudes y en conocer de forma más detallada sus servicios.

La herramienta permite una interacción entre el cliente y sus servicios de forma fácil, así el cliente no tiene que estar llamando a su asesor comercial, revisando su documentación física o digital, lo cual lleva tiempo, y más aún, llamar a la mesa de soporte para hacer consulta sobre su requerimiento, haciendo que esta herramienta forme parte de la vida diaria del cliente.

A su vez, al interactuar directamente con el usuario en línea, y en tiempo real, esto hace que no existan tiempos tardíos en esperar una respuesta por parte de él. Más permite una comunicación inmediata con la cual se puede saber en ese momento las dudas y necesidades que el cliente tiene. Evitando así, interactuar físicamente o movilizándose donde se encuentre, para saber sus solicitudes.

Reconocimientos

Agradecimientos a la Empresa TELCONET, por haber brindado información y sus instalaciones para la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- Castelo Martínez, A. (2019). Estudio e implementación de metodologías en la gestión de Servicios tecnológicos (ITSM) en una PYME real. M.S. Tesis, Dept. Ingeniería Telemática, Univ. Pompeu Fabra, Barcelona, España.
- Gharib, M., Salnitri, M., Paja, E., Giorgini, P., Mouratidis, H., Pavlidis, M., ... & Della Siria, A. (2016). Privacy requirements: findings and lessons learned in developing a privacy platform. In *2016 IEEE 24th International Requirements Engineering Conference* (pp. 256-265). IEEE. <https://doi.org/10.1109/RE.2016.13>
- Hernández Sampieri, R. Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2014). Metodología de la Investigación. Editorial McGraw Hill, 6th ed, pp. 129–133.
- Huércano, S. R. (2018). ITIL v3 Manual íntegro. Línea. Biable Management, Excellence and Innovation, Sevilla, España. pp. 10–16. <https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/planeacion/AdministracionSIG/GSDE01.pdf>
- ISACA. (2012). COBIT 5: Un Marco de Negocio para el Gobierno y la Gestión de las TI de la Empresa. 2018, pp. 15-40, [Online].
- ISO/IEC 27001:2018, Information technology, Security techniques, Information security management systems. <https://www.iso.org/standard/73906.html>
- Maldonado Fernández, W. F. (2017). *Estudio de un modelo de organización para un centro de servicios tecnológicos, caso de estudio Fiscalía General del Estado* (Master's thesis, Quito: UCE).
- Otzen, T., & Manterola, C. (2017). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. *International journal of morphology*, 35(1), 227-232. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037>
- Ovalle Velez, A. K. (2019). Uso de herramientas informáticas para descubrir vulnerabilidades en las redes wifi domésticas. M.S. Tesis, Facultad de Ingeniería, Especialización en Seguridad de la Información, Univ. Católica de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Sampieri, R. H. (2018). Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw Hill México: McGraw-Hill Interamericana, 2018, pp. 123–135.
- Veltani, J.D. (2014). La libertad de expresión en internet frente al derecho marcario -Comentario al fallo autos "Arte Gráfico Editorial Argentino S.A. c/ Castañeda Matías s/ cese de uso de marcas / daños y perjuicios" de la CNCIV Y COMFED. eDial.com. https://www.eldial.com/nuevo/lite-tcd-detalle.asp?id=7645&base=50&id_publicar=&fecha_publicar=23/09/2014&indice=comentario&suple=Propiedad
- VMware. (2018). Disrupting Our Own Shop - How VMware IT Creates Business Value. VMware IT Performance Annual Report 2018. Hillview, Avenue Palo, USA. <https://www.vmware.com/content/dam/digital-marketing/vmware/en/pdf/company/vmw-it-performance-annual-report-2018.pdf>
- Zharikov, A. V., Konstantinova, O. V., & Ternovoy, O. S. (2018). Distribution of Virtual Machines in Cloud Infrastructure with the Account of Various Possibilities of Access to Data Storage Systems. In *2018 Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines* (pp. 1-5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2018.8601456>

ALGORITMO DE VISIÓN ARTIFICIAL APLICADA A ROBOTS COLABORATIVOS PARA EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS

ALGORITMO DE VISIÓN ARTIFICIAL APLICADA A ROBOTS COLABORATIVOS PARA EL PROCESO DE CLASIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTOS

Francisco X. Jurado

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador
fjurado@uisrael.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-8689-0398>

Iveth C. Proaño

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador
caproanio@uisrael.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0925-1060>

Erika S. Escobar

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador
eescobar@uisrael.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-4955-4886>

RESUMEN

En la actualidad, la automatización de los procesos industriales incluyen el empleo de diferentes tecnologías que permiten generar a los diferentes tipos de organizaciones empresariales, ventajas competitivas al optimizar recursos, y mejorar tiempos de producción, en este sentido, el uso de tecnología, y en especial el empleo de robots para desarrollar actividades, donde los procesos pueden ser peligrosos para la salud de los trabajadores, como por ejemplo, en procesos productivos en los que se utilicen productos químicos industriales durante el transporte, clasificación y almacenamiento de diferentes tipos de productos que intervienen en el proceso de producción, suelen emplear diferentes tipos de robots, ya sea para optimizar recursos, o por que las sustancias podrían quemarse, explotar, contaminarse, disolverse o producir reacciones perjudiciales que causen daños a las personas. En este trabajo se presenta el desarrollo del algoritmo de visión artificial aplicado a robots colaborativos que puede ser empleado en diversos procesos de clasificación y distribución de productos, el mismo que podría ser implementado en procesos de producción de medicamentos, elaboración de pinturas y barnices, elaboración de plásticos, entre otros.

PALABRAS CLAVE

Robots, tecnología, colaborativo, algoritmo, automatización

ABSTRACT

Currently, the automation of industrial processes includes the use of different technologies that allow different types of business organizations to generate competitive advantages by optimizing resources and improving production times, in this sense, the use of technology, and especially the use of robots to develop activities where the processes can be hazardous to the health of workers, For example, in production processes in which industrial chemicals are used during transport, classification and storage of different types of products involved in the production process, different types of robots are often used, either to optimize resources, or because the substances could burn, explode, contaminate, dissolve or produce harmful reactions that cause harm to people. This work presents the development of an artificial vision algorithm applied to collaborative robots that can be used in different processes of classification and distribution of products, which could be implemented in production processes of medicines, paint and varnish production, plastics processing, among others.

KEYWORDS

Robots, technology, collaborative, algorithm, automation

INTRODUCCIÓN

El desarrollo y evolución de la tecnología ha permitido la creación de diversas aplicaciones y dispositivos electrónicos, que permiten la ejecución de diversas actividades empleando menos tiempo, en este campo resalta la robótica cooperativa, esta emplea lo que se denomina como un sistema cooperativo, basado en el empleo de robots (Moreno, 2019) cuyo diseño es flexible y adaptable al entorno en el que se los desea emplear, estos robots realizan actividades en conjunto, que les permite cumplir el objetivo planteado, lo que permite que realicen tareas más allá del propósito para el cual fueron desarrollados de forma individual (Illanes, 2018).

Como lo menciona Bermejo (2003), la cooperación permite conseguir objetivos compartidos partiendo de que cada individuo busca obtener resultados con beneficios para ellos mismos, y también para los demás miembros del grupo, esta forma de cooperación permite maximizar el comportamiento de cada individuo y el de los demás miembros, en el contexto de la robótica este comportamiento se establece gracias a determinados mecanismos de cooperación, produciendo un incremento en el rendimiento del conjunto de robots, los mecanismos existentes se basan en las restricciones que imponga el diseñador para que los miembros de la colonia o conjunto de robots puedan completar la tarea definida.

Existen diversas actividades que una colonia de robots puede desarrollar, de entre las cuales se destaca la relacionada con el transporte de diversos productos en un entorno productivo, como por ejemplo, en la fabricación de grandes estructuras en procesos de ensamblaje y mantenimiento, como asistentes de cirugía, entre otras actividades donde las características generan valor en cada tarea que realizan (Pérez Vidal, 2017), en este escenario, también es de gran importancia la percepción del entorno, ya que de esta forma es factible incluir variables relacionadas al empleo de diversos sensores que aportan información que puede, o no, influir en el desenvolvimiento de las actividades de un robot, en este sentido, una técnica muy empleada consiste en el uso de cámaras, las cuales proveen datos a los algoritmos de visión artificial (Garcés, 2017) que permiten incorporar a los sistemas la capacidad de autonomía, cuando en diferentes situaciones pueden tomar determinadas decisiones para continuar con el desarrollo de las actividades programadas.

Actualmente existe una gran variedad de estrategias que permiten controlar un grupo de robots junto a ciertos dispositivos adaptados a ellos, con el propósito de presentar una solución a una problemática determinada, tal es el caso de las denominadas estructuras virtuales, o las aproximaciones que se basan en el comportamiento de maestro – esclavo entre otras, todas en base a sus características de diseño y programación aportan grandes ventajas, es así como en el presente estudio se plantea una opción de sistema cooperativo empleando Python, para el control de las actividades que deberán desarrollar los robots junto al empleo de un algoritmo de visión artificial desarrollado en OpenCV, que permite obtener información del entorno dentro del escenario de pruebas.

Trabajos relacionados

Los sistemas de cooperación entre robots resultan útiles en diversos tipos de aplicaciones, tal es el caso de actividades donde la manipulación y transporte de objetos, que por sus características resultan de difícil al ser humano, por ejemplo, objetos pesados o que pueden afectar a la salud por su composición, en estos escenarios se da cabida a esta clase de sistemas, también está el campo de la búsqueda y rescate, o el de las operaciones de seguridad y sobrevivencia, entre otros, es así que los sistemas cooperativos resultan una alternativa importante para apoyar al desarrollo de las actividades del ser humano, por lo que resulta valioso en esta clase de sistemas la información de su entorno, estos datos aportan a los diferentes tipos de algo-

ritmos e insumos para perfeccionar las instrucciones que permiten completar con éxito tareas, pero sobre todo los objetivos planteados para un sistema.

En el campo de los sistemas multi robot, estos adquieren gran importancia debido a la mejora en el rendimiento de las actividades, en este sentido, se han desarrollado para ser empleados en múltiples escenarios por las mejoras en términos de capacidades superiores que pueden alcanzar si se los compara con la de los robots fabricados para realizar tareas individuales (Roldán-Gómez et. al., 2020), las ventajas que estos sistemas adquieren se dan como lo menciona Roldán et. al. (2016) en la eficacia que adquiere un grupo de robots al asociarse, ya que les permite disponer de más recursos para realizar una actividad en comparación de tener un único robot para desarrollar la misma tarea, también está la diversidad para desarrollar actividades en distintos escenarios que no se podría alcanzar con la mayoría de robots, debido a que estos se los crea para desenvolverse en un único ambiente.

En este campo se han desarrollado varios trabajos que buscan aprovechar las ventajas que se pueden obtener al emplear la robótica cooperativa, donde se destaca el trabajo de Pérez (2016), que presenta la aplicación de algoritmos para el control de dos robots que al cooperar entre ellos pueden desplazar un objeto, para ello emplea una cámara para la adquisición de imágenes a ser procesadas en *Matlab*, para determinar las acciones que deberán cumplir los robots, estas instrucciones las envían por conexión inalámbrica.

Asimismo, se menciona lo propuesto por Solís (2016), cuyo trabajo muestra una simulación de un algoritmo cooperativo para ser empleado por un enjambre de robots que deberán realizar la exploración de una zona escala y enviar la ruta hacia un objeto, este algoritmo permite la organización independiente y descentralizada de cada uno de los miembros, el algoritmo emplea el esquema de huella virtual para tener comunicación entre los miembros, en general emplean feromonas de dos tipos: las repelentes, que permiten avisar al resto de miembros que el camino ya fue explorado y deben seguir otro, mientras que las atrayentes permiten comunicar a los miembros que uno de ellos llegó al objetivo, de esta forma se comunica la ruta a los demás miembros.

En el proyecto de Ávila & Santos (2015) desarrollaron un algoritmo para que puedan interactuar robots para la recolección de objetos flotantes en lagos, embalses, estanques, entre otros lugares, con el fin de proveer una solución práctica para la descontaminación de este tipo de fuentes hídricas.

Por su parte, Díaz (2018) plantea la definición y análisis de diversas estrategias para el control de robots terrestres, con la finalidad de realizar actividades de recolección de recursos "*foraging*" los cuales se encuentran distribuidas en un área determinada, esta actividad consiste en recoger todos los recursos que se encuentran dispersos en zona de búsqueda, esta tarea se basa en el comportamiento que tienen las hormigas cuando recolectan alimento.

Por último, está el estudio de Chanco (2018), que se basa en el empleo de técnicas de visión artificial aplicada al control de prototipos robóticos mediante el desarrollo de un dispositivo que sirva como herramienta para el tratado de la robótica en lo referente a los seguidores de línea, este prototipo permite realizar la simulación de los algoritmos de visión artificial que desarrollen los estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana (Ecuador).

METODOLOGÍA

Para el desarrollo del algoritmo de visión artificial (Lizarazo, 2016), junto con el de control de robots basados en un sistema cooperativo, se empleó un enfoque cuantitativo y cualitativo que permite el inicio del

desarrollo del proyecto con un análisis de la información existente, para tener una base que permita realizar el diseño y la construcción del entorno de pruebas para la aplicación de los algoritmos que forman parte del presente proyecto.

Descripción del sistema

Los elementos que conforman el proyecto desarrollado incluyen el empleo de tres mini robots móviles de configuración diferencial, cuyas dimensiones son de 14 cm x 14 cm, el material empleado para la fabricación del chasis es de acrílico de 3 mm escogido por su alta resistencia, baja conductividad y dureza, como se observa en la *Figura 1*.

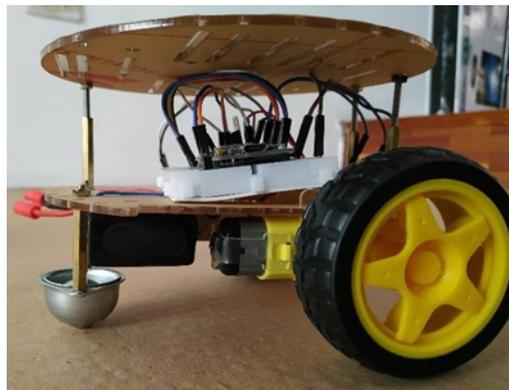


Figura 1. Robot móvil.
Fuente: elaboración propia

Como parte del sistema se consideró el uso de marcas Aruco para la identificación de los elementos como lo son los robots, de los puntos de referencia correspondientes a las posiciones de inicio y fin definidas para las pruebas, adicional, cada mini robot posee un brazo mecánico, este elemento junto con la marca de identificación se los presentan en la *Figura 2*.

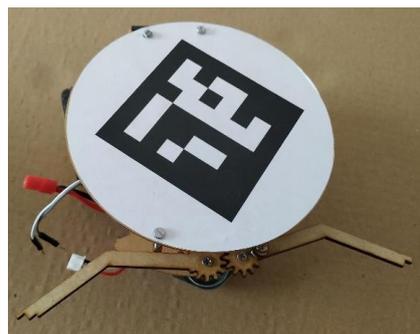


Figura 2. Robot móvil con su marca y brazo electromecánico.
Fuente: elaboración propia

Entorno de pruebas

Adicional a los elementos descritos que permiten la implementación práctica del proyecto, como parte importante se encuentra el entorno de pruebas que lo compone la estructura física con una base de dimensiones de 2.1m x 1.5m, que servirá para simular un ambiente controlado donde se colocaran los mini robots y elementos que se desean transportar, en este ambiente se obtendrán los datos que serán proporcionados al algoritmo de visión artificial utilizado, para ello se utiliza una cámara cenital que emplea el protocolo IP

para el envío de las imágenes, esta se la colocará en un mástil que permite la variación de la altura desde 1.4m hasta 2m, con el objetivo de poder desarrollar diversas pruebas de funcionamiento, como se puede observar en la *Figura 3*.



Figura 3. Ubicación de la cámara cenital.
Fuente: elaboración propia

Estructura del sistema cooperativo

El sistema cooperativo estará compuesto por tres mini robots, los cuales se comunicarán inalámbricamente por medio del empleo de la tarjeta NodeMCU a la estación central, a esta también se conecta la cámara IP con el objetivo de proporcionar la información necesaria del entorno, este esquema de funcionamiento se le puede evidenciar en la *Figura 4*, generando un sistema centralizado desde donde se proporcionarán las instrucciones a los mini robots para el traslado de los objetos sin producir colisiones entre ellos.

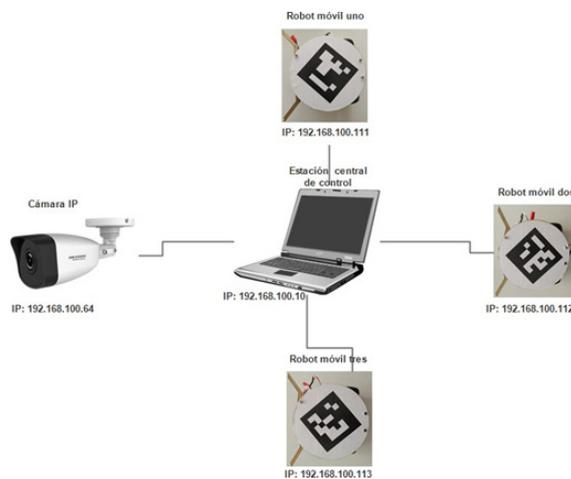


Figura 4. Arquitectura general de control del sistema.
Fuente: elaboración propia

Desarrollo del algoritmo

El algoritmo planteado, en primera instancia, requiere del reconocimiento y localización de objetos en base al color y una marca de identificación, estos datos son obtenidos por la cámara IP y por medio del interprete PyCharm, junto con el lenguaje de programación Python se realiza el procesamiento de los mismos para obtener información correspondiente al entorno, esto servirá para la generación de las trayectorias junto con la tarea a realizar por los mini robots, el diagrama del algoritmo se lo presenta en la *Figura 5*.

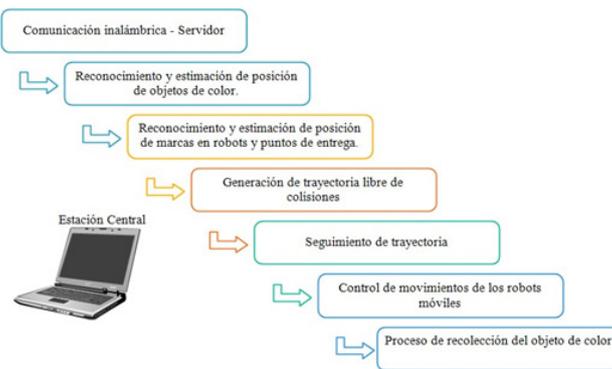


Figura 5. Diagrama de bloques del algoritmo. Fuente: elaboración propia

Para la detección y localización de los objetos de color y marcas en el entorno de pruebas desarrollado, se emplea la visión artificial, para ello se utilizan filtros de color e identificación de córneres o esquinas en las marcas Aruco, en lo referente a la detección de color dentro del espacio se emplea el modelo HSV (*Hue, Saturation, Value*) debido que se lo considera como una representación muy cercana a la forma en que los seres humanos perciben los colores y sus propiedades, para el uso de este modelo se emplea la función `inRange()`, perteneciente a OpenCV, que permite trabajar con tres parámetros: la imagen, el umbral superior y el umbral inferior, estos valores se los determinó en base a pruebas de calibración como se presenta en la Figura 6.

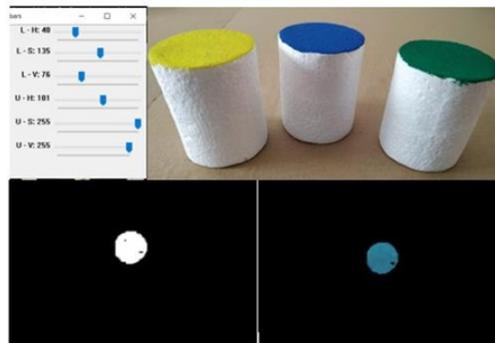


Figura 6. Obtención del rango de valores HSV para el color verde. Fuente: elaboración propia

Los valores experimentales obtenidos para realizar la detección de los colores se los presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango de valores HSV

Color	Umbral inferior	Umbral superior
Azul	36, 160, 160	185, 255, 255
Verde	39, 135, 75	101, 255, 255
Amarillo	17, 130, 160	44, 250, 255

Fuente: elaboración propia

Una vez que se tienen definidos los valores HSV para los objetos de color que corresponden a los elementos que se deberán transportar, se requiere calcular el centro y radio en píxeles, para esto se emplea la

librería Aruco con OpenCV, de esta forma se realiza la detección de las marcas y se determina la posición de estas en base a sus esquinas como se puede observar en la *Figura 7*.



Figura 7. Detección de marcas Aruco vista aérea.
Fuente: elaboración propia

El sistema cooperativo está compuesto de varias etapas, como se puede visualizar en el diagrama de la *Figura 8*, donde está la etapa de comunicación inalámbrica para el intercambio de instrucciones a seguir.

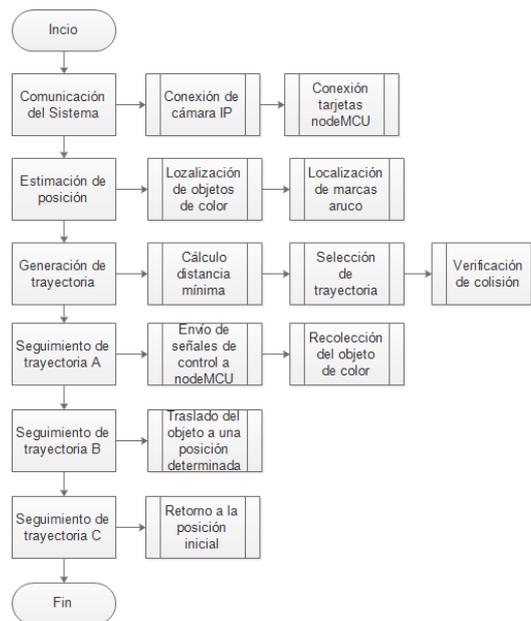


Figura 8. Diagrama de flujo del sistema.
Fuente: elaboración propia

En las diferentes etapas que se definieron para el algoritmo planteado, se parte de la verificación de la comunicación de todos los elementos del entorno de pruebas y la estación central, el diagrama correspondiente a la programación de esta etapa se puede ver en el diagrama de flujo de la *Figura 9*.



Figura 9. Diagrama de flujo conexión de los elementos del sistema.
Fuente: elaboración propia

Con los datos proporcionados de las marcas y colores se obtiene también información de la posición en 2D, lo que permite dar inicio a la etapa de generar trayectorias para cada mini robot, las trayectorias que se generaran son de dos clases, la primera una trayectoria recta, y la segunda que consiste en una ruta generada mediante el empleo del algoritmo RRT de sus siglas en inglés *Rapidly Exploring Random Tress*, el primer tipo de trayectoria se da cuando no existen cruces entre las rutas generadas, cuando se produce una condición de cruce se empleará la ruta formada por el algoritmo RRT, por último, de darse el caso, en que no sea posible crear una ruta, los mini robots en conflicto deberán esperar hasta que los demás cumplan su tarea para poder generar la suya, para esto se requiere de tres parámetros el punto partida y llegada junto a la posición de los obstáculos (García et. al., 2017), para obtener ramificaciones que cubrirán el espacio libre (Figura 10).

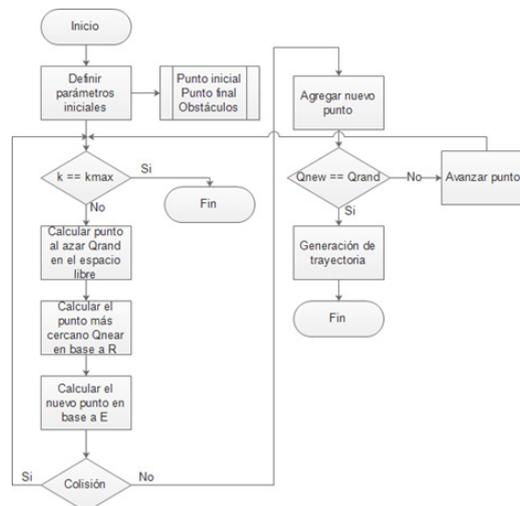


Figura 10. Diagrama de flujo algoritmo RRT.
Fuente: elaboración propia

El seguimiento de la trayectoria es en tiempo real, para lo cual se emplea la deducción del ángulo de rotación perpendicular al eje vertical denominado como vaw , en base a los datos de posición del mini robot y del objeto de color, generando una realimentación de las diferentes ubicaciones de los elementos, para alcanzar una mejor precisión del seguimiento de la trayectoria (Figura 11).

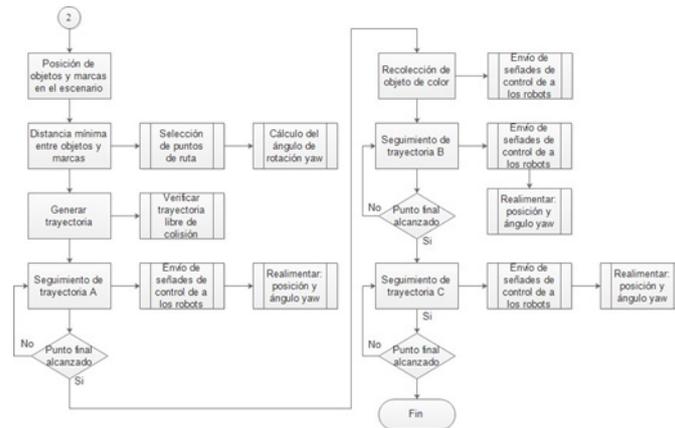


Figura 11. Diagrama de flujo algoritmo de generación y seguimiento de trayectorias.
Fuente: elaboración propia

Para el seguimiento de trayectorias en tiempo real se emplea el algoritmo *PurePursuit*, el cual posee un bajo error de orientación y de posición (Pérez Padial, 2016), esto se consigue porque se realiza una corrección continua en la orientación y posición con respecto a la trayectoria de interés, el diagrama correspondiente a esta etapa se presenta en la Figura 12.

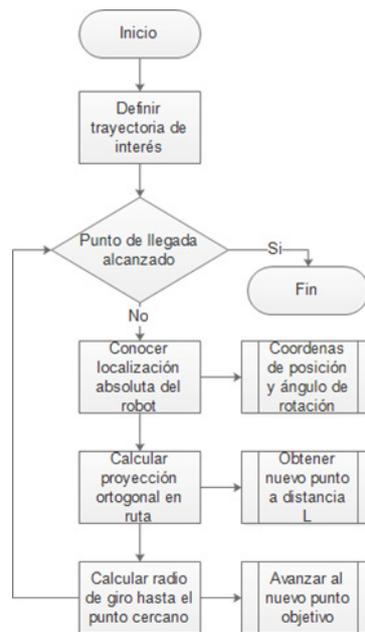


Figura 12. Diagrama de flujo algoritmo *PurePursuit* para el seguimiento de la trayectoria.
Fuente: elaboración propia

El tiempo que se emplea para la navegación de los mini robots permite realizar el proceso de control de cada autómatas, por medio del intercambio de mensajes con la estación empleando la tarjeta NodeMCU, de esta forma, es posible el control de los motores y del brazo electromecánico para realizar la tarea asignada, el esquema de control se puede ver en la Figura 13.

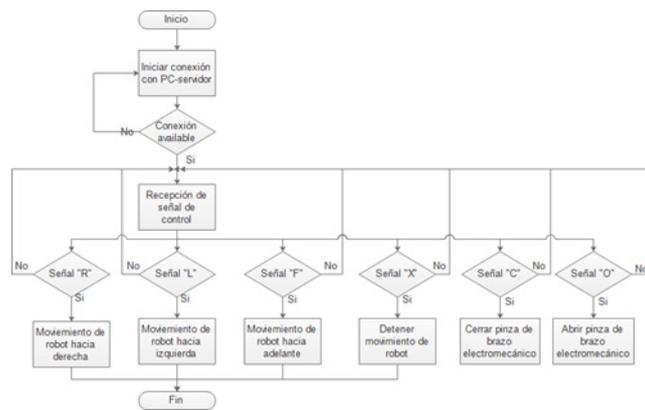


Figura 13. Diagrama de flujo algoritmo de control de los actuadores en cada mini robot.
Fuente: elaboración propia

RESULTADOS

Reconocimiento de objetos de color

Par evaluar si el sistema es capaz de reconocer los objetos de color en diferentes posiciones dentro del entorno de pruebas, se procede a evaluar el proceso de detección y localización en un ambiente que posee iluminación artificial, como se observa en la Figura 14.

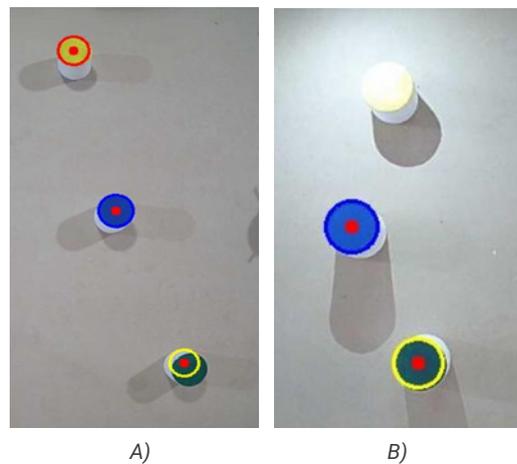


Figura 14. Detección de objetos con iluminación artificial. a) Iluminación adecuada, b) Iluminación inadecuada.
Fuente: elaboración propia

También se empleó un escenario con luz natural (Figura 15).

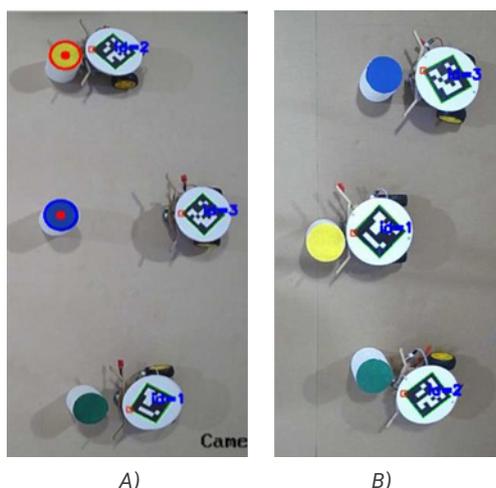


Figura 15. Detección de objetos con iluminación natural. a) Iluminación adecuada, b) Iluminación inadecuada.
Fuente: elaboración propia

Adicional, se planteó realizar las pruebas con tres configuraciones basadas en la altura de la cámara, de 1.4 metros, 1.5 metros y 1.6 metros, los resultados con una fuente de luz adecuada, se pueden ver en la Tabla 2.

Tabla 2.
Resultados pruebas detección colores con iluminación adecuada

Color	Configuración	Tipo	Nro. De pruebas				
			1	2	3	4	5
Azul	Primera	Natural	Si	Si	No	Si	Si
Azul	Primera	Artificial	Si	Si	Si	Si	Si
Verde	Primera	Natural	Si	Si	Si	No	No
Verde	Primera	Artificial	No	Si	Si	Si	Si
Amarillo	Primera	Natural	Si	Si	Si	Si	Si
Amarillo	Primera	Artificial	No	Si	Si	Si	Si
Azul	Segunda	Natural	Si	Si	Si	Si	No
Azul	Segunda	Artificial	Si	Si	Si	Si	Si
Verde	Segunda	Natural	Si	No	Si	Si	No
Verde	Segunda	Artificial	Si	Si	Si	Si	Si
Amarillo	Segunda	Natural	No	Si	No	Si	Si
Amarillo	Segunda	Artificial	Si	Si	Si	Si	Si
Azul	Tercera	Natural	Si	Si	Si	Si	Si
Azul	Tercera	Artificial	Si	Si	Si	Si	Si
Verde	Tercera	Natural	No	Si	Si	Si	No
Verde	Tercera	Artificial	Si	Si	Si	Si	Si
Amarillo	Tercera	Natural	No	Si	Si	Si	Si
Amarillo	Tercera	Artificial	Si	Si	No	Si	Si

Fuente: elaboración propia

Generación y seguimiento de trayectorias

Para poder evaluar los algoritmos de generación y seguimiento de trayectorias se establecieron los siguientes escenarios:

El primero, que permite la generación de trayectorias denominadas A, B y C, en línea recta, para tomar el objeto de color y continuar hacia el punto de destino como se puede observar en la *Figura 16*.

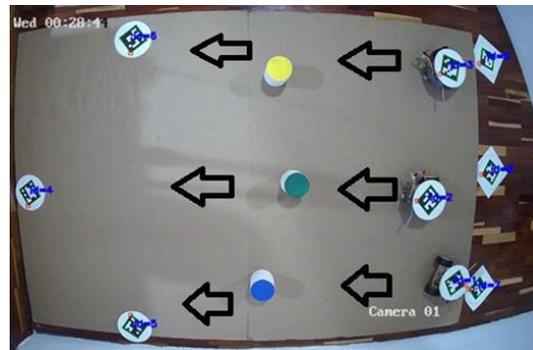


Figura 16. Generación de trayectorias rectas.
Fuente: elaboración propia

En esta configuración se desarrollaron 5 pruebas para evaluar el tiempo de ejecución de la tarea, estos resultados se los presenta en la *Tabla 3*.

Tabla 3.
Resultados pruebas escenario 1

Parámetro	Sistema	Mínimo	Máximo
Tiempo de ejecución (min)	Todos	3,36	5,68
Número de objetos detectados	Cámara	1	3
Número de objetos recogidos	Robot 1	1	1
	Robot 2	1	1
	Robot 3	1	1
Número de objetos entregados	Robot 1	1	1
	Robot 2	1	1
	Robot 3	1	1

Fuente: elaboración propia

El segundo escenario plantea una trayectoria recta para uno de los robots (trayectoria A), para el segundo una trayectoria generada por el algoritmo RRT y para el tercero se establece la generación de rutas en línea hacia el destino como se muestra en la *Figura 17*.

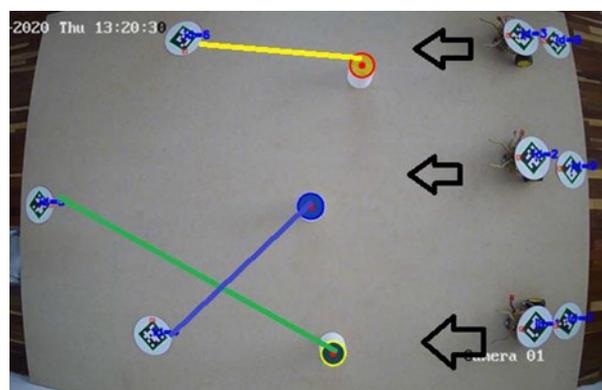


Figura 17. Generación de trayectorias en base al segundo escenario.
Fuente: elaboración propia

DISCUSIÓN

De acuerdo a los resultados en cada una de las pruebas realizadas en el entorno controlado, se permite presentar las ventajas alcanzadas con el algoritmo desarrollado.

En primer lugar, en base al análisis de los resultados obtenidos con respecto a la detección de colores, se logra evidenciar una eficiencia del 91.33% en la detección de los colores con la primera configuración, con la segunda configuración se alcanzó una eficiencia del 81.23%, y para la última configuración se obtuvo el 90.33%. Por otro lado, en lo que se refiere a la identificación por color, con las tres configuraciones se obtuvo que el color amarillo alcanza el 95,5%, el color azul el 96% y el color verde el 93,5%, referente a la cantidad de aciertos.

Dado que el sistema es del tipo centralizado, esta información la procesa la unidad central y es en donde se determinará la ruta más adecuada para ello, también en esta se toma en consideración el algoritmo *PurePursuit*, que por sus características de proporcionar un bajo error de posición, y una fácil configuración debido a que requiere de un solo parámetro de control, este algoritmo permite al robot seguir la trayectoria generada por el algoritmo RRT sin la necesidad de que deba pasar por todos los puntos, resultando en un seguimiento suave y con buenos resultados rutas creadas con ramificaciones, como se puede apreciar en la *Figura 18*.

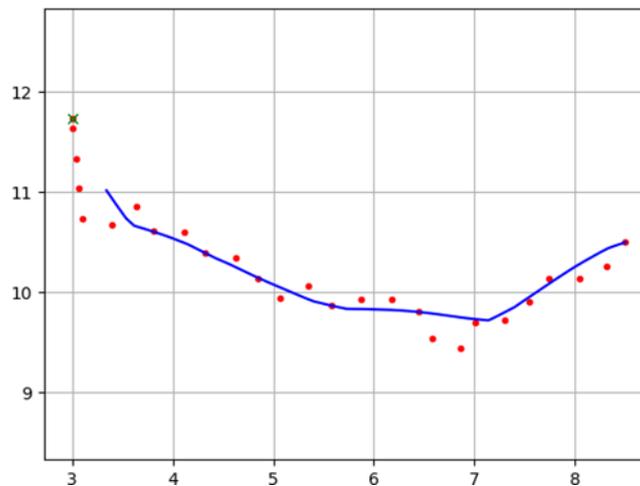


Figura 18. Seguimiento de trayectoria algoritmo *PurePursuit*.
Fuente: elaboración propia

CONCLUSIONES

En las pruebas desarrolladas con diferentes tipos de iluminación para evaluar el desempeño del algoritmo de detección de objetos por su color, si se utiliza el modelo HSV y filtros para los diferentes colores, permite demostrar que este presenta una eficiencia en la detección del 84,4% con respecto al 66,7% del modelo RGB, lo que evidencia que el primer modelo es más robusto y eficaz en tiempo real con las características de un entorno controlado, que permite limitar el factor ambiental como parte del funcionamiento del sistema cooperativo.

Durante el desarrollo de las diferentes pruebas, se pudo establecer que la altura ideal de la ubicación de la cámara IP para la detección de los objetos por su color, y por las marcas en el entorno controlado implementado, es de 1.40 metros, donde los datos son adecuados aumentando el nivel de eficacia del algoritmo

desarrollado, lo que permite afirmar que para una altura superior a este valor los datos del entorno presentan errores en el reconocimiento de los objetos, lo que contribuye a una generación de trayectorias no adecuadas al cumplimiento de las tareas.

El uso del algoritmo RRT permite generar una alternativa para la planificación de trayectorias en los casos en que se pudiera presentar conflictos entre las rutas de los robots, demostrando ser un algoritmo sencillo y de fácil implementación, y que, a pesar de tener limitaciones, aporta a la obtención de buenos resultados en las pruebas desarrolladas.

La implementación del sistema, basado en un entorno centralizado, permite que la central coordine las diferentes tareas a realizar por los diferentes elementos, lo que accede a que el diseño de los autómatas sea simple, lo que genera un beneficio a nivel de costos, ya que, al reducir la capacidad de procesamiento en los robots, se abarata su costo.

REFERENCIAS

- Ávila Parrado, W. O., & Santos Novoa, C. A. (2015). Algoritmo de cooperación para prototipos de robots acuáticos no sumergibles para la recolección de objetos flotantes (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia).
- Bermejo Sánchez, S. (2003). Desarrollo de robots basados en el comportamiento. Barcelona: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2099.3/36750>
- Chanco Alvear, J. L. (2018). Control de un robot seguidor de línea tipo diferencial mediante visión artificial (Bachelor's thesis).
- Díaz, F.C. (2018). Algoritmos de recolección de recursos mediante enjambres de robots terrestres. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España.
- Garcés Hernández, E. D. (2017). Implementación de un prototipo de brazo robótico que realiza control de calidad con visión artificial, para el laboratorio de automatización de la Escuela de Ingeniería Industrial de la ESPOCH (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo). B.S. thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba. Ecuador, 2017.
- García, N., Rosell, J., & Suárez, R. (2017) Aplicación de algoritmos RRT en la planificación de movimientos óptimos en robotica1.
- Illanes Tibanlombo, J.C. (2018). Adaptación del sistema robótico móvil autónomo cooperativo SMELLROBSENSE para mapeo 2D de obstáculos. temperatura y concentración de gases en un ambiente controlado, Universidad de las Fuerzas Armadas, Quito, Ecuador, 2018. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/15528>
- Lizarazo Zambrano, J. A. & Ramos Velandia, M. A. (2016). Visión artificial y comunicación en robots cooperativos omnidireccionales. *Ingeciencia*, vol. 1, n.o 1, pp. 5-11. http://editorial.ucentral.edu.co/ojs_uc/index.php/Ingeciencia/article/view/159
- Moreno Rodríguez, J. A., Guevara Ospina, A. F & Infante, W. (2019). Sistema robótico cooperativo para detectar sobrevivientes en zonas con concentraciones de humo LOCATORS. *Visión Electrónica*, p. 21. <http://hdl.handle.net/11349/23834>
- Pérez Checa, A. R. (2016). Aplicación de Algoritmos de Visión Artificial para el Control de Robots Cooperativos Móviles Dentro De Espacios Semi Estructurados (Master's thesis, Quito, 2016.).
- Pérez Vidal, C. (2017). Control Sensorial de Sistemas Robóticos, vol. 1. Universidad Miguel Hernández.
- Pérez Padial, P. (2016). Estudio de algoritmos de control de trayectoria de un vehículo virtual (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Roldán-Gómez, J. J., de León Rivas, J., Garcia-Aunon, P., & Barrientos, A. (2020). Una revisión de los sistemas multi-robot: desafíos actuales para los operadores y nuevos desarrollos de interfaces. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 17(3), pp. 294-305, 2020. <https://doi.org/10.4995/riai.2020.13100>

Roldán, J. J., Garcia-Aunon, P., Garzón, M., De León, J., Del Cerro, J., & Barrientos, A. (2016). Heterogeneous multi-robot system for mapping environmental variables of greenhouses. *Sensors*, 16(7), 1018. p. 1018, 2016 <https://doi.org/10.3390/s16071018>

Solís Ortega, R. (2016). Algoritmo cooperativo con enjambres de robots para la exploración de una zona y comunicación de una ruta hacia un objetivo. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Costa Rica.

LÍNEA DE CERVEZA ARTESANAL CON CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO DE TEMPERATURA EN MACERACIÓN Y FERMENTACIÓN

CRAFT BEER LINE WITH INTEGRAL PROPORTIONAL DERIVATIVE CONTROL OF TEMPERATURE IN MACERATION AND FERMENTATION

Fernando Pesántez Bravo

Instituto Superior Tecnológico Sudamericano, Ecuador
afpesantez@tecnologicosudamericano.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-9882-9527>

César Carrión Aguirre

Instituto Superior Tecnológico Sudamericano, Ecuador
cccarrion@tecnologicosudamericano.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-5522-9353>

Leydi Mingo Morocho

Instituto Superior Tecnológico Sudamericano, Ecuador
lmmingo@tecnologicosudamericano.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6288-3839>

Edgar Emanuel González Malla

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador
eegonzalez@uisrael.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-3485-8649>

RESUMEN

La automatización industrial utiliza herramientas para el control y monitoreo de procesos industriales. La investigación tiene como objetivo incorporar control PID en maceración y fermentación, con la finalidad de optimizar la estabilidad de temperatura y agitación. Se desarrolló una conceptualización de una línea de cerveza artesanal tipo Pilsen mediante un sistema de adquisición de datos para (SCADA), y el control PID en el proceso de macerado y fermentado, controlando la temperatura mediante un sensor industrial, controlador y sistema HMI, adquiriendo en tiempo real datos para procesarlos por PID, reduciendo errores en la producción, la fabricación de cerveza artesanal carece de control de errores perjudicando la calidad del producto. Las constantes para el control PID (K_p , K_i , K_d) fueron mediante el uso de un Arduino y un sensor Pt100, implementados en una planta de control de temperatura, las salidas pwm del Arduino activaron una carga como fuente de calor, se estabilizó el sistema en 64°C para maceración y 22°C para fermentación con un error de 30%, en instantes de 10 ms, con un factor de incontrolabilidad medio de 3,5, en la sintonización, mediante Ziegler – Nichols se determinaron valores de $k_p = 40$, $k_i = 0,01$ y $k_d = 11$, corroborado en MATLAB; Ziegler – Nichols permite sintonizar PID de forma práctica, sin necesidad de las ecuaciones de la planta.

El sistema SCADA permite personalizar color, sabor y grados de etanol, incorporando en el sistema opciones para formulación de cerveza que accede trabajar con parámetros predeterminados o cambiar valores de tiempo, temperatura y agitación.

PALABRAS CLAVE

Tiempo, temperatura de maceración, color de fermentación, MATLAB, Arduino

ABSTRACT

Industrial automation uses tools for the control and monitoring of industrial processes. The objective of the research is to incorporate PID control in maceration and fermentation in order to optimize the stability of temperature and stirring. A conceptualization of a craft beer line was developed through a data acquisition system for (SCADA) and PID control in the maceration and fermentation process, controlling the temperature through an industrial sensor, controller, and HMI system, acquiring in Real-time data to process by PID reducing errors in production, the manufacture of craft beer lacks control of errors, damaging the quality of the product. To determine the value of the constants (K_p , K_i , K_d) an Arduino and a Pt100 sensor were used implemented in a temperature control plant, the Arduino PWM outputs activated a load as a heat source, the system was stabilized at 64 ° C for maceration and 22 ° C for fermentation with an error of 30% in instants of 10 ms, with a mean uncontrollable factor of 3.5, in the tuning, employing Ziegler - Nichols, values of $k_p = 40$ were determined, $k_i = 0.01$ and $k_d = 11$, corroborated in MATLAB; Ziegler-Nichols allows for practical PID tuning, without plant equations.

The SCADA system allows customization of color, flavor, and degrees of ethanol, incorporating options for beer formulation in the system that agrees to work with predetermined parameters or change values of time, temperature, and agitation.

KEYWORDS

Time, maceration temperature, fermentation color, MATLAB, Arduino

INTRODUCCIÓN

La producción de cerveza artesanal es una actividad que se realiza para obtener variaciones en las bebidas alcohólicas, se producen cervezas que pueden lograrse al usar granos diferentes a la cebada y trigo, y también levaduras diferentes a las tradicionales, esta última cumple un papel fundamental en la producción de cerveza, ya que se encarga de la fermentación en la que produce etanol por descomposición de los carbohidratos, así como de la generación de compuestos que originan el aroma y sabor en la cerveza, de esta forma se introducen variaciones en el producto final, lo cual está orientado a consumidores diversos que demandan cervezas bajas en calorías, bajo contenido alcohólico, entre otras (Burini et al., 2021).

La característica principal en la elaboración de cerveza artesanal consiste en que todo el proceso se realiza mediante kits o sistemas de producción pequeños, que facilita a los productores artesanales, o micro cerveceros, la obtención de volúmenes reducidos de cerveza, alrededor de 20 litros por lote (González, 2017). El proceso es monitorizado manualmente, y muchas de las veces se producen errores, pues existen procesos en la producción que requieren un control preciso y exacto como la maceración del grano, la fermentación en el cual las levaduras necesitan temperatura óptima y en el envasado para minimizar errores de contenido.

Un estudio de control en procesos de fermentación es el realizado por Burini et al. (2021), que desarrollaron un modelo matemático con temperatura constante, pero controlando variables propias de la fermentación. En otro trabajo realizado por Wu et al. (2014) se hace un control PID de red neuronal difusa en el cual hace una combinación entre el control proporcional integral derivativo y el ajuste difuso que logró minimizar las deficiencias de PID.

En el trabajo titulado “Control basado en PLC y monitoreo mediante HMI en la temperatura en el proceso de maceración y cocción de cerveza artesanal” Flores et al. (2021) establecen un control PID en cascada mediante un controlador de flujo y un controlador de temperatura con el Método de Ziegler – Nichols, para el cálculo de los parámetros del controlador PID, con el objetivo de reducir las perturbaciones que existen en el proceso de la cerveza artesanal, efectuando el control de una válvula de gas, de tal forma que se logra controlar la temperatura en las etapas de maceración y cocción, ya que tener el control de dicho parámetro mejora el sabor de la cerveza por la presencia de componentes volátiles y aromáticos, cabe recalcar que en este sistema se cuenta con una interfaz HMI desarrollada en el software Cimplicity Workbench para monitorizar todo el proceso.

Algunas propuestas se han realizado mediante control proporcional integral derivativo, es el caso del estudio publicado por Less & Wang (2015), en el cual se propuso un sistema de control para el proceso de filtración mediante un control PID de lazo cerrado, con un diseño basado en dos puntos de datos de respuesta de frecuencia.

Un estudio con PID para el control de la maceración en la producción de cerveza artesanal fue realizado por Tovar et al. (2017), en este se logra, teniendo como punto de partida ecuaciones de balance de masa, utilizar un controlador lógico programable para enviar señales a dispositivos virtuales del sistema y optimizar los valores de temperatura en la maceración.

En la etapa de fermentación, el control de temperatura tiene características importantes en el proceso de elaboración de cerveza artesanal, tal y como lo menciona Zhang & Liu (2019) en su trabajo, quienes proponen un sistema para mejorar el control PID tradicional a través de un algoritmo de red neuronal de BP (back

propagation) y su posterior simulación en el software MATLAB, demostrando que el rendimiento del sistema tiene entre otras ventajas, respuesta rápida y robustez.

Así mismo, Machado-Díaz & Coto (2018) sostienen que los métodos existentes para la sintonización de controladores PID introducen errores al modelo matemático de la planta, por lo que propone un método analítico que permite analizar el sistema y brindar su ecuación característica utilizando Python y Arduino para la toma de datos, y comparándolo con un sistema de control PID de temperatura que fue sintonizado por el método de Ziegler-Nichols.

Se puede realizar procesos semiautomáticos para la elaboración de cerveza artesanal, tal y como lo establece Colignon & Roldán (2018) en su trabajo de investigación, en el mismo se propone el control automático de volúmenes de agua, sensores, temperatura y tiempo para el registro de recetas elaboradas con la mezcla de hasta 3 tipos de maltas y 5 tipos de agregados mediante un controlador PLC y una interfaz HMI.

En las investigaciones realizadas se ha trabajado en su mayoría con control PID a través de software propietario, en este caso se opta por usar una plataforma de código abierto, lo que implica reducción de costos en el desarrollo de la aplicación para el monitoreo del proceso (Ariza et al., 2019).

En los estudios analizados, los procesos para cervecería artesanal no están mencionados en su totalidad, es importante entonces plantear un estudio que se originó por el interés de mejorar el proceso de producción a través de la optimización de tiempos y disminución del margen de error mediante la utilización de un software libre y automatizar el control en los procesos, de esta manera visualizar la relación de las etapas de producción con el control de variables de tiempo y temperatura, dado que los equipos para la producción cervecera artesanal no tienen incorporado sistemas de control.

En la presente investigación se propone una simulación de control PID para el proceso de macerado y fermentado de cerveza artesanal tipo Pilsen, que se traduce en el control de temperatura mediante un sensor industrial, controlador y sistema HMI de software libre que suministran información operativa en tiempo real, de fácil comprensión para coordinar y controlar el proceso de producción. Se plantea una conceptualización de una línea de cerveza artesanal mediante un sistema de adquisición de datos para la supervisión y control (SCADA) desarrollado en el software de código abierto Myopenlab, se implementó un control PID, las constantes para el control proporcional, integral y derivativo (K_p , K_i , K_d) fueron determinadas mediante una simulación de los valores de temperatura utilizando Arduino y un sensor Pt100 basado en el método Ziegler – Nichols, corroborando los datos obtenidos mediante MATLAB.

METODOLOGÍA

Sistema SCADA

La investigación inicia con el diseño y programación de una interfaz HMI para cervecería artesanal, la cual cumple las funciones de monitorizar y gestionar los procesos de molido, mezclado, maceración, enfriado y fermentación del proceso. Está desarrollado en software libre con una metodología de programación orientada a objetos, bajo el entorno de java, lo que brinda la posibilidad de ejecutarse en diferentes sistemas operativos tales como Windows, Linux y MacOs, por su característica de multiplataforma. El sistema SCADA, para la interfaz desarrollada, ofrece la posibilidad de seleccionar dos tipos diferentes de cerveza artesanal, una ligera y otra dulce, cuyo control de parámetros como temperatura y tiempos de retardo ya están integrados en la programación, en la *Figura 1* se indica el proceso de monitoreo que cumple el sistema a

través de un diagrama de bloques. Adicionalmente, se ha incorporado un programa para realizar la limpieza y desinfección de los tanques de fermentación.

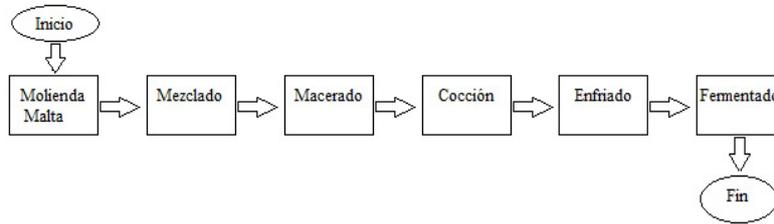


Figura 1. Diagrama de bloques de la línea.
Fuente: elaboración propia

Adquisición de datos

Se realizó una aplicación de escritorio en software libre cuyo objetivo fue el de registrar en tiempo real datos de temperatura medidos por el sensor Pt100, tomando como referencia el proceso de macerado de cerveza artesanal tipo Pilsen, cuyo rango no debe disminuir de 62°C ni sobrepasar 67°C (González, 2017). Por tanto, se tomó una media de las lecturas y se propuso un valor de consigna para el proceso PID establecido en 64°C. En la Figura 2 se muestra la toma de datos y la función. La técnica de Ziegler – Nichols permitió realizar la sintonización del control proporcional integral derivativo utilizada, porque no requiere una función de transferencia de la planta, sino solamente los valores tomados como muestra.

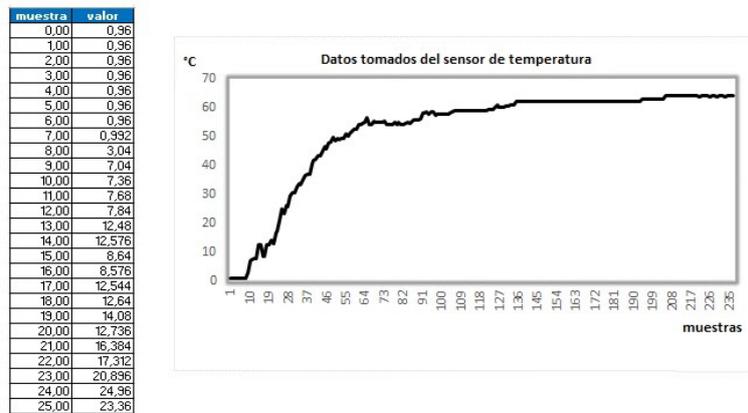


Figura 2. Datos y gráfica ----sensor de temperatura Pt 100
Fuente: elaboración propia

Para el proceso de adquisición se tomaron 236 muestras, en la Figura 2 se evidencian los datos obtenidos, el sensor fue alimentado con 5 voltios de corriente continua, y se realizó la conversión a digital de los datos analógicos obtenidos, para ellos se realizó mediciones en el programa Myopenlab utilizando la herramienta firmata v1.0, que permite comunicar el controlador Arduino con Myopenlab, el sensor PT100 está conectado al pin AO del controlador mencionado, que constituye el pin 14 en la herramienta firmata, el protocolo de comunicación está basado en lenguaje de programación de alto nivel bajo java (ver Figura 3).

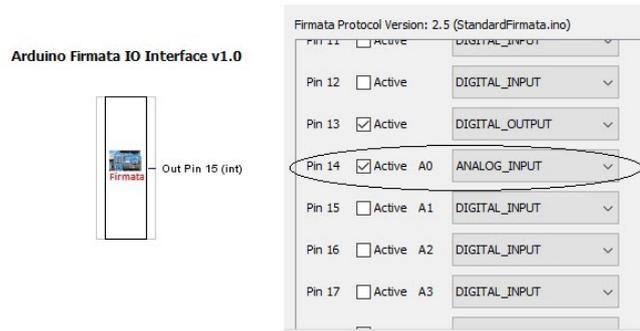


Figura 3. Herramienta de Myopenlab para adquisición de datos.
Fuente: Tomada de la interfaz Myopenlab

El sensor Pt100 tiene una salida de corriente cuyo rango está comprendido entre 4 y 20 mA, cuyo valor se convirtió a voltaje, para ello se multiplicó la salida con la división de la alimentación de voltaje del sensor (5v), por el rango 1023 (ver Figura 4, literal a), luego de la conversión, se procedió a realizar la comunicación entre la tarjeta Arduino y el software Myopenlab, para lo cual fue necesario cargar a la tarjeta código en C++ referente al protocolo standard firmata que reside en el entorno de desarrollo de Arduino IDE, mostrado en la Figura 4 literal (b).

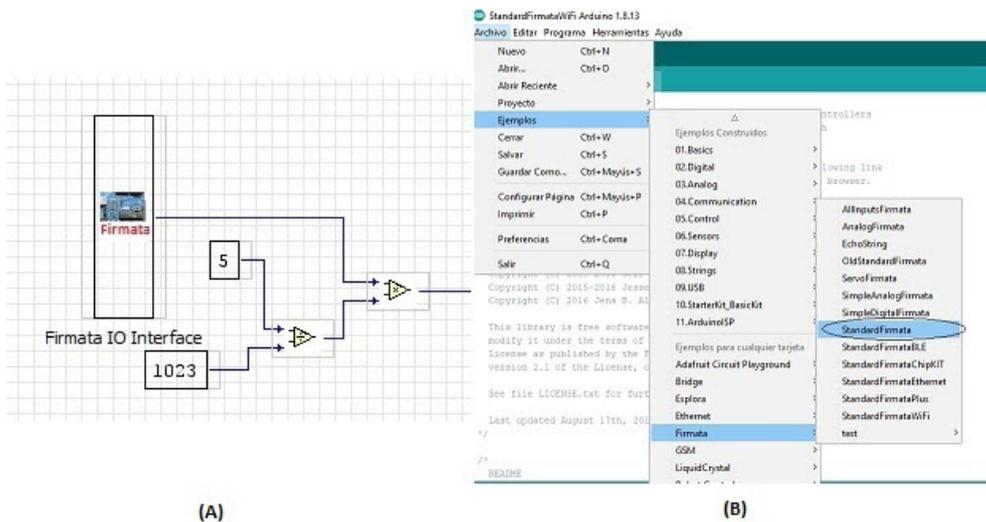


Figura 4. Conversión salida de corriente a voltaje & protocolo firmata.
Fuente: Tomada de las interfaces MyopenLab y Arduino IDE

Luego de la conversión de corriente a voltaje del sensor, se cambió a unidades de grados centígrados, por lo cual la salida de la Figura 4 literal (a) se debió multiplicar por el valor de temperatura máxima que admite el transmisor Pt100 que es 150°C y luego dividir para el voltaje máximo, que para este caso es 10 voltios en corriente continua, todos estos datos se los encontró en las especificaciones técnicas del fabricante del sensor, como se indica en la Figura 5.

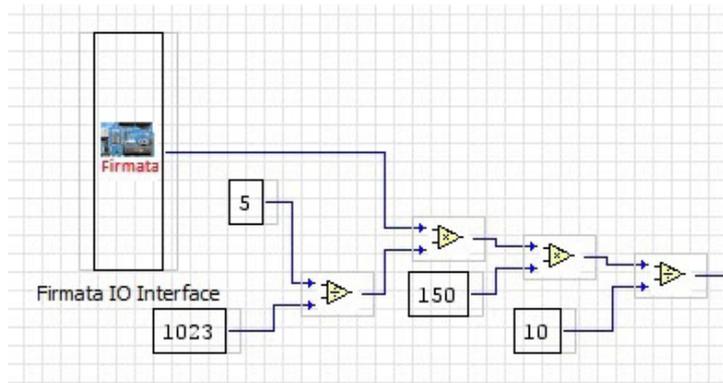


Figura 5. Conversión de datos de voltaje a grados Celsius.
Fuente: Tomada de la interfaz MyopenLab

Es importante mencionar que estos valores de constante no son definitivos, ya que aún no fueron sintonizados. La herramienta de programación Arduino IDE fue utilizada para crear el código necesario para el desarrollo del sistema de control PID, se usó la librería PID_v.1.h, el modo de operación de control está configurado como automático, para realizar una aproximación a la sintonización de las constantes K_p , K_i y K_d se utilizó el método de adquisición de datos con Myopenlab y la técnica de Ziegler – Nichols, cabe añadir que Arduino IDE requiere que se ingrese el valor *input* y *setpoint*, para nuestro caso 64°C, y devuelve una salida del sistema *Output*, el cual se puede observar en el *plot* de color negro en la Figura 6.

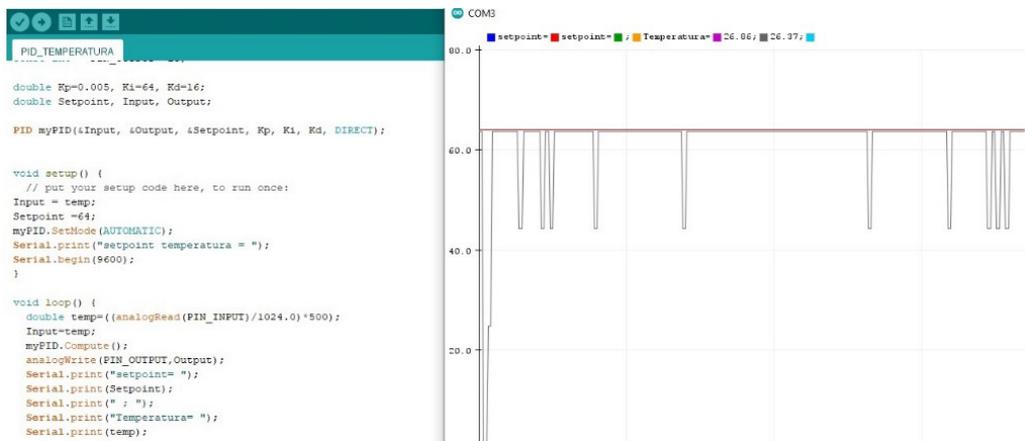


Figura 6: Etapa de programación PID.
Fuente: Tomada de la interfaz Arduino IDE

En el software Myopenlab existe una herramienta PID integrada, la cual posee cinco entradas de tipo decimal o *double* y una salida de control, las cual, en orden ascendente, describen el error de la línea o planta, además, permiten la incorporación de las constantes k_p , k_i y k_d . Para la obtención de la función se utilizaron las siguientes constantes:

- $K_p = 40$
- $K_i = 0,01$
- $K_d = 11$

Los valores indicados de constantes no están sintonizados, mismos que pueden causar errores, pero constituyen una aproximación a la estabilidad del sistema. En la investigación se desarrolló una pequeña planta de control de temperatura utilizando un controlador, sensor y software de adquisición, se trabajó con salidas de tipo pwm para activar una carga eléctrica como generación de calor, misma que logró estabilizarse en 64°C con un nivel de error de un 30% en instantes de 10 ms, con un factor de incontabilidad medio. Referirse a la *Figura 6*.

Se utilizó el comando “Gráfico Temporal X1”, esta herramienta presenta un valor de entrada (dbl) en un gráfico temporal, tiene 4 entradas, la primera es de tipo *double* y corresponde a “Y value”, que fue presentado en la gráfica. La segunda es una entrada de tipo (bol), se denomina *start* y actualiza la gráfica en función de la velocidad requerida, en este caso, 1 seg, la tercera entrada es *stop*, que detiene la presentación de la gráfica y la cuarta entrada es el *reset*, que reinicia el proceso, las cuatro entradas se evidencian en la *Figura 7*.

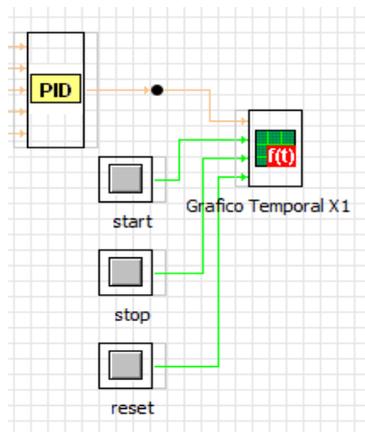


Figura 7. Gráfico temporal.

Fuente: Tomada de la Interfaz Arduino IDE

Luego de la adquisición de datos de temperatura en tiempo real, se procedió a realizar los cálculos de forma manual haciendo uso del método Ziegler – Nichols en el cual se utiliza las ecuaciones 1 y 2

$$G_p(s) = \frac{ke^{-Ls}}{\tau_s+1} \quad (1)$$

$$G_c(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (2)$$

La *Figura 8* indica los parámetros que se utilizaron para encontrar las constantes K_p , K_i y K_d haciendo uso del método de Ziegler – Nichols, con la limitante que la misma es solo utilizada para controladores analógicos y no para digitales, estos parámetros están en función de los valores de retardo del sistema, medido a través de una recta, además, el valor de L , que se lo mide como se indica en la *Figura 8*, con ello es posible dibujar el circuito de control, con la entrada $r(t)$, la planta en donde se da la función de transferencia y la salida $u(t)$ con la respectiva retroalimentación para llegar hasta $y(t)$ que es el control sintonizado.

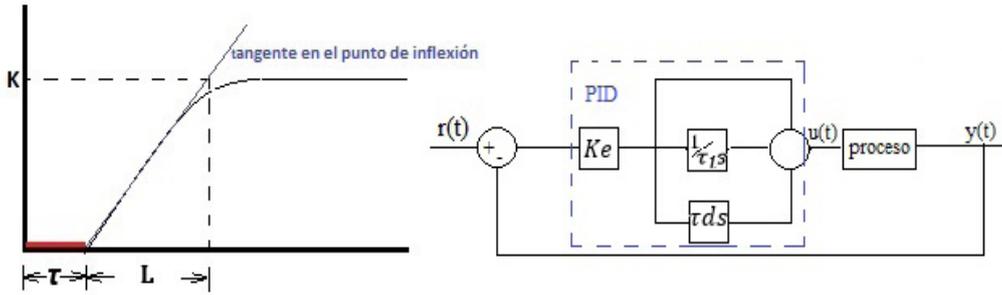


Figura 8: Gráfico para Ziegler-Nichols
Fuente: Los Autores

Si el controlador recibe la señal de error $e(t)$ como entrada, la salida del controlador $u(t)$ está dada por la ecuación 3.

$$u(t) = kp \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t) dt + \tau d \frac{de(t)}{dt} \right] \tag{3}$$

Que al resolverla se llega a la ecuación 4:

$$G_c(s) = kp + \frac{ki}{s} + kds \tag{4}$$

La salida obtenida en la ecuación 4 puede ser simulada en programas tales como simulink de MATLAB.

Luego de haber recopilado los datos en tiempo real, se procedió con el cálculo de las constantes utilizando la *Tabla 1*, la cual fue propuesta por Ziegler – Nichols (Ogata, 1998) que optimiza los resultados y además permite identificar la relación entre las constantes que corresponde al control proporcional, integral y derivativo k_p , k_i y k_d respectivamente, en función de los valores obtenidos de la gráfica representada en la *Figura 8*.

Tabla 1.
Método de Ziegler – Nichols para controladores analógicos.

Control PID	Parámetros		
	k_p	k_i	k_d
	1.2	2L	0.5L

Fuente: Ogata (1998)

Los sistemas PID por si no son garantía total de que el sistema se vuelva estable, esta herramienta permite brindar una estabilidad aceptable para el control de sistemas o líneas de producción, donde el factor de incontrolabilidad juega un papel fundamental denotado por la relación de L la distancia de la tangente en el punto de inflexión, y el retardo τ , fijarse en la *Figura 8*. Si el valor del factor es muy grande, el sistema se considera incontrolable; es decir, el mismo es difícil de controlar, pero no imposible, en el caso de la investigación se obtuvo un valor bajo, indicando que es de fácil controlabilidad.

Factor de incontrolabilidad $L / \tau = K_p$
 $\uparrow T_i \rightarrow L \uparrow$
 $\downarrow \tau_d \rightarrow L \uparrow$
 Para la investigación se utilizó un $T_i = 4\tau_d$.

Para corroborar los cálculos obtenidos de las constantes del PID se utilizó la herramienta *ident* (*system identification*) en MATLAB, tal y como se observa en la *Figura 9*, aquí se configuró la toma de datos en el dominio del tiempo, tomando como entrada el valor de consigna y como salida los valores de temperatura.

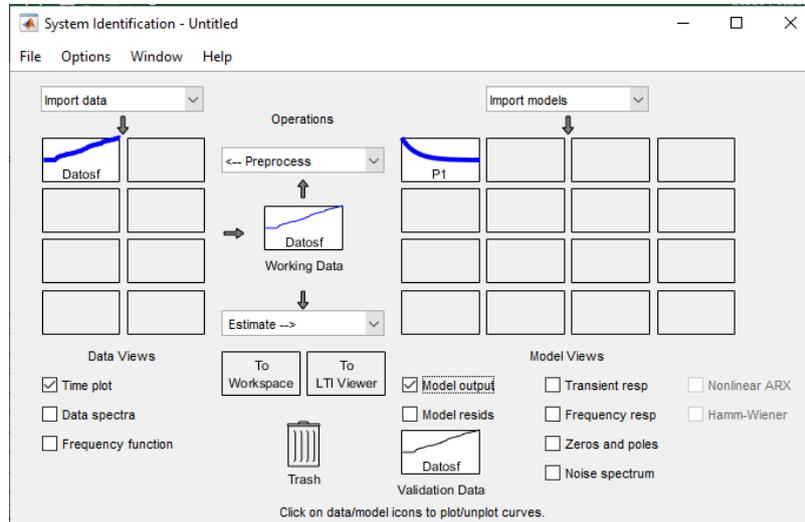


Figura 9. Interfaz *ident* (*system identification*).
Fuente: Tomada de la interfaz MATLAB

Así mismo, en esta interfaz se configuró el modelo del proceso en la sección de *working data* para la representación gráfica de la señal de salida, y obtener el porcentaje de aproximación correspondiente al control PID, planteado mediante la opción *estimate*, tal y como se observa en la *Figura 10*, que corresponde al modelo del proceso y es la que brinda la estructura de la función con la que estamos trabajando, nótese que en la opción *check de delay* no está activada, esto quiero decir que nuestra función no tiene retardo, este procedimiento sirve para verificar si la gráfica final que nos otorga MATLAB corresponde a la gráfica obtenida por Ziegler Nichols, y el objetivo es que supere un 75% de semejanza, el cual se logró indicando que el procedimiento es correcto.

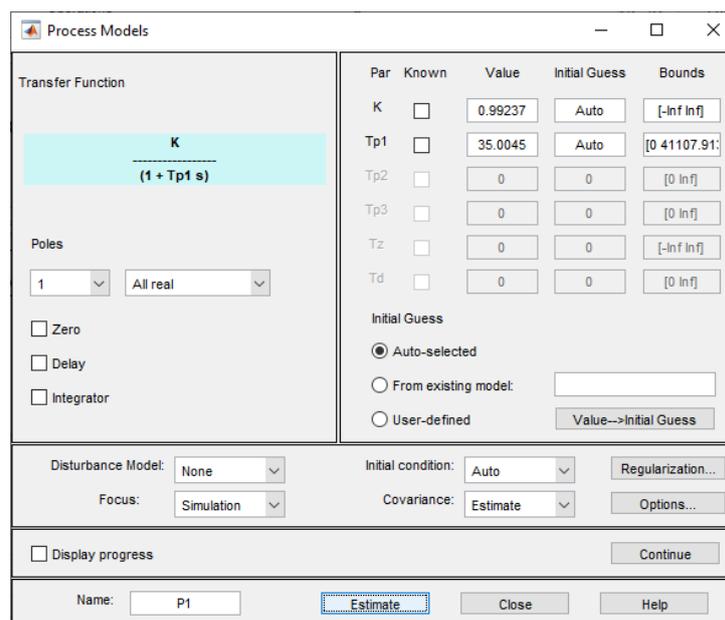


Figura 10. Interfaz *process models*.
Fuente: Tomada de la interfaz MATLAB

RESULTADOS

Se realizaron los cálculos de ganancias K_p , T_i y T_d de forma manual, también se obtuvo la gráfica de adquisición de datos del sensor Pt100 utilizando el software Myopenlab y como resultado se obtuvieron los siguientes valores:

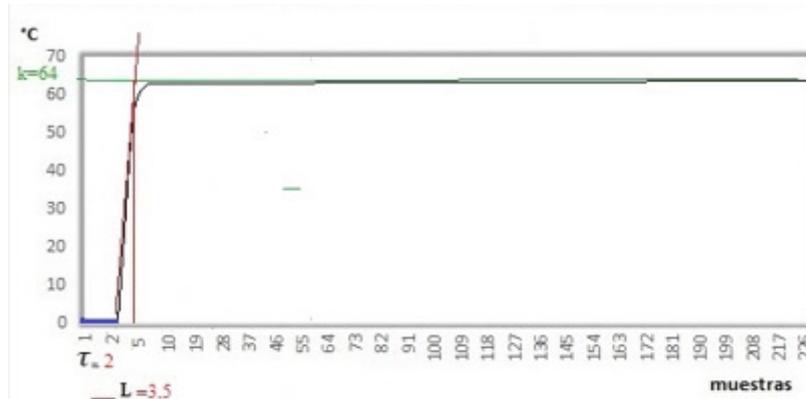


Figura 11. Cálculo manual constantes K_p , K_i y K_d con margen de error.
Fuente: elaboración propia

De la Figura 11 se puede deducir que el valor llega a aproximarse a 2 con un período de muestreo de 1000ms, el cuál fue integrado al código de programación del controlador Arduino para el proceso de adquisición de datos, posterior a ello se procedió a calcular las constantes, gracias a la ayuda de la ecuación de Ziegler – Nichols de lazo abierto que se escribe a continuación:

$$G_p(s) = \frac{k e^{-Ls}}{\tau s + 1} \tag{5}$$

Factor de incontrolabilidad:

Para calcular el proceso de incontrolabilidad, se procedió a realizar cálculos a través de comparativas de la Figura 11, como se indica a continuación:

$\frac{L}{\tau} = \frac{5.5}{2} = 2,75$; que se interpreta como un margen aceptable de incontrolabilidad; es decir, que el proceso es controlable como moderada facilidad.

Reemplazando los datos en la ecuación 5, se tiene:

$$G_p(s) = \frac{64 e^{-5.5s}}{18s + 1} \tag{6}$$

Aplicando la tabla de sintonización de Ziegler y Nichols:

$$k_p = \frac{1.2\tau}{kL} = 1.2 \left(\frac{2}{(64)(1.5)} \right) = 0.2 \tag{7}$$

$$k_i = 2L = 2(1.5) = 3 \tag{8}$$

$$\tau_d = 0.5L = 0.5(1.5) = 0.75 \tag{9}$$

Los resultados obtenidos mediante el sistema SCADA fueron óptimos, se trabajó con la herramienta Myopenlab en los procesos de molienda, mezclado, macerado, cocción, enfriado y fermentación, la misma que al ser software libre brindó la flexibilidad de modificar los parámetros, factores que no se puede realizar en software propietario como TIA portal u otros, en aspectos como edición de imágenes personalizadas, logos, animaciones, controladores digitales y organización de procesos.

Una de las bondades que ofrece el software libre utilizado es que adicionalmente de programar mediante bloques, también se puede utilizar diagramas de flujo en la programación, garantizando la comprensión de la lógica del sistema y facilitando los cambios que requiera el usuario en cada uno de los procesos. Otra funcionalidad a rescatar es que es posible cambiar la velocidad de simulación para poder sincronizar con los procesos reales, teniendo en cuenta que el software lee cada etapa a través de esperas para lectura por sensores, mismos que indican el inicio y final de cada fase.

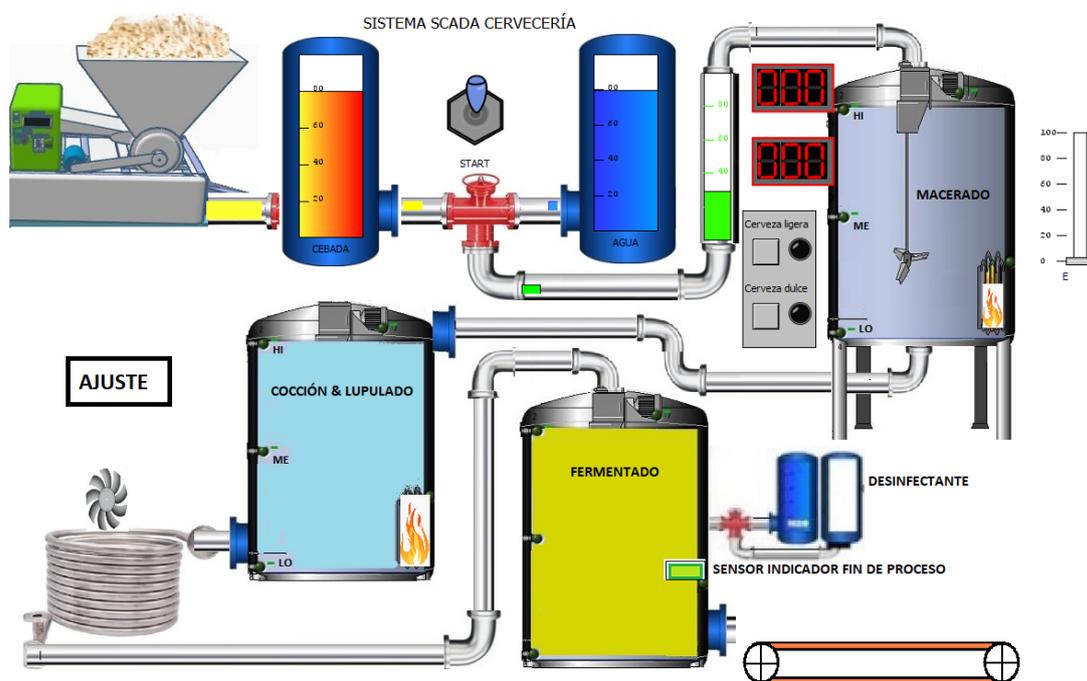


Figura 12. Sistema SCADA cervecería artesanal.
Fuente: Tomada de la interfaz MyopenLab

Como se muestra en la Figura 12, se diseñó un sistema SCADA para una planta de cervecería artesanal que monitorea y gestiona las etapas fundamentales en la fabricación. En en primera instancia, al utilizar sensores capacitivos o ultrasónicos, está en capacidad de detectar que existe materia prima (cebada) y permite activar el motor de molienda, en segunda instancia indica el proceso de mezclado entre agua y cebada, que se convierte en malta.

Uno de los errores más comunes en la elaboración de cerveza artesanal, radica en que esta puede infectarse debido a que al realizar varias sesiones de elaboración, no se limpia a profundidad y se desinfecta los tanques de fermentación, luego de la finalización de cada una, afectando drásticamente su calidad, acentuado a que los sistemas SCADA no incorporan procesos para limpieza, se hace indispensable contar con una solución que minimice la carga bacteriana en los tanques de fermentación, se ha incorporado una solución en el SCADA, el cual a través de un sensor, en esta etapa se determina si el proceso ha terminado, en el caso que fuere afirmativo, el sistema envía una señal a la válvula de desinfección que libera a presión una solución de agua y desinfectante en tres repeticiones de 45 segundos de intervalo, con duración de 30

segundos cada una, la última repetición consiste en el envío de agua sin ninguna agente para desprender cualquier impureza, esta acción permite elaborar varios lotes de forma simultánea, garantizando su calidad y que no presente infección alguna.

En la opción de maceración, se observa que ofrece la elaboración de dos tipos de cerveza, una ligera tipo lager y otra dulce denominada ale; donde el usuario al presionar cada una de estas opciones es enviado a otra ventana según la selección, por ejemplo, si se presiona ligera ofrece la alternativa “Configuración maceración y fermentación cerveza ligera” que se muestra en la *Figura 13*.

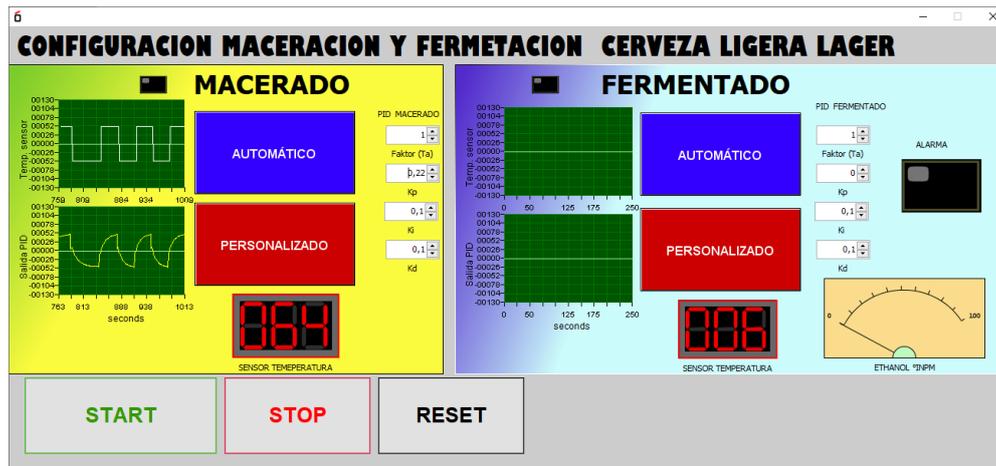


Figura 13. Selección tipo de cerveza Ligera Lager.
Fuente: Tomada de la interfaz MyopenLab

Esta configuración ofrece al usuario poco experimentado una ayuda con datos probados para maceración y fermentación simple de cerveza ligera, al presionar el botón “AUTOMÁTICO” de la sección macerado, se carga al sistema valores adecuados del proceso; por ejemplo, para elaboración de cerveza ligera, en maceración los datos predefinidos son la temperatura, el tiempo (75 minutos de cocción con intervalos de agitación de 10 min) y revoluciones del agitador en rpm, en el caso de fermentación, al presionar “AUTOMÁTICO” se transmite del sistema a la planta parámetros como temperatura, tiempo de fermentación en número de días predeterminados, se adiciona la opción de activación de alarma para el número de días de fermentación cuando esté listo, posee un indicador analógico para determinar el nivel de etanol en °INPM del material procesado, muy útil para obtener un producto final con un nivel adecuado.

Sin embargo, también se ha pensado en la posibilidad de que usuarios con experiencia puedan sacarle partido al proyecto con la posibilidad de cambiar la temperatura, modificar la respuesta PID y las revoluciones del agitador. Para ambas formas de trabajo se incorporó un control de *stop* y *reset* en el caso de posibles fallos. En esta sección se adjuntó dos graficadoras para monitorizar y modificar el proceso PID para obtener una sintonía en los procesos.

Para la opción de fabricación de cerveza dulce, segundo botón del SCADA en la *Figura 13*, al presionarlo se habilita una ventana de configuración muy parecida a la explicada anteriormente, con diferencias en rangos de temperatura y velocidad de agitación para el caso de maceración. Para el caso de fermentación se realizó un proceso similar, con la diferencia que en el tiempo de fermentado este puede llegar hasta 30 días con aviso tipo alarma.

En la actualidad existen algunos sistemas para el monitoreo y gestión del proceso de fabricación de cerveza artesanal, pero no brindan la posibilidad de modificar parámetros ya mencionados anteriormente,

limitando las posibilidades de mejorar la calidad del producto. Para la fabricación de cerveza artesanal la metodología más utilizada es prueba y error. De acuerdo con Saiz (2019) “el problema más común es que la cerveza se infecte”, por lo que esto sucede “cuando el equipo usado en la fermentación o al moverla de un lugar a otro no se limpia o desinfecta adecuadamente” (Saiz, 2017).

El proceso de fabricación de cerveza es complejo, dado que con pequeñas variaciones se puede alterar parámetros como color, sabor o nivel de alcohol, esto implica ajustar los procesos realizando algunas pruebas. En el sistema SCADA se ha planteado una opción de configuración que permite ajustar variables en cada uno de los procesos como son tiempo, temperatura, revoluciones de agitador y gramos de lúpulo con el fin de personalizar cada una de las entregas. Para salvaguardar la integridad física de los operarios es oportuno ubicar en la planta sistemas de protección frente a choques eléctricos, haciendo uso de optoacopladores o relés de estado sólido, con protectores disyuntores para la activación de las cargas inductivas y válvulas de butano, así como indicadores en el sistema SCADA que monitoricen la alimentación y actividad de la planta.

El sistema permite gestionar dos tipos de cerveza, una de tipo Pilsen y otra dulce o conocida como ale; sin embargo, al presionar el botón de ajustes del sistema SCADA, este conducirá a un menú que permite trabajar en modo automático (con valores predefinidos para una fabricación estándar) o modificar cada uno de los procesos de fabricación, por ejemplo, en el proceso de molienda podemos modificar parámetros de tiempo (rango de 1 a 500 segundos), en el mezclado se puede cambiar tiempo (rango de 1 a 250 segundos), macerado ajustar tiempo (rango de 30 a 180 min) con períodos de 10 minutos de activación y descanso, además de la temperatura (rango de 50°C a 85 °C) como las revoluciones del agitador (rango de 1 a 80 rpm), en cocción y lupulado también podemos trabajar de forma automática o definir los tres valores que nos ofrece, en temperatura (rango de 50°C a 100°C), siendo el valor automático 77°C (por defecto), el tiempo por defecto está en 20 minutos (automático); sin embargo, se puede cambiar (rango de 7 a 25 minutos), así como el lupulado (definido en gramos), en enfriado se usa un serpentín, y este ofrece la opción automático (predefinido en 25°C) con la opción de cambio (rango de 15°C a 30°C) y finalmente el proceso de fermentado, también con opción automática (definido en tiempo = 24 horas y temperatura= 22°C) y en modo personalizado se puede cambiar el tiempo de 8 a 30 horas y de 16°C a 25°C, es importante recordar que si el usuario no tiene experiencia en fabricación de cerveza artesanal, deje activadas todos los procesos en forma automática, mismo que ya viene con la opción por defecto, por tanto, el sistema es ergonómico y brinda la posibilidad de personalizar el producto final con el objetivo de modificar sus grados de alcohol, sabor y color (este último parámetro se puede ver en el menú de modificación en el recuadro izquierdo, el cual cambia el color del contenido de la botella, según se vayan modificando los parámetros al gusto del usuario).

Todo el proceso de formulación se muestra en la *Figura 14*:



Figura 14. Ajustes en formulación de cerveza.

Fuente: Tomada de la interfaz MyopenLab desarrollada por los autores

Los investigadores, al ser el trabajo desarrollado con *Open Source*, pueden modificar los valores en la programación para lograr mayor eficiencia y eficacia en el control PID, estos podrían implementar más sensores en los procesos, tener más rigurosidad en el control y en el caso de la parte de desinfección, incorporar nuevos componentes para dejar los tanques completamente limpios y sin presencia de bacterias.

De esta manera, podemos decir que existen sistemas HMI que controlan plantas de cerveza artesanal; sin embargo, no existe datos de que alguna de ellas se preocupe por la limpieza de al menos el proceso de fermentación, que es uno de los más comunes y críticos, resolviendo esta problemática, se ha incorporado al sistema un proceso de desinfección el cual es accionado por un sensor ultrasónico que se activa solo cuando se acaba todo el proceso de fabricación, y a su vez, envía la señal de activación a un rociador pulverizador a presión. En primera instancia lava a profundidad con agua, luego de 30 segundos rocía una solución desinfectante, la cual debe recargarse con regularidad en la planta durante 20 segundos, y por último, una tercera rociada de agua caliente (50°C) para liberar de impurezas para evitar la contaminación de próximas elaboraciones, todo el proceso es automático y diferencia al sistema de los que ya existen.

A continuación, se muestra el programa del HMI en la *Figura 15*.

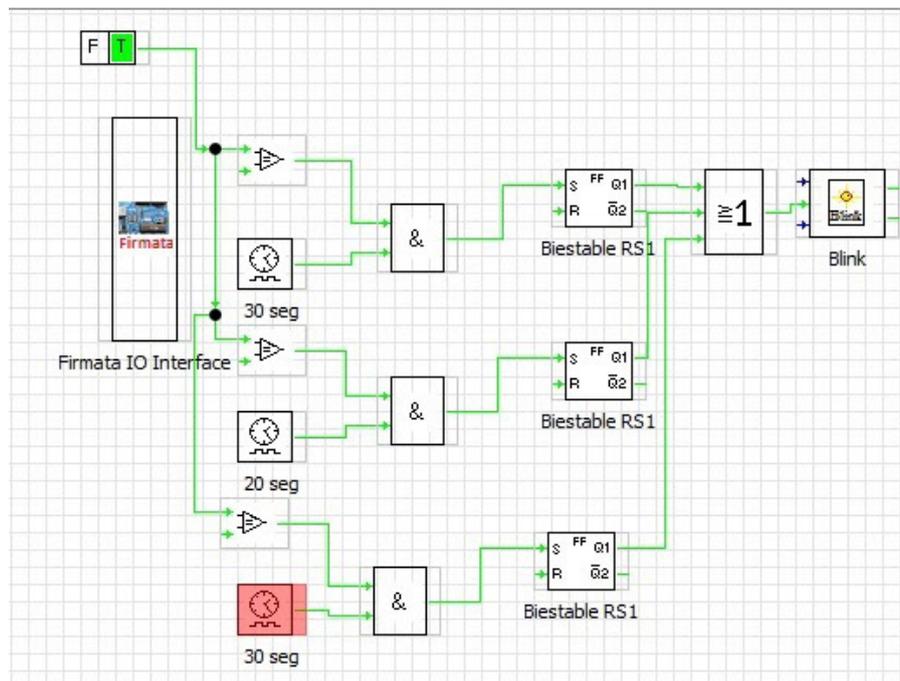


Figura 15. Programa de desinfección proceso de fermentación.
Fuente: Tomada de la interfaz MyopenLab

Una vez obtenidos los parámetros del control PID, a través de la toma de adquisición de datos, se procedió a compararlos con el software MATLAB para la validación de los mismos, en la Figura 16 se muestra la señal de salida (y_1) que corresponde exactamente al gráfico de la Figura 2 (b), por lo que se puede establecer que los datos de temperatura son correctos.

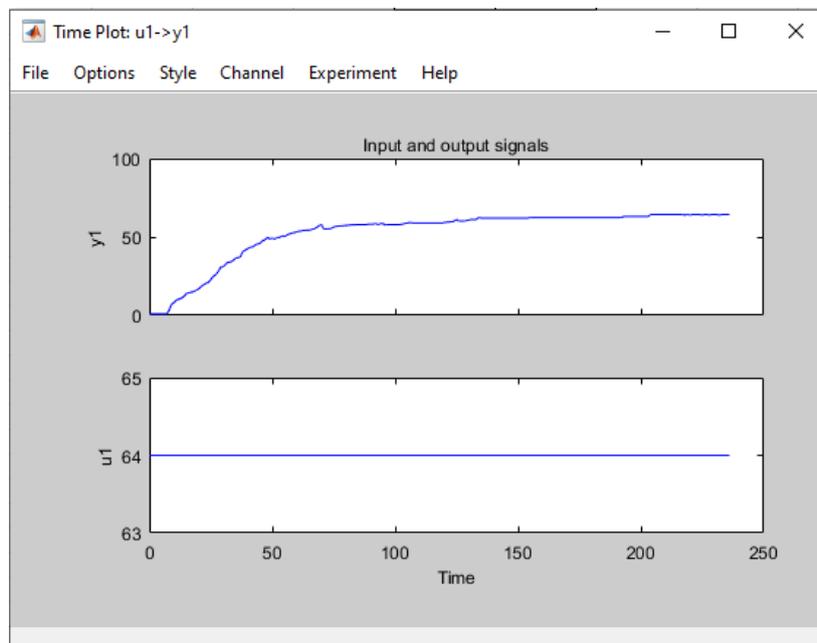


Figura 16. Gráfica de la adquisición de datos.
Fuente: Tomada de la interfaz MATLAB

Para la función de transferencia del sistema, el porcentaje de aproximación en el modelo de salida debe ser como mínimo 75%, y en la propuesta es de 87.98 %, tal y como se muestra en la *Figura 17*, lo que garantiza que el sistema propuesto cumple con los parámetros establecidos.

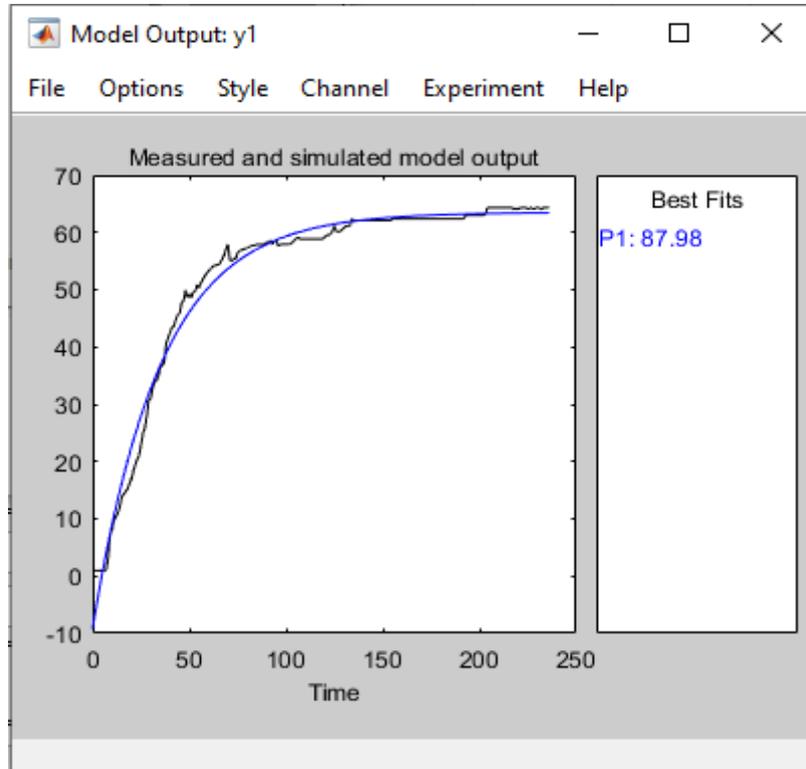


Figura 17. Salida del modelo y su porcentaje.
Fuente: Tomada de la interfaz MATLAB

La función de transferencia obtenida del sistema es la que se muestra en la *Figura 18*, se puede observar que corresponde a una función de primer orden, mientras que en la *Figura 19* se representa la gráfica correspondiente a dicha función, la misma que se estabiliza al llegar a 1.

```
>> G = tf(P1)

G =

From input "u1" to output "y1":
    0.9924
-----
    35 s + 1

Name: P1
Continuous-time transfer function.
```

Figura 18. Función de transferencia.
Fuente: Tomada de la interfaz MATLAB

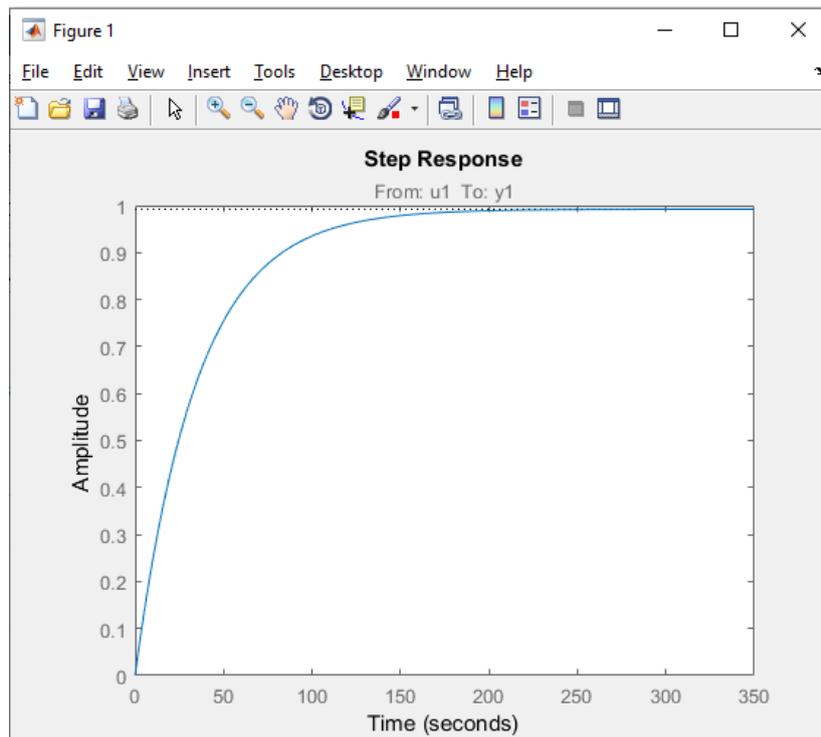


Figura 19. Gráfica de la respuesta al impulso.
Fuente: Tomada de la interfaz MATLAB

Para comparar los datos obtenidos, tanto de parámetros, como de salida del controlador, en las Figuras 20 y 21 se visualiza la gráfica que corresponde al control PID, que de igual forma llega a estabilizarse en 1, la Figura 20 es la respuesta de la herramienta PID tool de MATLAB que corrobora cómo es la respuesta del sistema al escalón unitario e indica en qué tiempo empieza a estabilizarse. Como se puede evidenciar, entre 40 a 60 segundos le toma al sistema llegar a estabilizarse, si bien no es inmediato, para el proceso de macerado y fermentado es suficiente. Normalmente MATLAB grafica a intervalos de tiempo de 10 en 10 segundos cuando la muestra no supera los 100 segundos, pero en este caso, como llega a 180 segundos, se obtienen intervalos de 20 segundos, a esto se lo denomina autoscale, gracias a esta gráfica el software nos da los valores K_p , K_i y K_d .

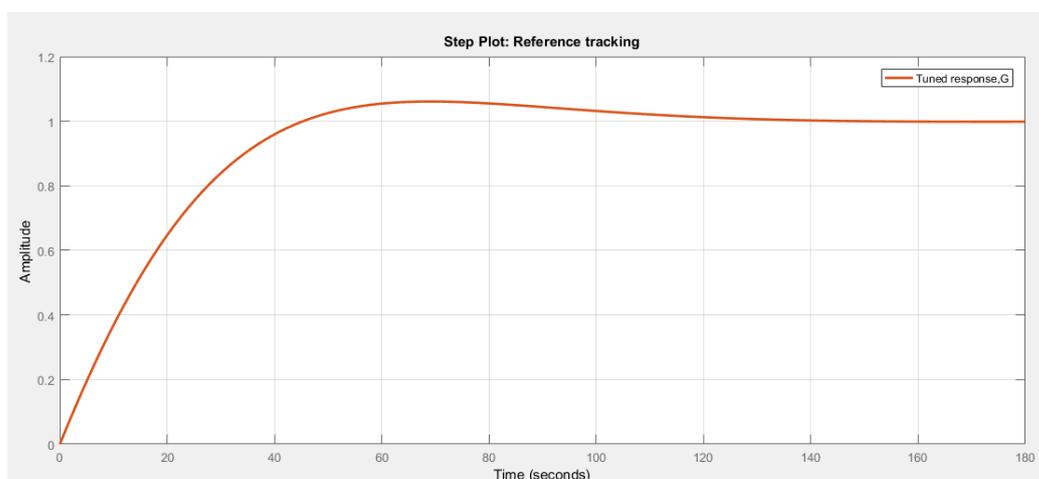
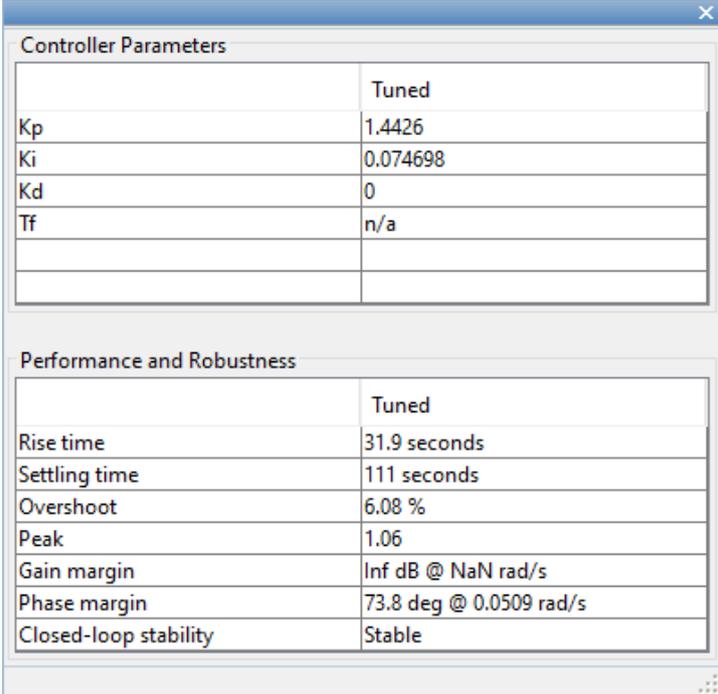


Figura 20. Gráfica del control PID.
Fuente: Tomada de la interfaz MATLAB



Controller Parameters	
	Tuned
Kp	1.4426
Ki	0.074698
Kd	0
Tf	n/a
Performance and Robustness	
	Tuned
Rise time	31.9 seconds
Settling time	111 seconds
Overshoot	6.08 %
Peak	1.06
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	73.8 deg @ 0.0509 rad/s
Closed-loop stability	Stable

Figura 21. Parámetros obtenidos
Fuente: Tomada de la interfaz MATLAB

De acuerdo a los parámetros obtenidos en MATLAB, con una predicción de variable del 87%, se corroboran los valores de sintonización del proceso PID obteniendo un mayor error en el valor KP, y coincidiendo en Ki y Kd, por su puesto se tiene un margen de error debido al reloj de ejecución del controlador, con respecto al ordenador sumado a que la lectura del sensor no es perfecta.

El sistema SCADA desarrollado es eficiente, al igual que el control PID implementado, el uso de software libre permitió cambiar el código fuente y aprovechar las prestaciones. En la propuesta se realiza el control PID en dos etapas, maceración y fermentación, lo que garantiza que en el proceso no se tenga que depender del factor humano; en trabajos como el realizado por Flores et al. (2021), se presenta una solución de automatización mediante una simulación, pero sólo en la etapa de maceración, dejando a las demás fuera de este control, también se utiliza PID, pero con software propietario.

El software *Open Source* myopenlab permitió desarrollar una interfaz amigable y de fácil acceso para el usuario y con control PID. Implementado en el sistema SCADA que se ha propuesto se visualizan las etapas del proceso de producción de cerveza y una vez que se pone en marcha la producción, se observa cada operación unitaria en el sistema, a la vez que es posible establecer más puestos o sensores de control, para tener una mayor eficiencia y eficacia de otras operaciones unitarias no contempladas en este trabajo.

El control en la variable de temperatura en la etapa de fermentación garantiza que el grado alcohólico sea el idóneo, en el trabajo de Garduño et al. (2014) se realiza la simulación del proceso de fermentación, pero se trabajó con una temperatura constante, por lo que dicho modelo se limita a simular el proceso de fermentación con esta condición.

Implementar un control PID aumenta la estabilidad y rapidez en la parte derivativa y proporcional, y brinda mayor exactitud en la parte integral, por lo que se trabajó con este tipo de controlador; en el caso de Bricio et al. (2017) se implementa un controlador únicamente del tipo PI, sintonizado por el método de asignación de polos, lo que lo vuelve inestable.

CONCLUSIONES

El método de sintonización de reguladores propuesto por Ziegler y Nichols es efectivo, si bien es cierto que no ofrece al 100% la estabilidad del sistema, es muy utilizado por su sencillez al momento de sintonizar un controlador PID. Se trata de una regla que ha sufrido modificaciones con el paso de los años, con el objetivo de mejorar los resultados. La elección de $\frac{1}{4}$ de R_d como meta de diseño por parte de Ziegler y Nichols se considera arbitraria y no garantiza la robustez del mismo; no obstante, luego de culminar la investigación se puede acotar que es posible validar y aproximar los datos obtenidos del proceso de adquisición de datos, usando un sensor de temperatura aplicando tablas de sintonización de Ziegler – Nichols, con el proceso de cálculo de constantes y gráficas, utilizando software matemático en este caso MATLAB.

La programación del software se realizó por bloques en lenguaje de alto nivel. Si bien es cierto, los fabricantes de PLC, tales como *Siemens*, *Schneider Electric* o *Rotwel Automation*, por citar las importantes, ofrecen plataformas SCADA flexibles, con control por proceso y configurables, no son totalmente libres o en algunos casos no son gratuitos, además, solo operan con PLC u otro tipo de controlador fabricados por ellos mismos, ante esta necesidad, el desarrollo del sistema ofrece la oportunidad a los fabricantes de cerveza artesanal Pilsen la posibilidad de que utilicen variados controladores, dado que el sistema SCADA es multiplataforma, y cumple con los requisitos de monitoreo y gestión por proceso y adquisición de datos en tiempo real.

Se puede agregar al software la capacidad de incluir funciones de bitácora en una base de datos, con la finalidad de guardar datos importantes de fabricaciones anteriores para mejorar las futuras. Además, es oportuno ubicar más sensores, como por ejemplo el monitoreo de la oxidación de mosto en el proceso de maceración, para mejorar el sabor. Por el momento, el software cuenta con un menú para fabricar dos ejemplares de cerveza lager de tipo simple. El software es *Open Source*, por lo que los usuarios expertos pueden agregar muchos más procedimientos, teniendo en cuenta que existe alrededor de 7 en tipo lager y 7 en tipo ale conocida y comercializadas en el mundo.

Luego de la investigación, se puede concluir que el control PID utilizado, junto a un sistema SCADA *Open Source*, permite a los usuarios monitorizar y estabilizar variables tales como temperatura, tiempo, revoluciones del agitador para cada desarrollo que lo precise, garantizando un producto final personalizado, logrando mayor exactitud y precisión, esta conclusión fue posible ya que se evaluó el procedimiento frente a otro control sin PID, obteniendo mejores resultados, tanto en tiempos de reacción, como estabilidad. PID es una herramienta muy versátil que puede utilizarse no solo en cerveza artesanal, sino también para otras líneas de producción en el campo alimenticio, metalúrgico, textil, etc., debido a sus características de estabilidad y reacción inmediata, así como la capacidad de integrarse en controladores y lenguajes de programación para inspeccionar diferentes procesos.

Podría minimizarse aún más los errores en los procesos y en el control PID utilizando redes neuronales para el proceso, logrando obtener mostos con mayor propiedad, mejores características en color y sabor, optimizando los tiempos y recursos, mejorando la experiencia del consumidor al ofrecer productos con una gran gama de degustaciones, tonos, texturas, cuerpo, entre otras, satisfaciendo las demandas de clientes exigentes que disfrutan de un producto de calidad.

En el proceso de maceración y fermentación, luego de aplicar control en la planta construida, se pudo evidenciar que el proceso PID es fundamental para el control de estas etapas, obteniendo resultados muy favorables frente a un control convencional por comparación de variables, se observó que el tiempo de estabilización en temperatura es 250% más rápido por cada trama tomada, de 226 muestras por segundo

(cantidad de muestras para la experimentación que la planta soporta), Con respecto al control PID del motor agitador en maceración, se notó una mejoría notable en la estabilidad de las revoluciones y un control exacto en rpm, reduciendo el tiempo de producción notablemente.

La mayoría de las veces se producen incidentes de infección del mosto en el proceso de fermentación, porque muchas veces o se olvida, o se pasa por alto el tema de desinfectar esta sección cuando se culmina todo el proceso y se empieza otro, en vista de esto, se solucionó incorporando una herramienta en el SCADA, que monitoriza y gestiona automáticamente la desinfección.

REFERENCIAS

- Ariza, H. M., Santa, F. M., & Gómez, E. J. (2019). Implementation of Bluetooth Protocol For Scada Systems with Open Source Tools. *In International Journal of Engineering Research and Technology* (Vol. 12, Issue 11). http://www.ripublication.com/irph/ijert19/ijertv12n11_10.pdf
- Bricio Barrios, E., López-Caamal, F., & Hernández-Escoto, H. (2017). Control de fermentación de cerveza basada en control Geométrico. Congreso Nacional de Control Automático. <http://cnca2017.fime.uanl.mx/MemoriaCNCA17/media/files/0100.pdf>
- Burini, J. A., Eizaguirre, J. I., Loviso, C., & Libkind, D. (2021). Levaduras no convencionales como herramientas de innovación y diferenciación en la producción de cerveza. *Revista Argentina de Microbiología*. <https://doi.org/10.1016/j.ram.2021.01.003>
- Colignon, M. F., & Roldán, G. E. (2018). Automatización de proceso para elaboración de cerveza artesanal. Repositorio Institucional Abierto RIA. <http://hdl.handle.net/20.500.12272/2873>
- Flores García, E., Quezada Quezada, J. C., Calderón Medina, R. V. H., & Guardado Montes de Oca, D. (2021). Control basado en PLC y monitoreo mediante HMI de la temperatura en el proceso de maceración y cocción en la elaboración de cerveza artesanal. *Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca*, 6(12), 44-49. <https://doi.org/10.29057/est.v6i12.6338>
- Garduño-García, A., López-Cruz, I. L., Ruíz-García, A., & Martínez-Romero, S. (2014). Simulación del proceso de fermentación de cerveza artesanal. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 15(2), 221–232. [https://doi.org/10.1016/s1405-7743\(14\)72212-7](https://doi.org/10.1016/s1405-7743(14)72212-7)
- González, M. (2017). Principios de Elaboración de cervezas artesanales (Primera). Lulu Enterprises.
- Lees, M., & Wang, L. (2015). Lees, M., & Wang, L. (2015, November). PID controller design for industrial beer filtration. In *2015 5th Australian Control Conference (AUCC)* (pp. 306-311). IEEE.
- Machado-Díaz, E., & Coto-Fuentes, H. (2018). Identificación e implementación de un controlador PID de temperatura basado en la curva de respuesta, (1) 4.
- Ogata, K. (1998). *Ingeniería de control moderna* (3rd ed.).
- Saiz, Y. (21 de julio de 2017). Los errores que más cometen quienes elaboran cerveza casera. LAVANGUARDIA. <https://www.lavanguardia.com/comer/sitios/20170721/424259671172/errores-fabricar-cerveza-casera.html>
- Tovar, J. A. F., Rivera, M. M., Chávez, J. A. L., Martínez, J. M. D., & Viveros, J. A. G. (2018). Simulación y control del proceso de maceración de una cervecería artesanal. *Pistas educativas*, 39(128). <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/view/1119>
- Wu, H., Su, W., & Liu, Z. (2014, June). PID controllers: Design and tuning methods. In *2014 9th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications* (pp. 808-813). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6931273/>

Zhang, J., & Liu, J. (2019, March). BP neural network PID temperature control of beer fermentation tank. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1176, No. 5, p. 052002). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1176/5/052002>

CAPÍTULO 2: TECNOLOGÍAS PARA LA SOCIEDAD

BARRERAS PARA APLICAR INDUSTRIA 4.0 EN LAS PYMES

BARRIERS TO APPLYING INDUSTRY 4.0 IN SMES

Juan Camilo Gutiérrez

Universidad de Investigación y Desarrollo, Colombia

jgutierrez11@udi.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-0386-1706>

John William Vásquez Capacho

Universidad de Investigación y Desarrollo, Colombia

jvasquez@udi.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-3710-1086>

Sebastián García Méndez

Universidad de Investigación y Desarrollo, Colombia

sgarcia15@udi.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-6077-0248>

RESUMEN

La presente investigación indaga el contexto y las principales barreras para implementar la industria 4.0 en Pymes. De la revisión se obtiene una propuesta de categorización de las principales barreras de implementación de industria 4.0 en Pymes industriales y adicionalmente se presenta una discusión de los argumentos y planteamientos sobre las implicaciones socio-económicas en los entornos, una vez que implementan la industria 4.0. Se realizó una revisión sistemática de documentos que incluía como fuente el repositorio científico Scopus. Una vez elegida la base de datos, como primer paso del análisis se establecieron los objetivos de la búsqueda, incluyendo los criterios de selección de la información. Con el fin de obtener un consolidado de documentos recientes se ingresaron las ecuaciones de búsqueda con un límite de publicación desde el 2015, con los constructos tanto en inglés como en español.

El estudio concluye que, a partir de lo expuesto por diferentes autores, no todas las barreras identificadas significan el mismo nivel de prioridad al momento de ser mitigadas y por esto la categorización propuesta permitiría mejorar las posibilidades de éxito durante la implementación de la filosofía. Adicionalmente, se recomienda que futuras investigaciones deben revisar la industria 4.0 desde la óptica de implicaciones e impactos de los stakeholders externos de las Pymes.

PALABRAS CLAVE

Industria 4.0, barreras, Pymes.

ABSTRACT

This research investigates the context and the main barriers to implement Industry 4.0 in SMEs. From the review, a proposal of categorization of the main barriers to the implementation of Industry 4.0 in industrial SMEs is obtained and, additionally, a discussion of the arguments and approaches on the socio-economic implications in the environments, once Industry 4.0 is implemented, is presented. A systematic review of documents was carried out including as a source the scientific repository Scopus. Once the database was chosen, as a first step of the analysis, the objectives of the search were established, including the criteria for selecting the information. In order to obtain a consolidation of recent documents, the search equations were entered with a publication limit since 2015, with the constructs in both English and Spanish.

The study concludes that, based on what has been exposed by different authors, not all the identified barriers mean the same level of priority at the moment of being mitigated and for this reason the proposed categorization would allow improving the possibilities of success during the implementation of the philosophy. Additionally, it is recommended that future research should review Industry 4.0 from the perspective of implications and impacts of external stakeholders of SMEs.

KEYWORDS

Industry 4.0, barriers, SMEs

INTRODUCCIÓN

El concepto de industria 4.0 fue introducido en 2011 por la Academia Alemana de Ciencias e Ingeniería (Acatech) (Buhr, 2017) y presentado por primera vez en la Feria de Hannover de 2011 por el presidente de este ente, Henning Kagermann, como una de las estrategias en el marco del programa “Horizonte 2020” (Ispizua Dorna, 2018); éste programa se creó por parte de la comisión europea en respuesta a la crisis económica que azotó a Europa en el 2008, donde éste mismo ente planteó que la recuperación económica dependía en gran medida del desarrollo industrial de las naciones (Kagermann et al., 2013).

La comisión europea reconoció que gran parte de la solución dependía del avance de la industria en los países, según Rosa García, presidenta de Siemens España, en cinco de los 10 países más competitivos del mundo el peso del Precio Interno Bruto (PIB) industrial supera el 20%. A nivel mundial, la industria representa el 16% del PIB, el 70% del comercio global y origina más de las tres cuartas partes de la investigación y desarrollo en el ámbito privado (Siemens, 2013).

Teniendo en cuenta esta realidad, esta investigación pretende dar un acercamiento sobre las principales barreras identificadas por diferentes autores, para la implementación de la industria 4.0 en las Pymes industriales. El documento se encuentra dividido en 4 secciones. La sección 1 corresponde a la introducción y un marco teórico sobre las bases de industria 4.0, la sección 2 presenta la metodología con la que se recopilaron los documentos estudiados. En la sección 3 se exponen los antecedentes investigativos y la consolidación de barreras. A partir de la sección 4 se genera una discusión de los argumentos y planteamientos identificados luego de la revisión documental, para finalmente presentar las conclusiones de la revisión.

Marco teórico

Bases para la industria 4.0

La industria 4.0 puede ser entendida como una red que enlaza productos y procesos de una línea de manufactura a través del uso de tecnología con Internet a la cabeza; sin embargo, en la actualidad no existe una definición estándar, y esto puede radicar en el hecho que la industria 4.0 no es un producto tangible, sino una idea que resume un hecho actual y que se puede mantener durante mucho tiempo. La aplicación de las tecnologías digitales en los procesos de fabricación también se ha denominado de diferentes formas “fabricación inteligente”, “industria integrada” e “Internet industrial” (Del Val Román, 2016), pese a esto, el concepto de industria 4.0 ha cobrado más fuerza que los demás desde los diferentes sectores académicos e industriales para describir el fenómeno de la cuarta revolución industrial.

Este es un concepto que inicia como una estrategia por parte del Gobierno alemán para mantener la competitividad de la industria manufacturera y tiene el nivel de nueva revolución industrial, teniendo en cuenta que, como sus antecesoras, “presenta cambios que abarcan desde los modos de producción hasta la estructura de la población, las relaciones entre comunicaciones, personas y esquemas de vida; es decir, que sus efectos y repercusiones alcanzan a todos los sectores de la realidad económica y social” (Jutglar, 1999 citado por Castresana, 2016), en sí, los cambios mencionados tiene, como finalidad no solo aumentar la producción, sino optimizarla, llevando consecuentemente a tener incrementos de productividad, ahorros en tiempos de fabricación, mejoras de la eficiencia y aumento de beneficios. En sí, puede entenderse como la creciente digitalización de toda la cadena de suministro, lo que hace posible la conexión de actores, objetos y sistemas basado en el intercambio de datos en tiempo real (Dorst et al., 2015 citado por Horváth &

Szabó, 2019), como resultado de esta interconexión, productos, máquinas y procesos con inteligencia artificial serán capaces de adaptarse a los cambiantes factores ambientales.

Dentro de los preceptos de la industria 4.0 se resaltan los objetivos de su visión: el entorno de fabricación, la creación de redes verticales, la ingeniería de extremo a extremo y la integración horizontal en toda la red de valor de productos y sistemas cada vez más inteligentes (Kagermann et al., 2013; Schlaepfer et al., 2015), los cuales fueron propuestos como hitos que marcasen el comienzo de la cuarta etapa de la industrialización.

Es importante anotar que, aunque se está adoptando la filosofía y condiciones que conlleva la industria 4.0 (I4.0), actualmente se encuentra en curso el desarrollo de la tercera revolución industrial (I3.0), caracterizada por un mayor nivel de automatización de la producción y los diferentes procesos de trabajo, lograda a través de la aplicación industrial de la electrónica y la tecnología de la información.

Torn & Vaneker (2019) proponen que las diferencias entre industria 3.0 e industria 4.0 se basan en cambiar de un nivel de automatización que pretende interconectar todos los procesos de producción de la empresa, incluyendo, entre otros, el uso de robots industriales, a un concepto de interconexión de toda la cadena de suministro, con un principio de flexibilidad y personalización de los productos, donde los equipos puedan tener la capacidad de tomar decisiones autónomas y de esta forma optimizar aún más los procesos.

Herramientas de la industria 4.0

Para llevar a cabo este proceso evolutivo, varias son las herramientas asociadas a la cuarta revolución industrial; sin embargo, no todos los autores coinciden en la misma clasificación. Es importante mencionar que estas tecnologías no nacen con la cuarta revolución industrial “muchas de las tecnologías que hoy convergen ya existían, aunque de forma embrionaria y sin la robustez que hoy aportan, la diferencia con respecto al pasado se basa en la forma en que se combinan para generar disrupciones significativas” (Basco et al., 2018). No hay actualmente un consenso de cuáles son los aspectos que involucran la industria 4.0, sin embargo, varios han sido los autores que han realizado aportes que permiten realizar un acercamiento.

Al respecto, su principal proponente Kagermann (2015) y Kargermann et al. (2013) expone que es la integración técnica de sistemas ciber-físicos en la manufactura y la logística y el uso del Internet de las cosas (IoT) y de los servicios en los procesos industriales. Esto tendrá implicaciones para la creación de valor, los modelos de negocios, los servicios derivados y la organización del trabajo.

Posada et al., (2015) y Roblek, Meško, & Krapež (2016) definieron los cinco elementos clave de la industria 4.0 como: (1) la digitalización, la optimización y personalización de la producción; (2) automatización y adaptación; (3) la interacción hombre-máquina; (4) los servicios de valor añadido y tiendas, y (5) intercambio automático de datos y comunicación, basado en tecnologías como big data, *Advanced HMI*, *3D Models and Simulations*, *Cloud Computing*, *Cyber-Physical Systems*, *Internet of Things and Services*, *Machine to Machine (M2M)*, y *Smartization*.

De acuerdo a Zezulka, Marcon, Vesely, & Sajdl (2016) el término de industria 4.0 se utiliza para tres factores: (1) la digitalización y la integración de las redes, (2) la digitalización de los productos y servicios, y (3) los nuevos modelos de mercado. Estos elementos son mutuamente interconectados.

Según Basco et al. (2018) los elementos que se destacan como pilares tecnológicos de la industria 4.0 son: (i) Sistemas de integración, (ii) máquinas y sistemas autónomos (robots), (iii) Internet de las cosas

(IoT), (iv) manufactura aditiva, (v) big data y análisis de grandes datos, (vi) computación en la nube, (vii) simulación de entornos virtuales, (viii) inteligencia artificial, (ix) ciberseguridad y (x) realidad aumentada.

Mientras que Jacquez-Hernández & López (2018) expusieron que es la utilización de nuevas tecnologías tales como sistemas ciber-físicos, Internet de la cosas e Internet de los servicios, etc., en el diseño, manufactura y comercialización de los productos, utilizando nuevos modelos de negocios que consideren la nueva dinámica entre dichas tecnologías y los empleados, así como entre las empresas, los proveedores y clientes.

METODOLOGÍA

Para el presente estudio se realizó una revisión sistemática de documentos que incluía como fuente el repositorio científico Scopus por dos razones: la primera es que a pesar que repositorios como Google Scholar, uno de los más consultados a nivel investigativo, contiene un aproximado del 92% de las citas de Scopus, con hasta un 50% de citas únicas adicionales, aproximadamente la mitad (48% -65%, según el área) de las citas únicas de Google Scholar no son de revistas, sino tesis / disertaciones, libros o capítulos de libros, actas de conferencias, materiales no publicados (como preimpresiones) y otros tipos de documentos que se pueden ver como referencias de bajo impacto científico y que en promedio es un impacto mucho menor que el de Scopus (Martín-Martín et al., 2018). Segundo, la base de datos utilizada permite la extracción de metadatos del conjunto de documentos identificados, lo que permite realizar minería de texto que se puede utilizar para construir y visualizar redes de coocurrencia de términos importantes extraídos de un cuerpo de literatura científica.

Una vez elegida la base de datos, como primer paso del análisis se establecieron los objetivos de la búsqueda, incluyendo los criterios de selección de la información. Como segunda instancia, y teniendo en cuenta los criterios de selección, se utilizaron 3 ecuaciones de búsqueda que asociaban por aparte, y en conjunto, la temática de industria 4.0 con Pymes y/o barreras. Con el fin de obtener un consolidado de documentos recientes se ingresaron las ecuaciones de búsqueda con un límite de publicación desde el 2015, con los constructos tanto en inglés como en español, obteniendo los resultados expuestos en la Tabla 1.

Tabla 1.
Resultados ecuaciones de búsqueda

PALABRA CLAVE	CANTIDAD DE DOCUMENTOS
TITLE-ABS-KEY (("sme*" OR "Pyme*") AND ("industr* 4.0" OR "I4.0" OR "cuarta revolución industrial" OR "fourth industrial revolution"))	404
TITLE-ABS-KEY (("barrie*" OR "barrer*") AND ("industr* 4.0" OR "I4.0" OR "cuarta revolución industrial" OR "fourth industrial revolution"))	203
TITLE-ABS-KEY (("barrie*" OR "barrer*") AND ("sme*" OR "Pyme*") AND ("industr* 4.0" OR "I4.0" OR "cuarta revolución industrial" OR "fourth industrial revolution"))	22

Fuente: elaboración propia

De acuerdo a la tabla anterior, se identifica que 22 documentos incluyen contenido que hace mención a la combinación entre industria 4.0, Pymes y barreras. Por último, se realizó revisión del contenido de dichos documentos para identificar aquellas investigaciones que incluían un listado de barreras con el fin de realizar una consolidación unificada de las mismas, obteniendo finalmente 7 documentos que están referenciados en la Tabla 2 de este estudio. Adicionalmente, para aprovechar el material bibliográfico recolectado, se utilizó el software VOSviewer para realizar un análisis de coocurrencia, particularmente en las palabras clave de

los 22 documentos identificados, obteniendo el diagrama de red de la *Figura 1*, el cual muestra información sobre la estructura científica del campo de investigación.

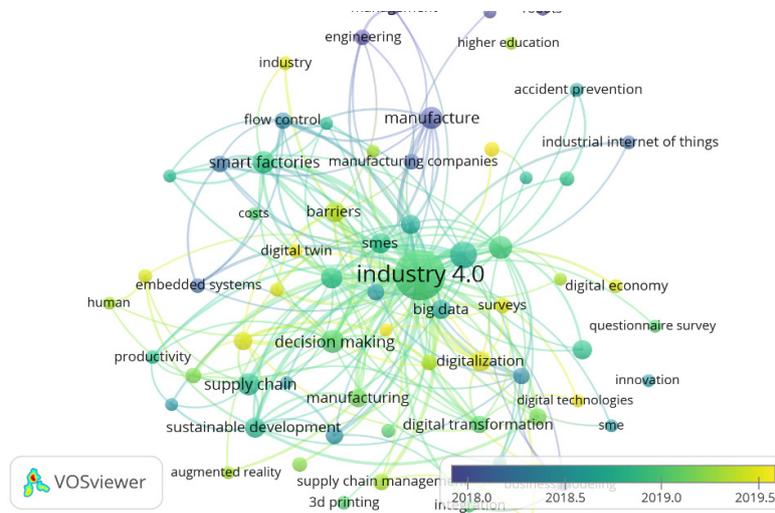


Figura 1. Diagrama de coocurrencia de palabras clave
Fuente: elaboración propia a partir del software VOSviewer

Preliminarmente, como se puede ver en el diagrama de red, los temas de investigación sobre la industria 4.0 aplicada en Pymes ha evolucionado de una descripción de las principales tecnologías y herramientas que componen la filosofía, a un abordaje de temas como cadenas de suministro sustentables, temas de administración y gestión, adopción, capacidades dinámicas y barreras. Este hallazgo es importante dentro de la investigación pues da cuenta que los documentos revisados no solo se concentran en las limitantes que pueden tener las Pymes durante la implementación, sino que amplía el espectro investigativo a un avistamiento de los impactos socio-económicos que tiene este proceso de actualización tecnológica en el entorno de las Pymes.

RESULTADOS

Barreras de las Pymes frente a la industria 4.0

Es muy importante que las gerencias de las Pymes enfoquen sus esfuerzos hacia el fortalecimiento de su capacidad tecnológica enfocada hacia la industria 4.0, como se evidencia en algunos antecedentes investigativos en esta área. Ejemplo de esto resalta una investigación realizada sobre 30 Pymes en el municipio de Celaya y áreas circunvecinas (México), con la finalidad de definir estrategias para un acercamiento práctico con el concepto de industria 4.0, donde se concluyó que los datos e información almacenada en la nube, visto como herramienta de la industria 4.0, permiten generar estrategias de innovación y competitividad para la formación de capital humano de alto nivel internacional, así como establecer estrategias de vinculación con el sector productivo y de servicios, con la visión de la cuarta revolución industrial, con la tendencia hacia el uso y aplicación de conceptos como la inteligencia de negocios, trabajo en la nube, *big data* y otras estrategias innovadoras, en pro de lo que hoy ya se denomina como industria 4.0 (Galván et al., 2017).

Sin embargo, se contrasta con un estudio similar realizado en Nueva Zelanda por Hamzeh, Zhong, & Xu (2018), donde se aplicó una encuesta semiestructurada a 50 funcionarios de diferentes empresas industriales. Los resultados de esta encuesta indicaron que el conocimiento de los fabricantes de Nueva Zelanda sobre el concepto 4.0 y sus tecnologías centrales es insuficiente. Los investigadores argumentaron que la

industria 4.0 podría transformar significativamente la forma en que operan las empresas y permitirles aprovechar nuevas fuentes de valor. “Para realizar esta transformación, las compañías de manufactura y sus gerentes deben lograr una comprensión profunda del concepto de la Industria 4.0 y explorar cómo puede agregar valor al contexto específico de sus operaciones”, sostienen los autores.

Recientemente un nuevo estudio analizó cómo la industria 4.0 desencadena cambios en los modelos de negocio de las Pymes manufactureras, mediante la realización de una investigación con una muestra de 68 Pymes alemanas de tres sectores: proveedores de automatización, ingeniería de máquinas e instalaciones, así como la ingeniería eléctrica y Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Este estudio demostró las ventajas de las Pymes como usuario y/o proveedor de industria 4.0 que tiene un gran impacto sobre sus modelos de negocio, además, varias posibilidades para la fabricación de las Pymes para innovar sus modelos de negocio a través de la industria 4.0 (Müller et al., 2018).

En vista de lo anterior se entiende que frente a la aplicación de la industria 4.0 las Pymes no presentan las mismas condiciones que las grandes industrias, es por esto que varios autores han realizado estudios en los que han identificado barreras para su implementación. La *Tabla 2* presenta un consolidado de los principales factores expuestos.

Tabla 2.
Consolidado de barreras para implementación de industria 4.0 en Pymes

Barreras	(Horváth & Szabó, 2019)	(Ingaldi & Ulewicz, 2019)	(Müller et al., 2018)	(Türkeş et al., 2019)	(Hamzeh et al., 2018)	(Rauch et al., 2019)	(Stentoft et al., 2020)
Sobre factores estratégicos y organizacionales							
Estructura organizativa inadecuada y falta de organización de procesos	x					x	
Esfuerzos organizativos sustanciales			x	x			
Falta de transferencia de conocimiento de expertos a PYMES para la implementación de I4.0						x	
La falta de un líder con habilidades apropiadas, las competencias y la experiencia	x		x	x	x	x	
La falta de una planificación consciente	x	x			x		x
La definición de objetivos, medidas y necesidad de recursos	x			x	x		x
Expectativas demasiado grandes sobre las herramientas		x					
Idea equivocada sobre el momento de implementar la herramienta		x					
Sobre los recursos humanos							
La falta de competencias apropiadas y mano de obra cualificada	x	x	x	x	x	x	x
Un mayor tiempo de aprendizaje (formación del personal)	x			x			x
Resistencia de los empleados a adquirir nuevas competencias		x	x		x	x	
Barreras idiomáticas de los empleados extranjeros		x					
Rotación continua del personal			x		x		x
Personas más apáticas, más introvertidas, entristecidas, conectadas a vida virtual al ver una extensión de ellos en la máquina de trabajo				x			

Intereses contradictorios en diferentes unidades organizativas de resistencia por parte de empleados y mandos intermedios	x			x	x	x	x
Sobre los recursos financieros							
La falta de recursos financieros	x	x	x	x	x	x	x
Demora para hacer efectivo el retorno y rentabilidad	x		x				
Dificultades para obtener un préstamo		x			x	x	
Falta de herramientas de gestión de riesgos para inversiones en nuevos procesos						x	
Sobre factores del sistema productivo							
Equipo demasiado viejo e incompatible, requieren diversos grados de retroadaptación		x	x			x	
Muy poca productividad		x					
Tamaños de lotes pequeños como un obstáculo			x				
Las bajas tasas de estandarización retrasan la implementación			x				x
Acceso al equipo adecuado y al software requerido					x	x	
Los sistemas de almacenamiento de datos no seguras la necesidad de grandes cantidades de capacidad de almacenamiento	x		x	x		x	x
Sobre la cooperación y la normatividad							
La falta de un sistema unificado	x				x		
Falta protocolo de comunicación de los sistemas de back-end para la integración	x						
La falta de voluntad de cooperación (a nivel de la cadena de suministro)	x		x		x	x	
Falta de regulaciones y procedimientos de trabajo en los países en desarrollo, la falta de legislación vigente	x			x	x	x	
Sobre las condiciones del mercado y competidores							
Disposición a pagar de sus clientes no aumenta proporcionalmente			x				
Demandas altamente individuales de los clientes dificultan la implementación de soluciones interconectadas y estandarizadas			x				
Perder clientes pues pueden recopilar información en tiempo real sobre cambios de precios y recurrir a otros proveedores con cada nueva transacción			x				

Fuente: elaboración propia

Con respecto a la primera división de aspectos, el principal factor en el que más coinciden los autores cuestiona las habilidades, competencias y experiencias de los líderes de las Pymes, lo cual redundaría en una laxa planificación y definición de objetivos y estrategias que encaminen a estas empresas para la implementación de la industria 4.0, lo cual significa una barrera muy grande, porque es desde la dirección donde nacen los esfuerzos estratégicos, más aún cuando se trata de un cambio tan robusto como la transformación digital de todos sus procesos. Respecto a la dimensión de recurso humano, se evidencia una de las principales barreras para la implementación de la industria 4.0, la falta de competencias apropiadas y de mano de obra calificada.

Desde un primer momento se ha advertido esta debilidad en el recurso humano de las Pymes, de por sí, dos barreras adicionales refuerzan esta tesis, la resistencia de los empleados a adquirir nuevas competencias y la falta de alineación entre los intereses entre los empleados y los mandos medios, factores que generan desinterés en las personas, pues no sienten que un cambio para la empresa necesariamente les afecte o les beneficie, situación que se ve reflejada en la rotación continua de personal.

En la dimensión sobre los recursos financieros se evidencia la otra gran barrera identificada por los autores y es la falta de recursos financieros, lo cual tampoco es una sorpresa, pues es bien sabido que la mayor limitante que tienen las Pymes para generar cualquier cambio estructural o estratégico es contar con los fondos suficientes, pues su capital está prácticamente invertido en la operación, sumándole a esto la segunda barrera que es la dificultad para obtener préstamos. Por tanto, todo se aboca a la gran decisión que tiene la dirección de la empresa sobre si redirigir parte del capital de la operación para ser invertido en la transformación digital, pero la demora en hacer efectivo el retorno y rentabilidad de esta inversión dificulta responder positivamente a este cuestionamiento.

Con respecto a factores en el sistema productivo, aunque se reconocen barreras concernientes a la compatibilidad y capacidad de la maquinaria actual para ser readaptada y factores productivos como los tamaños de lotes personalizados y el contraste entre estandarización y flexibilidad que deben tener los procesos, la barrera más discutida por los autores es la dificultad que tienen las Pymes para salvaguardar el volumen de datos que surgirían con la posible implementación de la industria 4.0 en su operación, más aún por contar con acceso al equipo adecuado y al software requerido.

Finalmente se identifican dos divisiones un poco menos trascendentales según los estudios realizados, como lo son la cooperación y normatividad y las condiciones del mercado y los competidores. Cabe resaltar que ambos son aspectos con más tendencia a tratarse de factores externos, por tanto son de difícil control por parte de las empresas y más de las Pymes; sin embargo, entre estos conjuntos se resalta el hecho de falta de regulaciones y procedimientos de trabajo en los países en desarrollo, la falta de legislación vigente, lo cual refleja que para la implementación de la industria 4.0 no solo se requiere un esfuerzo interno de cada Pyme, sino un impulso sectorial generado por el gobierno y las instituciones encargadas, quienes son las que deben promulgar la normatividad que pueda proteger los intereses de las Pymes evitando que queden aún más rezagadas en un mercado tan competitivo.

Con base en la compilación de barreras, en la Figura 2 se muestra una propuesta por parte de este estudio para categorizar las temáticas que deben ser mitigadas por las Pymes industriales con el fin de mejorar la probabilidad de éxito durante la implementación de industria 4.0 en sus operaciones.

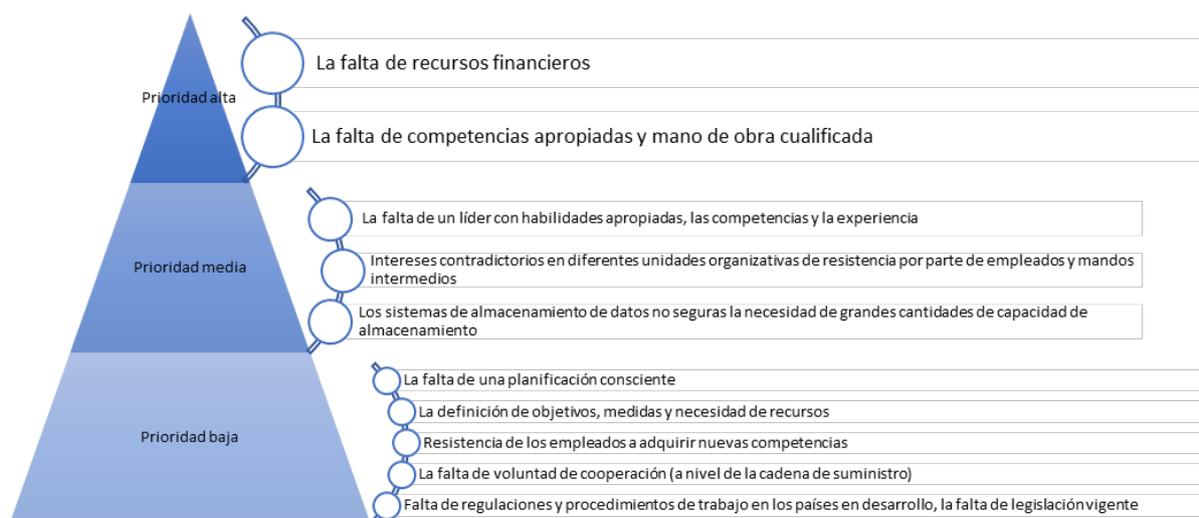


Figura 2. Categorización de principales barreras de implementación de industria 4.0 en Pymes industriales
 Fuente: elaboración propia

Cabe resaltar que la categorización aquí propuesta se realiza a partir de experiencias de países con un avance más amplio en la implementación de la industria 4.0, pese a esto, pueden ser tenidas en cuenta

como punto de partida en Pymes industriales latinoamericanas, dada la similitud de sus entornos por efectos de la globalización y los tratados comerciales entre países.

DISCUSIÓN

Como se mencionó en el análisis de la *Figura 1*, las investigaciones revisadas no solo tratan de las problemáticas internas al momento de implementar industria 4.0 en las Pymes industriales, diferentes autores argumenta, que la transformación digital va más allá de los productos y la mejora de procesos para afectar a los modelos de negocio, los aspectos de organización y gestión y los procesos de toda la cadena de suministro, creando retos importantes para las empresas (Bleicher y Stanley, 2016 citado por Horváth & Szabó, 2019), al igual que los funcionarios del Gobierno, los actores de la sociedad civil, las empresas y las ciencias tienen que desarrollar una comprensión sistemática de la innovación con el fin de marcar el comienzo de procesos integrales de digitalización para las empresas (Buhr, 2017; Ispizua Dorna, 2018).

Particularmente las Pymes son ampliamente consideradas como innovadores capaces, debido a su estructura organizativa plana y son más flexibles al cambio que las grandes empresas (Faller & Feldmüller, 2015; Müller et al., 2018). Mientras que las Pymes carecen de los recursos financieros de las grandes empresas y tienen menos capacidad en términos de capital humano para conceptualizar nuevos conocimientos (Kleindienst & Ramsauer, 2016), todavía aspiran a beneficiarse de las ventajas de I4.0. De este modo, “las Pymes están inclinadas como era de esperar para implementar soluciones intuitivas y rentables existentes que se desarrollan en otros lugares o aplicados en otras empresas” (Torn & Vaneker, 2019).

Actualmente, las mayores tasas de adopción de herramientas de industria 4.0 por éstas empresas se encuentran dentro de las tecnologías menos costosas y menos revolucionarias tales como la simulación y la computación en la nube (Türkeş et al., 2019), mientras que los sistemas Cyber-físicos, sistemas de comunicación máquina a máquina son en su mayoría campos sin explorar, como era de esperar, debido a su tiempo de retorno de la inversión y los riesgos financieros asumidos por la organización (Moeuf et al., 2018).

Según Velázquez et al. (2018) el grado de digitalización y de automatización define entonces el nivel de acercamiento a la industria 4.0; sin embargo, según los mismos autores, las Pymes aún tienen barreras que deben superar, como lo son la resistencia al cambio, el aprendizaje de las nuevas tecnologías, escuchar y aceptar la colaboración de quienes conforman la empresa. Cada organización debe reconocer la importancia de actualizar toda su operación con el fin de no perder competitividad, “las fábricas modulares que cuentan sistemas de procesos reconfigurables y automatizados tienen más que una ventaja, la capacidad de optimización de recursos, dando como resultado la mejora de la cadena de producción de cara al cliente final” (Pérez et al., 2018).

En un sentido más amplio, la cuarta revolución industrial puede ser considerada como un resultado de la expansión horizontal de las tecnología de la información y de la comunicación que se utilizan de una manera mucho más extensa que antes en todos los ámbitos, incluyendo los negocios, el Gobierno y la vida cotidiana (Kovacs, 2018). A diferencia de las discusiones de la década de 1980, hoy ya no se trata de humanos versus máquinas. Más bien, se argumenta que la mayoría de los escenarios giran en torno a una relación más compleja entre humanos y máquinas (Buhr, 2017).

Es por lo anterior que la cuarta revolución industrial no debe ser confundida con un fenómeno meramente tecnológico, el trasfondo de los cambios que suscita su aparición termina impactando todos los aspectos que confluyen para crear la sociedad moderna, “si los cambios tecnológicos no van acompañados de

cambios significativos en los sistemas socioeconómicos, la cohesión social puede debilitarse. Por lo tanto, industria 4.0 es a la vez un fenómeno tecnológico y socioeconómico” (Horváth & Szabó, 2019).

Es de allí que para contribuir al proceso de aplicación de industria 4.0 en las Pymes latinoamericanas podrían apuntar a brindar estrategias que ligen la filosofía con conceptos como desarrollo sostenible, cadena de suministro verde, y temas alrededor de la responsabilidad social empresarial.

CONCLUSIONES

Esta investigación pudo evidenciar que el tema de las barreras que enfrentan las Pymes para implementar industria 4.0 es una situación que se está presentando en diferentes lugares del mundo, coincidiendo en que, así como la tercera revolución industrial, el concepto de industria 4.0 fue creado y adaptado para las condiciones de la gran empresa, pero que cuando se evalúa frente a las posibilidades de las Pymes, se identifican factores relevantes que diezman cualquier esfuerzo realizado. En este estudio se realizaron conjeturas con respecto a las experiencias en otros países; sin embargo, es resaltable el hecho que, aun cuando se trataran de países en continentes diferentes, las barreras identificadas fueron muy similares, por tanto, podría ser extensible a países de Latino América.

Dentro de los resultados resaltables se encuentra el compilado de las principales barreras encontradas por diferentes autores, dentro de las que destacan tres aspectos, (i) las habilidades, competencias y experiencias de los líderes de las Pymes, (ii) la falta de recursos financieros y las débiles competencias y la falta de alineación entre los intereses entre los empleados y los mandos medios y altos. Sin embargo, no son factores nuevos, de por sí, son las mismas restricciones que a lo largo de la historia han tenido filosofías como el *lean manufacturing*, por tanto, mejoras que se han aplicado para las Pymes con otras metodologías, podrían ser útiles en la implementación de industria 4.0

Es importante resaltar que actualmente las Pymes se inclinan por la implementación de las herramientas menos costosas de la industria 4.0, lo cual es entendible dada la restricción de recursos e información, esta da pie para que futuras investigaciones propusieran soluciones conjuntas para la implementación de tecnologías más robustas, como por ejemplo la cooperación interempresarial, entendiendo que como se mencionó, industria 4.0 no es solo un fenómeno empresarial, sino social, y por tanto cualquier mejora que se realice redundará en mejorar directas o indirectas de las condiciones socio económicas de la comunidad que rodea a las Pymes.

REFERENCIAS

- Basco, I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero, P. (2018). Industria 4.0: Fabricando el Futuro. In Banco Interamericano de Desarrollo.
- Buhr, D. (2017). Social Innovation Policy for Industry 4.0 Buhr, D. Tübingen, Germany: Eberhard Karls University of Tübingen, 1–24. www.fes-2017plus.de
- Castresana, C. (2016). Industria 4.0. In Universidad de la Rioja. <http://zaguan.unizar.es/TAZ/EUCS/2014/14180/TAZ-TFG-2014-408.pdf>
- Del Val Román, J. (2016). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. Conferencia de Directores y Decanos de Ingeniería Informática, 1–10. <http://coddii.org/wp-content/uploads/2016/10/Informe-CO-DDII-Industria-4.0.pdf>
- Faller, C., & Feldmüller, D. (2015). Industry 4.0 Learning Factory for regional SMEs. *Procedia CIRP*, 32(Clif), 88–91. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.117>
- Galván, Asato, Godoy, Ortega, Ramirez, & Gálvan et al. 2017. (2017). La nube al servicio de las pymes en dirección a la industria 4.0. *Pistas Educativas*, 39(126), 85–98.
- Hamzeh, R., Zhong, R., & Xu, X. W. (2018). A Survey Study on Industry 4.0 for New Zealand Manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 26, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.007>
- Horváth, D., & Szabó, R. Z. (2019). Driving forces and barriers of Industry 4.0: Do multinational and small and medium-sized companies have equal opportunities? *Technological Forecasting and Social Change*, 146(June), 119–132. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2019.05.021>
- Ingaldi, M., & Ulewicz, R. (2019). Problems with the Implementation of Industry 4.0 in Enterprises from the SME Sector. *Sustainability*, 12(1), 217. <https://doi.org/10.3390/su12010217>
- Ispizua Dorna, E. (2018). Industria 4.0: ¿Cómo afecta la digitalización al sistema de protección social? Lan Harremanak. *Revista de Relaciones Laborales*, 40, 12–30. <https://doi.org/10.1387/lan-harremanak.20325>
- Jacquez-Hernández, M., & López, V. (2018). Modelos de evaluación de la madurez y preparación hacia la Industria 4.0: una revisión de literatura. *Ingeniería Industrial. Actualidad y Nuevas Tendencias*, 6(20), 61-78.
- Kagermann, H. (2015). Change Through Digitization—Value Creation in the Age of Industry 4.0. In H. Albach, H. Meffert, A. Pinkwart, & R. Reichwald (Eds.), *Management of Permanent Change* (pp. 23–45). Springer Fachmedien Wiesbaden. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6_2
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final Report of the Industrie 4.0 Working Group, April, 1–84.
- Kleindienst, M., & Ramsauer, C. (2016). SMEs and Industry 4.0 – Introducing a KPI based Procedure Model to identify Focus Areas in Manufacturing Industry. *Athens Journal of Business & Economics*, 2(2), 109–122. <https://doi.org/10.30958/ajbe.2-2-1>

- Kovacs, O. (2018). The dark corners of industry 4.0 – Grounding economic governance 2.0. *Technology in Society*, 55(July), 140–145. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2018.07.009>
- Martín-Martín, A., Orduna-Malea, E., Thelwall, M., & Delgado López-Cózar, E. (2018). Google Scholar, Web of Science, and Scopus: A systematic comparison of citations in 252 subject categories. *Journal of Informetrics*, 12(4), 1160–1177. <https://doi.org/10.1016/j.joi.2018.09.002>
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118–1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>
- Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K. I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132(January), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.019>
- Pérez, E., Salvador, O., & Solano, J. (2018). Industria 4.0 ¿el final de las pymes? *Revista Ciencia Administrativa Número Especial Congreso CIFCA*, 195–210.
- Posada, J., Toro, C., Barandiaran, I., Oyarzun, D., Stricker, D., De Amicis, R., Pinto, E. B., Eisert, P., Döllner, J., & Vallarino, I. (2015). Visual Computing as a Key Enabling Technology for Industrie 4.0 and Industrial Internet. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 35(2), 26–40. <https://doi.org/10.1109/MCG.2015.45>
- Rauch, E., Dallasega, P., & Unterhofer, M. (2019). Requirements and Barriers for Introducing Smart Manufacturing in Small and Medium-Sized Enterprises. *IEEE Engineering Management Review*, 47(3), 87–94. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2931564>
- Roblek, V., Meško, M., & Krapež, A. (2016). A Complex View of Industry 4.0. *SAGE Open*, 6(2). <https://doi.org/10.1177/2158244016653987>
- Schlaepfer, R., Koch, M., & Merkofer, P. (2015). Industry 4.0 Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. *Deloitte AG*, 1–32. https://doi.org/10.1057/9780230514027_2
- Siemens. (2013). Claves de la competitividad de la industria española.
- Stentoft, J., Aadsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. (2020). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. *Production Planning and Control*, 0(0), 1–18. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>
- Torn, I. A. R., & Vaneker, T. H. J. (2019). Mass Personalization with Industry 4.0 by SMEs: a concept for collaborative networks. *Procedia Manufacturing*, 28, 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.022>
- Türkeş, M., Oncioiu, I., Aslam, H., Marin-Pantelescu, A., Topor, D., & Căpuşeanu, S. (2019). Drivers and Barriers in Using Industry 4.0: A Perspective of SMEs in Romania. *Processes*, 7(3), 153. <https://doi.org/10.3390/pr7030153>
- Velázquez, V., Martínez, A., & Díaz de León, I. (2018). Impacto de la industria 4.0 en las PYMES de Coacalco, estado de México. *Revista Ciencia Administrativa Número Especial Congreso CIFCA*, 5, 211–222. <https://www.uv.mx/iesca/files/2019/01/Vol5-2018-Especial.pdf#page=223>

Zezulka, F., Marcon, P., Vesely, I., & Sajdl, O. (2016). Industry 4.0 – An Introduction in the phenomenon. IFAC-PapersOnLine, 49(25), 8–12. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.002>

ESTUDIO SOBRE LAS REDES COMUNITARIAS Y OPERADOR MÓVIL DE INFRAESTRUCTURA Y SU VIABILIDAD DENTRO DEL MARCO REGULATORIO DE LAS TELECOMUNICACIONES EN EL ECUADOR

STUDY ON COMMUNITY NETWORKS AND MOBILE INFRASTRUCTURE OPERATOR AND THEIR VIABILITY WITHIN THE TELECOMMUNICATIONS REGULATORY FRAMEWORK IN ECUADOR

José Javier De la Torre Guzmán

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

jdelatorre@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1948-6261>

Martha Elizabeth Salazar Jácome

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

msalazar@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6710-9399>

Nancy del Rocío Velasco Erazo

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador

ndvelasco@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-7319-5756>

RESUMEN

La brecha digital sigue siendo una problemática para Latinoamérica, en donde existen marcadas diferencias en la penetración al acceso al Internet entre zonas rurales y urbanas. La búsqueda de un Internet accesible, abierto y asequible; así como, el acceso universal a las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), va a permitir que los individuos se desarrollen y se logren beneficiar de la sociedad de la información. Una alternativa para disminuir los problemas digitales y el analfabetismo digital en los lugares más inhóspitos, es la iniciativa de la redes comunitarias y operador móvil de infraestructura, de esta manera, el presente estudio plantea varios cambios dentro del Marco Regulatorio de las Telecomunicaciones vigentes en el Ecuador, para que este ecosistema pueda desarrollarse sin ningún problema en el país.

PALABRAS CLAVE

Red comunitaria, Internet, telecomunicaciones, conectividad, infocentros

ABSTRACT

The digital divide continues to be a problem in Latin America, where there are marked differences in Internet access penetration between rural and urban areas. The search for an accessible, open and affordable Internet, as well as universal access to Information and Communication Technologies (ICT), will allow individuals to develop and benefit from the information society. An alternative to reduce digital problems and digital illiteracy in the most inhospitable places, is the initiative of community networks and mobile infrastructure operator, thus, this study proposes several changes within the Telecommunications Regulatory Framework in force in Ecuador, so that this ecosystem can develop without any problem in the country.

KEYWORDS

Community network, Internet, telecommunications, connectivity, infocenters

INTRODUCCIÓN

“Las redes comunitarias son redes de propiedad y gestión colectiva de la comunidad, sin finalidad de lucro y con fines comunitarios; se constituyen como colectivos, comunidades indígenas u organizaciones de la sociedad civil sin fines de lucro, que ejercen su derecho a la comunicación, bajo principios de participación democrática de sus miembros, equidad, igualdad de género, diversidad y pluralidad” (Baca, Huerta, Belli, & Velasco, 2018).

Según lo establecido por UIT-D 19 del 2010 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, la misma que fue renovada en el 2017 en la cumbre de Buenos Aires Argentina que, trata sobre “Telecomunicaciones para áreas rurales y remotas”, se indica la importancia que deben tener las políticas gubernamentales para el desarrollo de la Telecomunicaciones/TICS en las zonas rurales y distantes de los países en desarrollo, con el fin de disminuir el analfabetismo digital y la falta de conocimiento informáticos, considerando que los beneficios que representa las telecomunicaciones para todos maximiza el desarrollo social, aumenta el rendimiento y garantiza los derechos humanos, para garantizar el acceso comunitario sin fines de lucro a las telecomunicaciones y sus beneficios puedan utilizarse en prestación de servicios comunitarios. Los pequeños empresarios, los gobiernos locales, las escuelas tienen su lugar en este proceso; para beneficiar con conectividad a las áreas rurales (Egido, 2017)

La Recomendación UIT-D 20 del 2014 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, que trata sobre “Iniciativas de política y reglamentación para el desarrollo de las telecomunicaciones/TIC/banda ancha en zonas rurales y distantes” (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2014), juega un papel importante para brindar servicios, dar a conocer la cultura, calidad de vida mejorada, con desarrollo económico y adopción de un marco político y jurídico para compartir la infraestructura (fibra óptica, torres/BTS, microondas) en zonas rurales y distantes, lo que debería ser considerado por países en desarrollo (Unión Internacional de Telecomunicaciones, 2014); recomienda a los gobiernos y reguladores de los países en desarrollo que adopten políticas que aceleren el proceso de telecomunicaciones con manejo de banda ancha en zonas rurales y poco accesibles, para dar acceso a diversas ciber-aplicaciones en temas de gobierno electrónico, telesalud, teleducación, ciber-agricultura, etc., todo esto considerando los índices de pobreza de cada país.

METODOLOGÍA

Para la elaboración del presente capítulo se empleó una metodología deductiva – exploratoria (Hernández, 2016), en vista que ha sido necesario investigar varias fuentes primarias, como libros, artículos tecnológicos, revistas, etc. Lo que ha permitido obtener información relacionada a las diferentes iniciativas de redes comunitarias en Latinoamérica, que han servido para conocer su modelo de funcionamiento y marco regulatorio que ayudarían a llevar Internet gratuito a sectores menos favorecidos y a un costo realmente bajo.

RESULTADOS

Problemáticas y desafíos de las redes comunitarias

En la Cumbre de Redes Comunitarias llevada a cabo en Argentina en el 2018 (Declaración_CLRC-2018, 2018), se generaron varias recomendaciones que permiten identificar varios factores que ponen en riesgo el desarrollo de las redes comunitarias; en el mismo sentido, estas van de la mano con las recomendaciones de la Conferencia Interamericana de Telecomunicaciones (CITEL) (Res. CITEL 268/2016, 2016) y de la Unión

Internacional de Telecomunicaciones (UIT) (RECOMENDACIÓN UIT-D 19 , 2010), que indican que el marco regulatorio en la región necesita de una actualización para dar cumplimiento en materia de fomento a los prestadores sin fines de lucro que operan en zonas rurales y desatendidas.

A continuación, se puntualizan las principales problemáticas y desafíos que presentan las redes comunitarias:

- **Legalización.** - Las redes comunitarias son organizaciones prestadoras de un servicio sin fines de lucro, forman un conjunto de barreras en la implementación y despliegue de estas; falta de mecanismos claros que permitan acceder a licencias mediante un trato adecuado por parte del Estado.
- **Flexibilidad en la concesión de licencias de espectro y registro del servicio.** - Se requiere que la administración del espectro radioeléctrico y registro de servicios contemple usos sociales; y, que específicamente en la adjudicación de espectro sea a través de procesos claros, ágiles y proporcionales a la realidad socioeconómica de la comunidad.
- **Aspectos financieros.** - Se debería definir la eliminación o reducción de las cargas económicas regulatorias derivadas del licenciamiento del espectro y de los registros o autorizaciones para la prestación del servicio; mecanismo fundamental para que existan las redes comunitarias.
- **Homologación de equipamiento.** - Es necesario normar los procesos de comprobación técnica del equipo desarrollado por las redes comunitarias, o en su defecto homologar las tecnologías no utilizadas masivamente en operaciones comerciales.
- **Interconexión libre.** – Se requiere de leyes y reglamentos que sean políticas de Estado, para garantizar la interconexión libre y gratuita, bajo patrones técnicos no discriminatorios, de las redes comunitarias en comparación a otro tipo de red pública o privada.
- **Ancho de banda ocioso.** - Existen instituciones académicas que permiten a las redes comunitarias el acceso al ancho de banda en horarios donde el recurso no está siendo utilizado, este tipo de acuerdos podrían ser adoptados entre las redes comunitarias con instituciones públicas y privadas, lo cual permitiría el uso eficiente del recurso, favoreciendo el desarrollo de este tipo de redes.
- **Extensión de puntos de acceso.** - Impulsar eventos para implementar mecanismos de acceso en sectores con escasa conectividad, como complemento para permitir que los hogares tengan acceso a conectividad y otros puntos de interés para el sector local.
- **Acceso a infraestructura.** – Acceso gratuito a torres, postes, ductos, etc., representa un costo de inversión necesario para los operadores que lo despliegan o los habilitan, y es considerado un valor operativo alto para el acceso de las redes comunitarias.
- **Desarrollo de infraestructura complementaria para ampliar la cobertura.** - Obligación de despliegue de redes físicas de *backbone* y *backhaul* por parte de los operadores de servicios establecidos hacia sitios cercanos de infraestructura pasiva, como parte de sus obligaciones de planes de expansión y servicio universal.
- **Optimización y simplificación de los procesos.** – El uso de licencias genera procesos altamente burocráticos, creando una barrera por desconocimiento de procesos legales, jurídicos y políticos, en

relación al funcionamiento de las instituciones, provocando costo en tiempo, dinero y esfuerzo que interfieren en el desarrollo de un proyecto comunitario de esta magnitud.

- **Apertura del acceso indirecto a través del mercado secundario.** – Cuando se otorgan licencias, pero los operadores no cuentan con rubros económico para desarrollar infraestructura, se puede optar por acuerdos secundarios que incrementen la eficiencia de su uso, garantizando una buena relación entre la empresa comercial y las redes comunitarias.
- **Financiamiento.** - Una oportunidad de financiamiento para las redes comunitarias sería mejorar el acceso a los recursos del Fondos de Servicio Universal (FSU), pero se deja constancia que, en el Ecuador, de acuerdo con la constitución, estos recursos ingresan directamente al presupuesto del Estado, lo cual constituye una barrera legal.

Iniciativas de redes comunitarias en Latinoamérica

A continuación, se describen algunos ejemplos de implementaciones de redes comunitarias y operador móvil de infraestructura realizadas en Latinoamérica, para ponernos en el contexto de estas.

México – Telecomunicaciones Indígenas Comunitarias

Telecomunicaciones Indígenas Comunitarias (TIC-AC) es una asociación civil que genera redes comunitarias de telefonía celular que son operadas por grupos de indígenas del estado de Oaxaca en México. Esta iniciativa se basó en la política pública para el Desarrollo de Tecnologías de la Información y Comunicación en Comunidades Indígenas de la UIT (Bloom, 2018), donde se visualizan 3 niveles capaces de satisfacer las necesidades humanas, con mecanismos específicos aptos para su entorno económico, como lo plasma la *Figura 1*.



Figura 1. Tres niveles de economía
Fuente: Blom (2018)

Estas recomendaciones indican básicamente que la falla fundamental de llevar telecomunicaciones a zonas desatendidas, es intentar que empresas, con una economía muy amplia, trabajen en una economía de subsistencia, donde sea necesario acceder a subsidios.

TIC-AC impulsa proyectos con este enfoque económico, garantiza que la red sea operada por personas eficiente en cada uno de los segmentos, enfocados a la subsistencia local.

Hoy por hoy, TIC-AC trabaja con 8 comunidades, y más de 3000 hogares, donde el usuario debe pagar 2 dólares mensuales por servicios de mensajería y llamadas en la comunidad, 60% de lo recaudado se queda en la comunidad, y lo demás se invierte nuevamente en la operación de la red.

Elementos del modelo de la red comunitaria

Este cuenta con 4 elementos indispensables para su operación:

1. **Base organizativa.** – Maneja esquemas comunitarios bajos, otorga servicios de mantenimiento y formación.
2. **Base tecnológica.** – Tecnología con precios accesibles, da mantenimiento a comunidades y organizaciones.
3. **Base económica.** – Presta servicios comunitarios a bajo costo, un mediante esquema basado en desagregación de servicios.
4. **Base técnica.** – Opera con servicios de mantenimiento y desarrollo de aplicaciones, basado en infraestructura material y humana, adquiridas en la comunidad.



Figura 2. Esquema de operación de la telefonía celular comunitaria
Fuente: Baca et al. (2018)

El modelo comunitario de telefonía celular (Figura 2), trabaja con visión social, económica y cultural, en miras de beneficios comunitarios, cuyos ingresos sean invertidos en el mismo bien o servicio. Su estructura puede ser una cooperativa que permite integrar a comunidades para dar servicio de telecomunicaciones y ser dueñas de la misma red.

Marco regulatorio en México

Mediante su constitución reformada en 2013 y Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión en el 2014, se define dos tipos de concesión en México:

- Permisos de uso comunitario para organizaciones sin fines de lucro, constituidas en base a participación ciudadana, labor social, principios de equidad y pluralidad.
- Prioridades para uso social indígena para promocionar la preservación de su lengua y cultura, conocimiento y tradiciones ancestrales.

El Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) regula las telecomunicaciones en México, emite lineamientos para obtener el Programa Anual de Uso y Aprovechamiento de Bandas de Frecuencias del Espectro Radioeléctrico (PABF). Donde se reserva de forma anual pequeños segmentos de bandas de frecuencias para prestar servicios de telecomunicaciones y radiodifusión a zonas rurales que no cuentan con conectividad.

Perú –Proyecto Río Napo para innovación Social con conectividad y salud

La Fundación EHAS y la Pontificia Universidad Católica del Perú se encargaron de desplegar e implementar la infraestructura de red para el proyecto de la red Napo de telemedicina. Para desplegar los servicios 3G involucraron en el proyecto a la empresa Mayu Telecomunicaciones, que cuenta con el permiso de concesión como Operador de Infraestructura Móvil Rural (OIMR), otorgado por el organismo regulador de Perú; esta figura según la legislación del Perú, permite que otros operadores brinden servicio en áreas rurales y de interés social, llegando a un acuerdo con el Operador Móvil de Red (OMR). Gracias a esta alianza, Mayu se encargará de mantener la red operativa, las comunidades tendrán acceso a servicios 3G, y los establecimientos de salud podrán emplear herramientas de telemedicina mediante la red desplegada.

La red cubre una longitud aproximada de 400 km de distancia en la cuenca del río Napo, proporcionando servicios de acceso a telefonía, Internet y datos, logrando el contacto de 16 centros y puestos de salud con Iquitos-Perú, donde se encuentran la Dirección Regional de Salud y el Hospital Regional, aumentando de esta forma la sostenibilidad y el impacto de la red (Benitez & González, 2010).

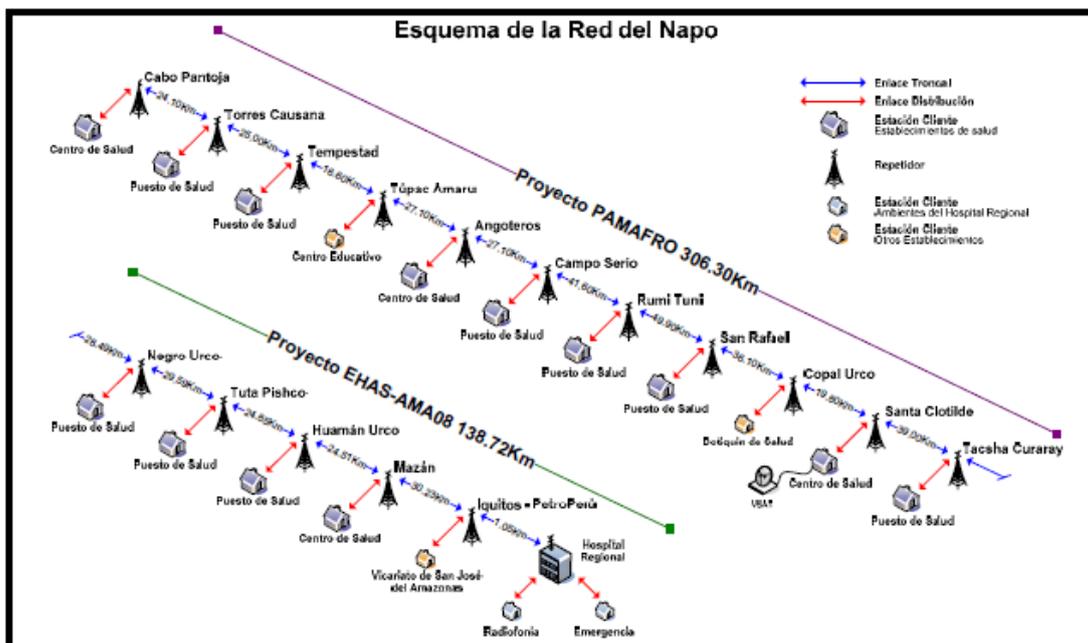


Figura 3. Esquema de la red de telemedicinas en las cuencas de río Napo en Perú
Fuente: Benitez & González (2010)

El proyecto permite realizar comunicaciones de voz y datos a altas velocidades con acceso a Internet, con lo cual ha agilizado las coordinaciones en evacuaciones de pacientes, la obtención de información epidemiológica, la coordinación en la obtención de vacunas y medicamentos a tiempo, así como, mejorar el diagnóstico y tratamiento de pacientes mediante interconsultas remotas.

Elementos del modelo de la red Napo

En el Perú se ha definido una nueva figura legal que permite desplegar telefonía e Internet, esta figura es el Operador de infraestructura Móvil Rural (OIMR), la cual permite a estos tipos de operadores utilizar las frecuencias de los Operadores Móviles que disponen de una concesión de uso de frecuencia y que actualmente no están siendo utilizadas en zonas de interés social, para lo cual tienen que llegar a un acuerdo y firmar un contrato con el Operador Móvil.

A petición del OIMR, el ente regulador del Perú puede intervenir en los casos que no se llegue a un acuerdo, podrá establecer los términos del contrato entre el OIMR y OMR, si estos no llegan a un acuerdo. El OIMR será el encargado de extender la cobertura de los grandes operadores hacia zonas rurales de interés social y que no cuenten con cobertura, desplegando y manteniendo su propia red (torres, enlaces troncales, estaciones bases).

Modelo de Funcionamiento de la Red OIMR

El modelo de funcionamiento consiste en brindar el servicio de telemedicina a zonas de la población asentadas a las orillas del río Napo en Perú, con el objetivo de mejorar las condiciones de salud de las comunidades de la localidad, a través del uso apropiado de las TIC en centros y puestos de salud, permitiendo el diagnóstico de los pacientes a distancias, mediante los servicios de telemedicina, tales como:

- Tele-estetoscopia
- Tele-dermatología
- Tele-ecografía

Otro beneficio que permite este proyecto, a parte del servicio de telemedicina, es que permite proveer el servicio de telefonía móvil y datos 2G, 3G y 4G. Actualmente, la empresa MAYU, aprovechando la red de telemedicina existente, se encargó de extender la red de un gran operador móvil que no estaba interesado de invertir en infraestructura en esa zona de la población.

A continuación, en la *Figura 4* se muestra un esquema de red del *backhaul* del proyecto de telefonía móvil.

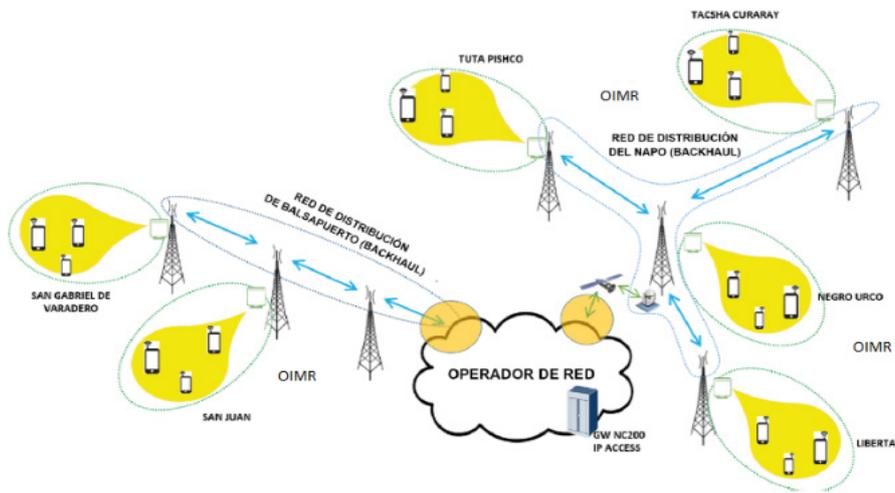


Figura 4. Esquema de red del Backhaul
Fuente: HEAS (2020)

Marco regulatorio en Perú

Perú cuenta con el término de “licencia libre”, enfocadas a lugares de interés social donde no es necesaria la asignación de los espectros radioeléctricos. Lo que sí se necesita para aplicar a ésta es un título habilitante.

En la Resolución No. 825-2014 MTC/03, manifiesta que el Operador de Infraestructura Móvil Rural (OIMR) (Figura 5), está en capacidad de trabajar en estaciones radioeléctricas dentro de las zonas rurales, donde ninguna Red OMR posea una red propia o su infraestructura, tampoco tiene usuarios finales propios, no maneja una numeración, tampoco asignación de espectro radioeléctrico para servicios móviles. Cuenta con infraestructura propia de telecomunicaciones en áreas rurales o lugares de preferente interés social, que llegan a un acuerdo con un OMR para poder utilizar el espectro que no está siendo utilizando y poder extender el área de cobertura.

Debido a que no existe un acuerdo entre OIMR y OMR, el ente regulador de Perú, Organismo Supervisor de Inversión Privada en Telecomunicaciones (OSIPTEL), puede establecer las condiciones a las que se deberán sujetar los operadores.

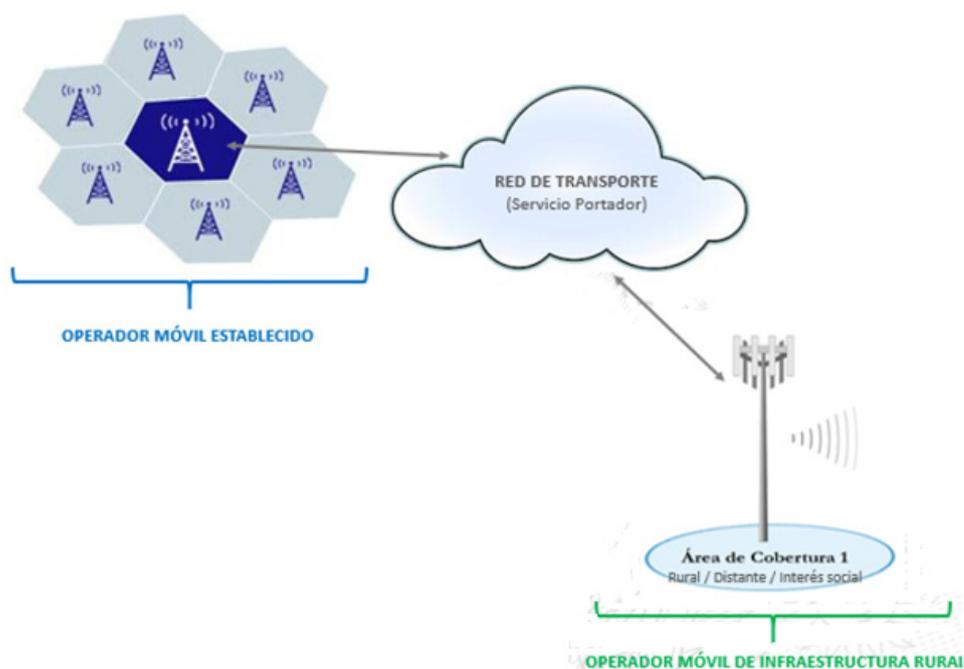


Figura 5. Operador de infraestructura móvil rural interconectado con un operador móvil de red.
Fuente: elaboración propia

Argentina – redes comunitarias tipo mesh para acceso a Internet

Uno de los proyectos más exitosos de comunicaciones comunitarias en Latinoamérica es Altermundi (Altermundi, 2018), la mayoría de proyectos hechos en Argentina ha conseguido avances importantes para el continente, aportando conocimiento organizacional y técnico, software (*Libremesh*) y hardware (*Librerouter*) para facilitar el despliegue de redes comunitarias (Taborda, 2017).

Todo este esfuerzo ha contribuido con software, hardware, marcos de regulación y políticas adecuadas en el campo de las telecomunicaciones, que se puede realizar desde lo local para transformar los modelos actuales de interconexión y transmisión de información.

El proyecto Quintana Libre, creado por Altermundi, otorga de Internet a la población de José de la Quintana y a otros pueblos del sudoeste de Córdoba mediante el empleo de software libre y hardware de bajo costo, es posible crear una red descentralizada tipo mesh, creada con *routers* WiFi convencionales y un firmware especial que modifica su funcionalidad. Esta red es empleada en comunidades que logran tener acceso a Internet en zonas donde no hay servicio comercial y aprovecha la red *backhaul* de la universal de Córdoba como red de transporte para acceso a Internet, la cual no es utilizada todo el tiempo por la universidad (Altermundi, 2018).

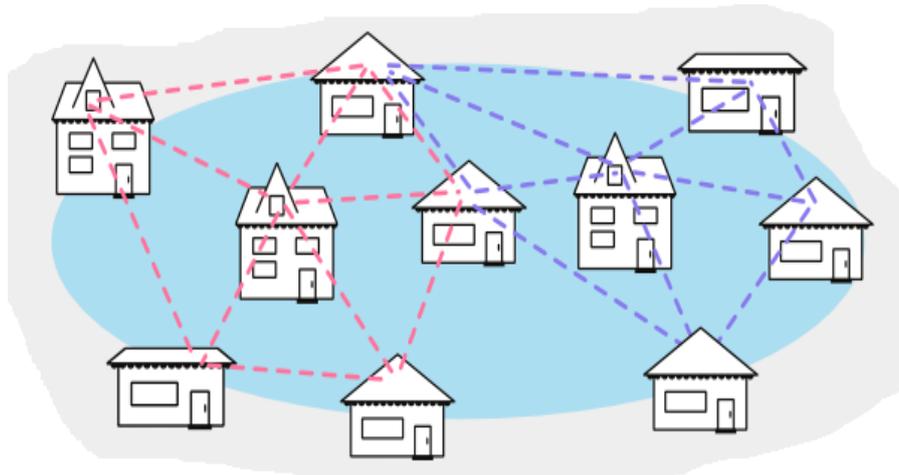


Figura 6. Red inalámbrica tipo Mesh
Fuente: Elaboración propia basado en Commotion (s.f)

La idea es que la red se despliegue de techo en techo (Figura 6), sin que dependa de un nodo central, lo que permitió llevar la conexión a cada rincón del pueblo y que la familia que quiere sumarse a la red tenga la posibilidad de hacerlo, no cuesta fortunas construir una torre para tener visibilidad con algún proveedor de sus alrededores.

La participación de la comunidad es fundamental para mantener en orden cada nodo, y para pagar por el hardware necesario. La red será quien indique cómo se desplegará, y cómo se mantendrá. Los miembros de la red tienen a su cargo el nodo, y entre todos deben afrontar el pago de los costos (conexiones entre casas alejadas, reparaciones de la red o quema de un equipo, actualización de las antenas WiFi, etc.).

Elementos del modelo de la red comunitaria

Las fortalezas de una red comunitaria son:

- **Propiedad colectiva.** – La infraestructura (antenas, routers, cableado, etc.) les pertenece a los miembros de la red y de la comunidad que la despliega.
- **Gestión social.** – La administración de la red está a cargo de los miembros de la red, las decisiones se toman entre todos.
- **Diseño accesible.** – El uso y funcionamiento de la red y sus complementos es pública y accesible, así todos aprenden y difunden lo aprendido.
- **Participación abierta.** - Significa que cualquier persona puede sumarse o extender la red, respetando su diseño, sus principios y su forma de organización.

Modelo de funcionamiento de la red comunitaria

Este tiene estas características de identidad:

- **Libre uso.** – Permite libre tránsito de servicios y contenidos, mientras no afecte el buen funcionamiento de la red.

- **Neutralidad.** - Tráfico de datos igualitario, no se discrimina su contenido, o plataforma, mucho menos la aplicación o tipo de equipamiento utilizado para el acceso.
- **Libre interconexión.** - Interconexión entre redes garantizada, siendo el flujo de datos libre, neutral y gratuito en ambos sentidos.
- **Libre tránsito.** - Permite el tráfico de datos entre redes, es destinado a otras redes con las que mantienen acuerdos similares. Los datos atraviesan por una red libre hasta llegar a otra, incrementando el alcance de la red.

Marco regulatorio en Argentina

Con Resolución 4958/2018, Argentina define como redes comunitarias a la infraestructura gestionada por sus propios usuarios o entidades sin fines de lucro que los agrupen, ampliándolas mediante la incorporación de nuevos usuarios o conectándose con redes comunitarias vecinas en poblaciones de no más de 5000 habitantes.

Esta resolución ayuda a adquirir licencias en el marco de lo establecido en su Reglamento de Licencias para Servicios de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, bajo un nuevo registro de titulares de redes comunitarias. Además, las exime del pago del arancel por concepto de licencia.

Se trata de un nuevo registro correspondiente a titulares de redes comunitarias. Actualmente no hay bandas identificadas o planificadas, las bandas de frecuencias serán las habituales de uso compartido empleadas para acceso a Internet de los prestadores (2.4 GHz / 5 GHz).

Problemáticas e iniciativas de redes de índole comunitario en el Ecuador

En el marco regulatorio actual del Ecuador no se encuentran definidas las redes comunitarias como una solución que permita a las comunidades y población vulnerable del país acceder a las TIC, pero si contempla varios derechos y obligaciones por parte del Estado donde se garantiza la universalidad al acceso a las TIC en zonas rurales y desatendidas del país, lo cual permitiría apalancar la existencia de este ecosistema.

En el artículo 89 de la Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT) (Asamblea Nacional del Ecuador, 2015) indica que el "Servicio Universal constituye la obligación de extender un conjunto definido de servicios de telecomunicaciones a todos los habitantes del territorio nacional con condiciones mínimas de accesibilidad, calidad y a precios equitativos, con independencia de las condiciones económicas, sociales o la ubicación geográfica de la población. El Estado promoverá la prestación del Servicio Universal para la reducción de las desigualdades y la accesibilidad de la población a los servicios y a las tecnologías de la información y las comunicaciones, de conformidad con lo dispuesto en esta Ley, sus reglamentos y el Plan de Servicio Universal"

En el Plan de Servicio Universal (PSU) 2018-2021 uno de sus objetivos es el de masificar y universalizar el acceso a las redes públicas de telecomunicaciones, el cual tiene 3 aristas para poder lograrlo.

1. La primera es promover el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones en áreas rurales.
2. La segunda es la de incentivar la migración a redes de nueva tecnología

3. Y, por último, es la de asegurar el acceso universal a las TIC en poblaciones rurales.

En esta última, la meta es disminuir el analfabetismo digital y promover el uso de la TIC en áreas desatendidas y que no tienen acceso a las mismas, para lo cual el PSU plantea dos líneas de acción:

- Ampliación de la red de Infocentros.
- Fomentar el establecimiento de nuevos puntos de acceso libre de WiFi.

En el artículo 34 del Reglamento para Otorgar Títulos Habilitantes para Servicios del Régimen General de Telecomunicaciones y Frecuencias del Espectro Radioeléctrico, preceptúa el título habilitante de Registro de Servicios y define qué tipos de servicios necesitan obtener este título habilitante, así como da la potestad a la Agencia de Regulación y Control de la Telecomunicaciones (ARCOTEL) de definir un nuevo tipo de servicio.

Se requiere el título habilitante de registro, para los siguientes servicios:

1. Portadores.
2. Telecomunicaciones móviles por satélite.
3. Transporte internacional.
4. Valor agregado.
5. Acceso a Internet.
6. Troncalizados.
7. Comunales.
8. Otros que determine el Directorio de la ARCOTEL, previo informe de la Dirección Ejecutiva de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.

Se encuentra en el listado el servicio de acceso al Internet un servicio que comúnmente es utilizado por Proveedores de Servicio de Internet (ISP) y por el cual pagan un valor de \$500 dólares americanos por el permiso. Este servicio podría ser utilizado por las redes comunitarias para dar acceso a Internet a poblaciones prioritarias, pero hay que tener en consideración que estas redes son desplegadas por una asociación civil comunitaria sin fines de lucro, y como tal, el pago de cualquier valor por el título habilitante es una problemática para el desarrollo de este ecosistema.

Comparativo entre México, Perú, Argentina y Ecuador

Se ha presentado en este documento varios ejemplos de iniciativas de redes comunitarias en Latinoamérica, por lo que es conveniente hacer un cuadro comparativo entre estos países para validar qué permite cada legislación y marco regulatorio, para contextualizar una alternativa que permita viabilizar las redes comunitarias en Ecuador.

Tabla 1.

Cuadro comparativo entre países

	Red propia	Compartición infraestructura	Operador con TH diferente	Exenciones	Licencia específicas para zonas rurales	Uso secundario del Espectro
México						
Perú						
Argentina						
Ecuador						

Fuente: *Elaboración propia*

Asimismo, se presenta a continuación en la *Tabla 2* un detalle más amplio de la comparación realizada anteriormente, con la finalidad de contextualizar a la realidad ecuatoriana los desafíos y oportunidades, en base a las experiencias generadas en otros países vecinos.

Tabla 2.
Cuadro con marco regulatorio de México, Perú, Argentina y Ecuador

PAÍS	REDES COMUNITARIAS / OPERADORES RURALES / RECURSOS NECESARIOS
México	<p>En 2013 emitió la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión que incluye un nuevo régimen legal de concesiones sociales comunitarias e indígenas.</p> <p>Las concesiones para uso social comunitaria se podrán otorgar a organizaciones de la sociedad civil que no persigan ni operen con fines de lucro y que estén constituidas bajo los principios de participación ciudadana directa, convivencia social, equidad, igualdad de género y pluralidad.</p> <p>Concesiones para uso social indígena con la finalidad de cuidar el desarrollo y preservación de sus lenguas, sus culturas, tradiciones, normas internas y demás elementos que constituyen las culturas e identidades indígenas.</p>
Perú	<p>No tienen licencias de uso social, se destaca la "licencia libre", donde no será necesaria una asignación de espectro radioeléctrico cumpliendo cierta condición técnica. Perú cuenta con el título de Operador Rural, el cual se considera a la persona natural o jurídica que cuenta con concesión para prestar servicios de telecomunicaciones y que es otorgada por el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC), para operar en áreas rurales.</p>
Argentina	<p>Argentina aprobó su resolución 4958/2018 y establece como redes comunitarias aquellas compuestas por infraestructura gestionada por sus usuarios o entidades sin fines de lucro que los agrupen, ampliándolos a través de la incorporación de nuevos usuarios o conectándose con redes comunitarias vecinas; en poblaciones de no más de 5.000 habitantes.</p>
Ecuador	<p>Conforme a Ley Orgánica de Telecomunicaciones, se establecen tres tipos de títulos habilitantes para el uso del espectro radioeléctrico: concesiones, autorizaciones y registro de servicios.</p> <p>Las concesiones para servicios como telefonía fija y servicio móvil avanzado, para el uso y explotación del espectro radioeléctrico, por empresas de economía mixta, por la iniciativa privada y la economía popular y solidaria.</p> <p>La autorización es para el uso del espectro radioeléctrico por las empresas públicas e instituciones del Estado.</p> <p>El registro de servicios para cuya presentación se requiere registro, son entre otros los siguientes: servicios portadores, telecomunicaciones móviles por satélite, transporte internacional, valor agregado, acceso a Internet, troncalizados, comunales y otros que determine el directorio de la ARCOTEL, previo informe de la dirección ejecutiva de la ARCOTEL, de conformidad con el ordenamiento jurídico vigente.</p> <p>Adicionalmente, es necesario mencionar que en el Ecuador existe la Norma Técnica para Uso Compartido de Infraestructura Física de los Servicios del Régimen General de Telecomunicaciones, la cual indica que quien posea un título habilitante debe compartir su infraestructura física, menos cuando las circunstancias técnicas se lo impidan.</p>

Fuente: *Elaboración propia*

México y Argentina presentan ya una definición de las redes comunitarias en el marco de sus leyes y reglamentos, y las definen como organizaciones participativas comunitarias sin fines de lucro con el objetivo de promover el acceso a las TIC.

También se puede evidenciar que en las legislaciones de Perú y México tienen definido bandas de frecuencias para uso comunitario o libres, las cuales poder ser utilizadas por las redes comunitarias, o en el caso de Perú, por operadores OIMR, permitiéndoles el despliegue de su infraestructura de red sin complicaciones de asignación de espectro.

En el caso del Ecuador existe el título habilitante de registro de servicio, donde se preceptúa el servicio de acceso a Internet. Hay que tener en consideración que por este tipo título se tiene que pagar un valor, lo cual dificulta el despliegue de las redes comunitarias, debido a los escasos recursos económicos de sus miembros.

En la normativa de Ecuador, con el uso compartido de infraestructura de proveedores de servicios con títulos habilitantes, se permite que cualquier asociación o cooperativa con título habilitante solicite acceso a infraestructura de otro proveedor, la normativa señala que el ARCOTEL otorgue uso compartido mientras las circunstancias técnicas no lo impidan.

Análisis de la problemática de los servicios de telecomunicaciones en el Ecuador

Servicio de acceso a Internet (SAI) - Cobertura

Las redes de fibra óptica (*backbone*, *backhaul* y acceso) existentes en Ecuador, colocadas en carreteras (diciembre de 2017), tienen una longitud de 444 mil Km, con inversión de empresas públicas y privadas, como se aprecia en la *Figura 7*.

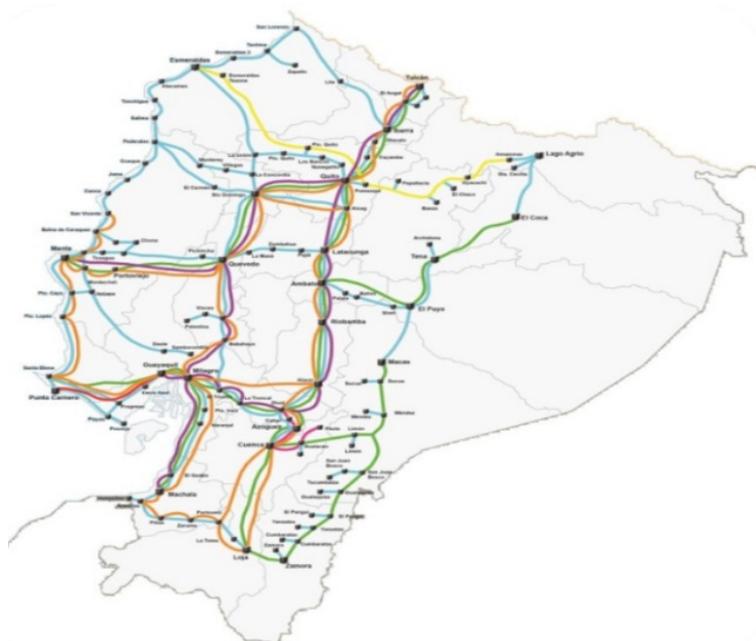


Figura 7. Redes troncales de fibra óptica desplegadas en el país
Fuente: ARCOTEL (2017)

La conectividad que tiene el Ecuador es privilegiada en la región, ya que posee su propio cable submarino y data centers privados de clase mundial. Con la construcción de mega centros de datos en el Ecuador, apoyados con certificaciones mundiales como LEED, TIER III y TIER IV, se brindan servicios de *cloud computing*, servicios de valor agregado, servicios administrados de tecnologías de la información, comunicaciones unificadas, y procesamiento y almacenamiento virtual, ofreciendo sus servicios a clientes gubernamentales, corporativos y público en general.

Como muestra de interoperabilidad, Ecuador cuenta con un IXP local desde el 2001, entidad creada sin fines de lucro. El proyecto denominado NAP.ec aloja infraestructura de Internet el cual le da valor agregado al intercambio de tráfico local, entre ellas: copias de los servidores DNS del dominio raíz, servidor del dominio .EC y nodos de redes de entrega de contenido (CDN). Gracias a ello, actualmente el 97% del tráfico localmente generado se lo gestiona a través de este IXP.

A pesar de que en Ecuador se cuenta con un nivel avanzado de despliegue de infraestructura de *backbone* o *red core* de fibra óptica, esta infraestructura no ha sido desplegada de manera suficiente, existiendo todavía 13 cantones por conectar con esta tecnología, lo que representa el 6%, como se indica en la *Figura 8*.

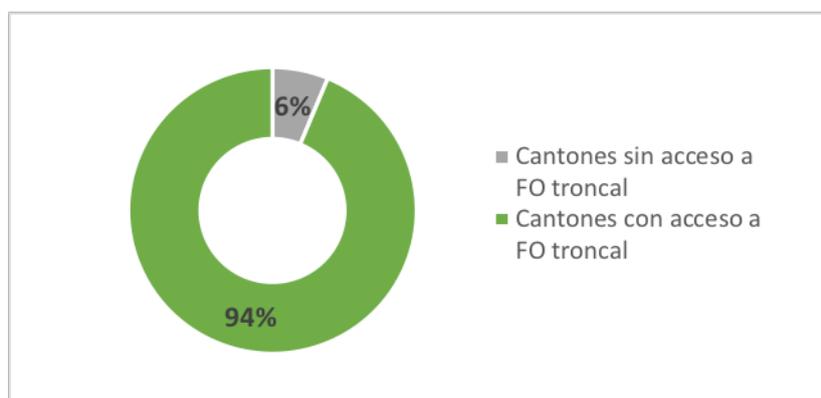


Figura 8. Porcentaje de cantones con acceso a fibra óptica
Fuente: MINTEL (2018), ARCOTEL (2017)

El servicio de acceso a Internet fijo es prestado por las empresas de telecomunicaciones a través de diferentes medios de acceso en el Ecuador, siendo el cobre y el cable coaxial el medio más utilizado con un 76.54% de conexiones; el 23.48% restante corresponde a tecnologías de acceso inalámbrico y fibra óptica como describe la *Figura 9*.



Figura 9. Distribución de medios de acceso para el servicio de Internet fijo en Ecuador
Fuente: ARCOTEL (2017)

Se realiza una evaluación de suscripciones a Internet fijo a nivel parroquial, para inicios de 2018 se identificaron que 92 parroquias no contaban con cuentas del SAI ni prestadores del servicio, generando una cobertura parroquial del 91.02% por diferentes tecnologías de acceso.

Penetración del servicio

Para diciembre de 2017, los hogares con acceso a Internet a nivel nacional fueron del 37%, generando un crecimiento de 25 puntos con respecto a 2010, donde se tuvo un 12% de hogares con este servicio, como se observa en la *Figura 10*.

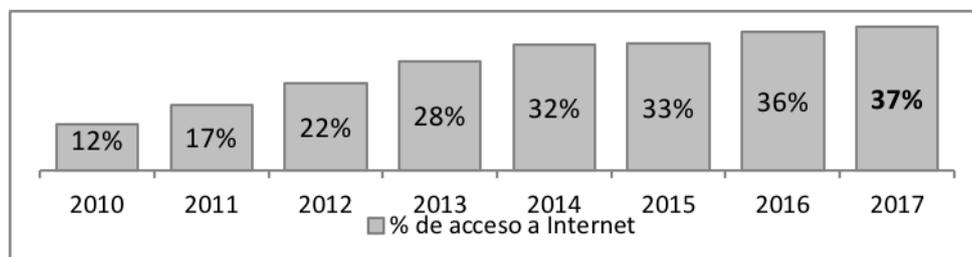


Figura 10. Evolución del porcentaje de hogares con acceso a Internet a nivel nacional
Fuente: INEC (2017)

A nivel de quintiles, y con base en la información de la Encuesta de Empleo, Desempleo y Subempleo (INEC, 2017), se observa el incremento del acceso al servicio en todos los quintiles, por ejemplo, en el 2008 y 2009, únicamente los hogares ubicados en los dos quintiles de más altos ingresos contaban con acceso a Internet; sin embargo, en términos generales, el Internet fijo se encuentra concentrado en los hogares de mayores ingresos, detallado en la *Figura 11*.

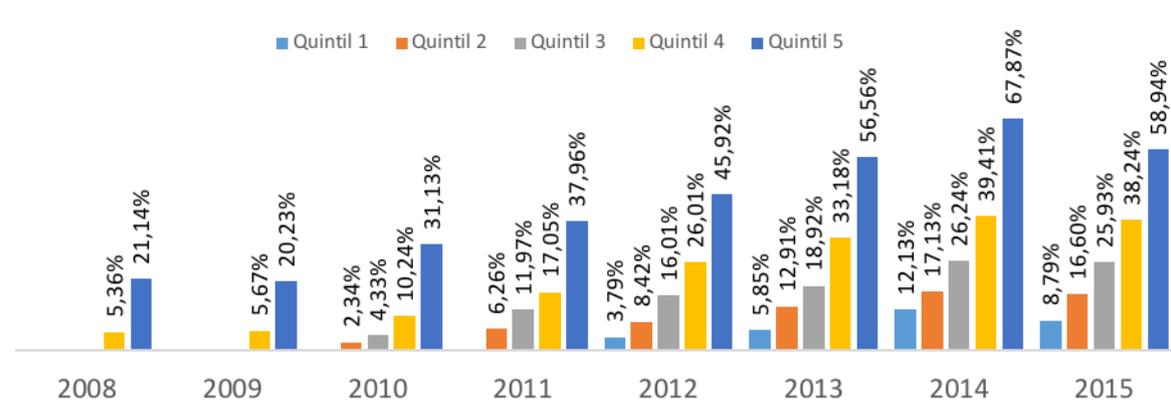


Figura 11. Penetración del Internet fijo por hogares a nivel de quintiles
Fuente: INEC (2017)

Internet fijo en instituciones públicas

Durante los últimos años, dado el avance cada vez mayor de las tecnologías de la información y comunicación (TIC), que las ha convertido en herramientas indispensables para el desarrollo económico y social de todos los países, las TIC representan una herramienta con gran potencial especialmente en las áreas sociales.

Entre los principales factores que incide en el acceso a las TIC, por parte de la población ecuatoriana, se encuentran las dificultades de acceso a las zonas rurales, al ser el Ecuador un país con diversidad geográfica, étnica y social; su población se distribuye en diferentes zonas que, por su geografía, tienen dificultades de acceso (vías de tercer orden, acceso fluvial, aéreo, etc.). Esta problemática causa que los operadores no implementen infraestructura de acceso a telecomunicaciones en sectores rurales; y, por tanto, el acceso y uso de la tecnología en el Ecuador aún sea limitado.

Del análisis realizado sobre instituciones públicas que cuentan con el servicio de Internet, a diciembre del 2016, se observó que un alto porcentaje de instituciones de salud tienen acceso a este servicio, llegando a una penetración de más del 81% (Figura 12).

Según datos del archivo de instituciones educativas (AMIE 2015-2016) (Ministerio de Educación, 2016), en el Ecuador solo el 33% de establecimientos educativos cuentan con el servicio de Internet que es utilizado para fines pedagógicos, esto evidencia que más de la mitad del total de instituciones educativas carecen de este servicio. En lo que respecta a Seguridad, el 29% de dependencias cuentan con el servicio de Internet.



Figura 12. Porcentaje de Instituciones públicas con servicio de Internet
Fuente: ENEDU INEC (2017). Ministerio de Educación (2016)

La brecha digital como fuente de nuevas desigualdades

De acuerdo con (Serrano & Martínez, 2003) “la brecha digital se define como la separación que existe entre las personas (comunidades, estados, países, etc.) que utilizan las Tecnologías de Información y Comunicación como una parte rutinaria de su vida diaria, y aquellas que no tienen acceso a las mismas y que, aunque las tengan, no saben cómo utilizarlas”.

Esta constituye una nueva fuente de desigualdad a la que hay que prestar atención desde la perspectiva de la estructura social, para lo cual es necesario articular las diferentes estrategias como Estado.

- Brecha de cobertura: porcentaje poblacional que carece de disponibilidad de redes de telecomunicaciones y por tanto de los servicios provistos sobre estas redes.
- Brecha de acceso: personas/hogares que, a pesar de contar con cobertura de servicios de telecomunicaciones, no disponen de las herramientas y/o habilidades necesarias para acceder a los servicios.
- Brecha de asequibilidad: esta está influenciada, al menos, por dos variables: el costo de los equipos con los que se accede al servicio, y el costo del servicio.

De acuerdo con varios estudios que han analizado el nivel de asequibilidad de la población, se establece que el costo del servicio¹ no puede exceder del 5% del ingreso de la persona u hogar (Ishmael, Bury, Pezaros, & Race, 2008). Otros sugieren que el límite de la relación entre costo del servicio de telecomunicaciones respecto al nivel de ingresos, bordea el 8% (Hernández M. D., 2018).

Para el propósito de este estudio se tomará como barrera de asequibilidad ²el 7% de los ingresos por hogar.

Servicio móvil avanzado

En junio del 2017, en Ecuador se cuenta con un 92.46%³ de cobertura poblacional del servicio móvil avanzado; alcanzando un 89.94% de penetración de este servicio, medido a través de las líneas activas. No obstante, existe una diferencia entre las SIM conectadas a la red y suscriptores móviles únicos; según la unidad de investigación GSMA Intelligence, la primera se refiere al número de tarjetas SIM conectadas que utilizan la red móvil, mientras que la segunda es una métrica más cercana al número real de individuos suscritos y que pueden llegar a tener más de una SIM, por lo que es una constante que el porcentaje de suscriptores únicos sea inferior a la penetración del servicio móvil.

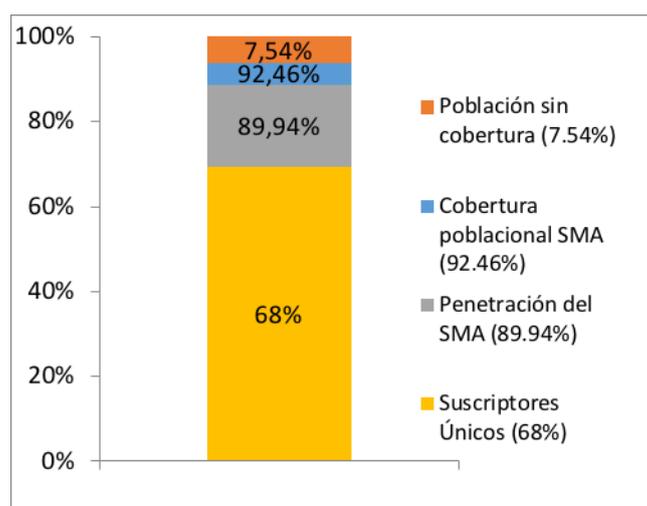


Figura 13. Brecha de acceso – cobertura del SMA vs. penetración del servicio
Fuente: GSMA (2018)

Para el caso de Ecuador, a pesar de tener un 89.94% de penetración del servicio móvil, existe solamente un 68% de suscriptores únicos, lo que refleja que la población que está cubierta con el servicio móvil, y tiene la posibilidad de acceder al servicio, aún se mantiene en porcentajes inferiores al 70%, sin olvidar que aproximadamente 1'255.625 de personas aún no tienen la posibilidad de acceso a servicios móviles de voz y/o de datos en alguna tecnología móvil debido a la falta de cobertura lo que equivale al 7.54% de la población, de acuerdo a la *Figura 13*.

Típicamente la barrera para adquirir servicios de telecomunicaciones se alcanza cuando los gastos son más del 7%³ de los ingresos mensuales del hogar. En el caso del gasto del servicio de telefonía móvil en el Ecuador, si solamente se contratara este servicio, todos los deciles de la población estarían en la capacidad

1 Los estudios no consideran los costos de los dispositivos (teléfono y computadora). Se basan únicamente en el costo del servicio.

2 Como resultado del análisis para servicios de telefonía fija, móvil e internet fijo, se determinó que el 7% de gastos sobre los ingresos para servicio de voz (SMA) y datos (SAI).

3 Metodología para el cálculo de la cobertura poblacional del SMA, MINTEL 2018

de adquirir este servicio; sin embargo, debido a la falta de cobertura del servicio, las murallas de accesibilidad para la compra de un terminal, entre otras, el porcentaje de penetración de personas que cuentan con un celular es del 59.6% a nivel nacional, de los cuales los primeros seis deciles están por debajo del promedio nacional (*Figura 14*).

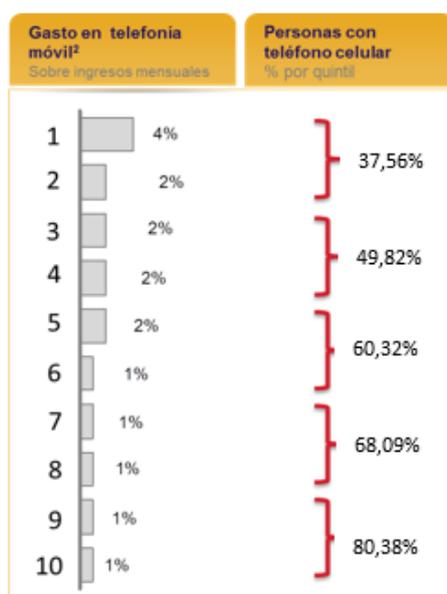


Figura 14. Brecha de asequibilidad – Gasto por hogar en telefonía móvil – % personas con teléfono celular
Fuente: INEC (2017), MINTEL (2018)

Si comparamos a nivel regional la cobertura poblacional del servicio móvil avanzado en la tecnología 3G, Ecuador está por debajo del promedio de los países de referencia de la región (90%), como se puede ver en la *Figura 15*.

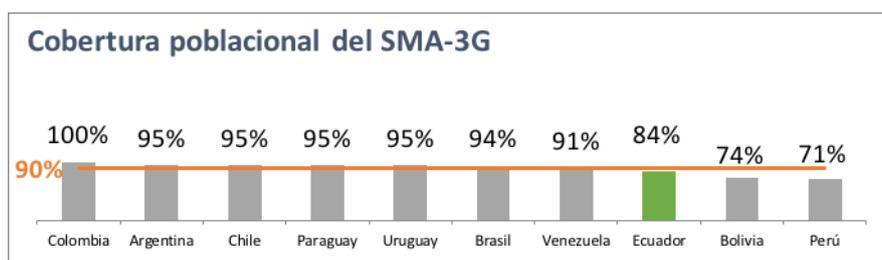


Figura 15. Brecha de acceso - Cobertura poblacional del servicio móvil avanzado tecnología 3G
Fuente: Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (2018)

A pesar del progreso de los últimos años, donde 3G sigue siendo la principal tecnología en la región, 4G tiene aún un alto potencial de inversión en el país. Ecuador está muy inferior al promedio de los países de referencia dentro de la región (70%) de cobertura poblacional de tecnología 4G, alcanzando el 51%, solamente por encima de Perú, como se muestra en la *Figura 16*.

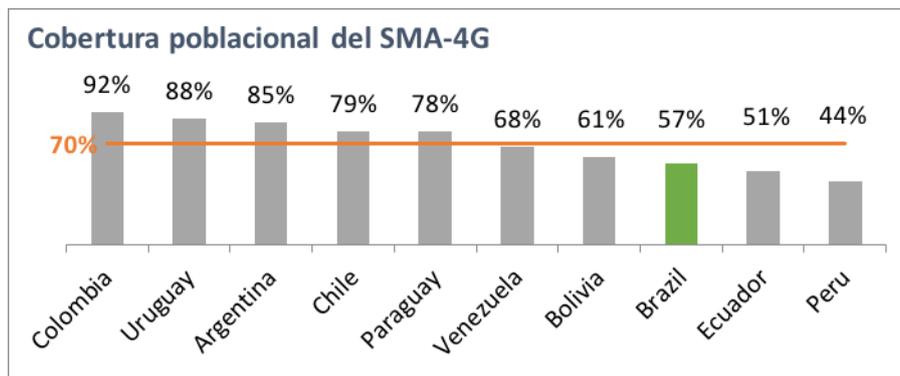


Figura 16. Cobertura poblacional del servicio móvil avanzado tecnología 4G
Fuente: MINTEL (2018), Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (2018)

Para junio del 2017, en el país un 90.8% de la población tenía cobertura del servicio móvil avanzado en las tecnologías 3G y 4G; sólo un 33.7% de la población cuenta con un *smartphone* con acceso a Internet móvil prestado a través de estas tecnologías (3G-4G), existiendo una brecha de más del 57.1% entre cobertura de servicio y penetración de teléfonos inteligentes, más aun considerando que todavía existe un 9.2% de la población que no se encuentra cubierta por estas tecnologías que posibilitan el acceso a Internet a través de la red móvil (Figura 17).

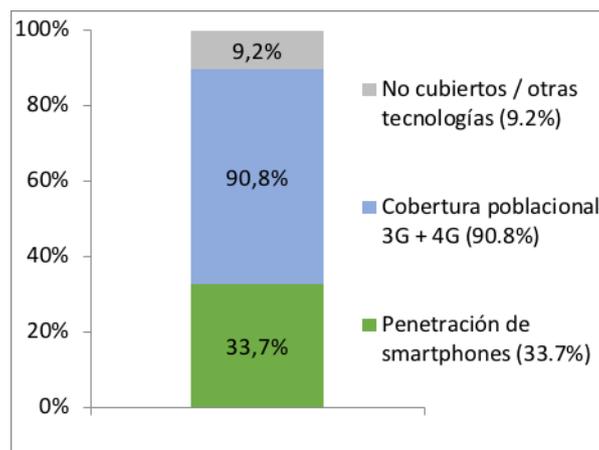


Figura 17. Brecha de acceso – Cobertura poblacional 3G, 4G vs. penetración de smartphone
Fuente: INEC (2017), MINTEL (2018)

Servicio de acceso a Internet

En relación a la cobertura de este servicio, existe al menos una suscripción a Internet fijo a nivel parroquial, en inicios del 2018 se identificaron 92 parroquias para las cuales aparentemente no hay cuentas SAI, ni prestadores del servicio. A pesar del 91.02% de cobertura parroquial estimado, la penetración de Internet en los hogares es solamente del 37%, esto genera una brecha amplia entre la cobertura y penetración de este servicio, considerando que solo el 8.98% de las parroquias no cuentan con cobertura de este servicio, detallado en la Figura 18.

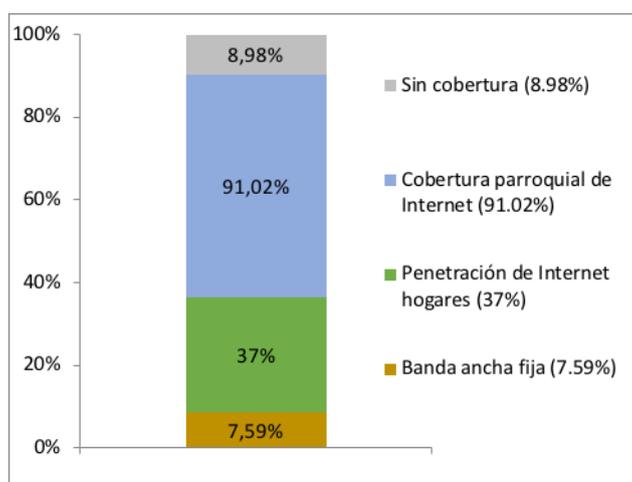


Figura 18. Brecha de acceso – Cobertura parroquial de Internet vs. penetración de internet en Hogares
Fuente: ARCOTEL (2017), MINTEL (2018)

Típicamente la barrera para adquirir servicios de telecomunicaciones se alcanza cuando los gastos representan más del 7%⁴ de los ingresos mensuales del hogar. Si solamente se contratara el servicio de Internet, los dos primeros deciles estarían limitados por su capacidad adquisitiva; sin embargo, considerando que el porcentaje de penetración en hogares con Internet Fijo es del 37% a nivel nacional, se evidencia en la Figura 19 que los primeros seis deciles están muy por debajo del promedio nacional.

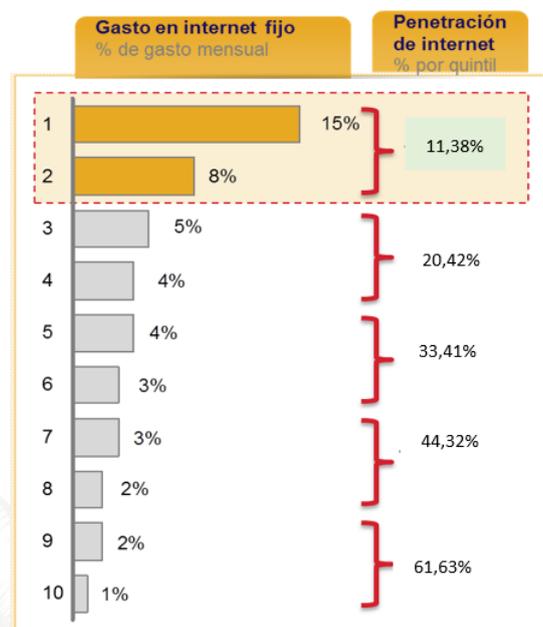


Figura 19. Brecha de asequibilidad – Gasto por Hogar en Internet Fijo – penetración de Internet fijo
Fuente: INEC (2017), MINTEL (2018)

En lo que corresponde a la velocidad de descarga, Ecuador se encuentra por debajo del promedio regional (16Mbps); por lo tanto, es necesario estimular el despliegue de nuevas redes de telecomunicaciones que permitan ampliar la cobertura del servicio y mayores velocidades de navegación, acorde a los desafíos que presenta la nueva era digital (Figura 20).

4 Como resultado del análisis y cálculos realizados por el MINTEL de los gastos para servicios de telefonía fija, móvil e internet fijo, se determinó que el gasto sobre ingreso equivale a un 7% y está destinado a un servicio de voz (SMA) y datos (SAI).

Esta brecha de cobertura y acceso al servicio, influye en la penetración de computadoras a nivel de hogar, que en el país a diciembre del 2017 alcanza un 41%, siendo evidente que adicionalmente existe una gran brecha al acceso de las computadoras y laptops, dispositivos esenciales para el acceso al Internet fijo, como se indica en la *Figura 21*.

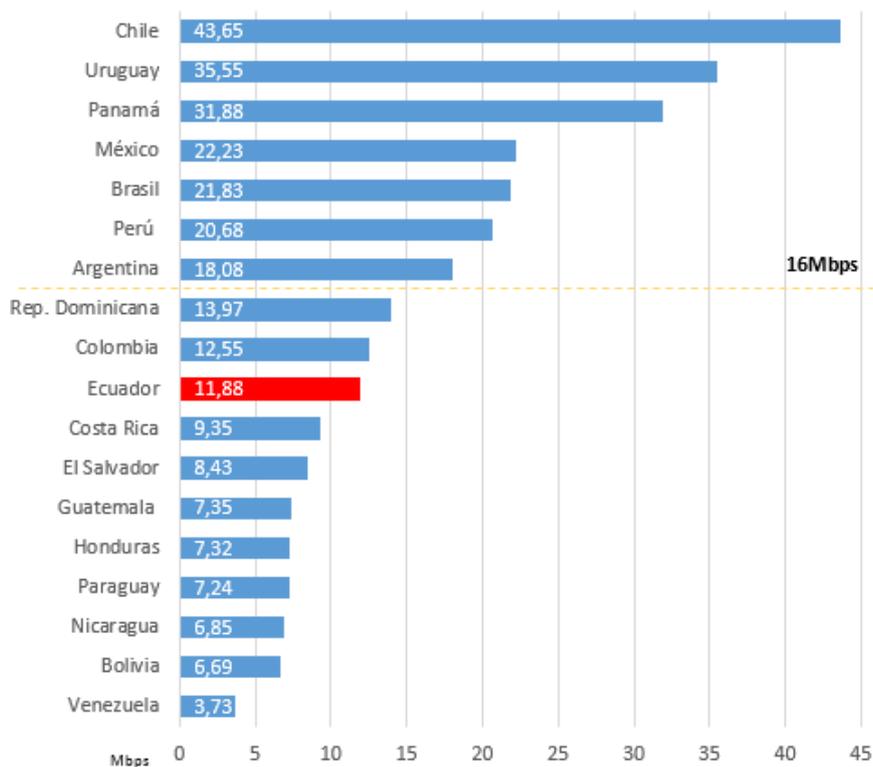


Figura 20. Velocidad de descarga de Internet fijo en Latinoamérica
Fuente: CEPAL (2017)

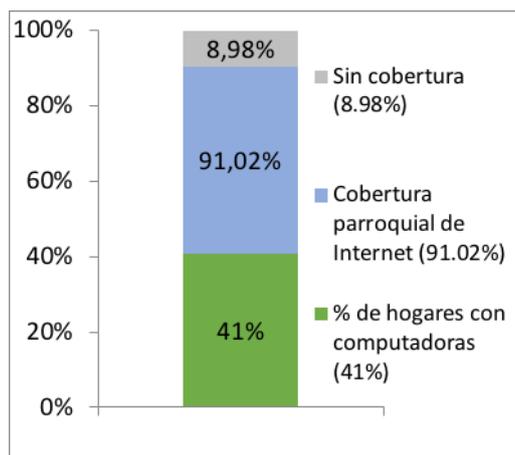


Figura 21. Brecha de acceso – cobertura parroquial de Internet vs. penetración de Internet en hogares
Fuente: ARCOTEL (2017), INEC (2017)

Realizando una comparación entre la penetración de Internet y computadores en el hogar, a nivel de quintiles, se evidencia en todos los niveles un grupo de hogares que, a pesar de contar con el equipo necesario para acceder a Internet, no acceden al servicio (*Figura 22*). Considerando la adopción del servicio, la Encuesta Nacional Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU) reporta las razones por la que los hogares

no tienen acceso a Internet fijo, entre las que destaca la falta de recursos económicos (63.73% al año 2015) y el no requerir el servicio (13.55%).

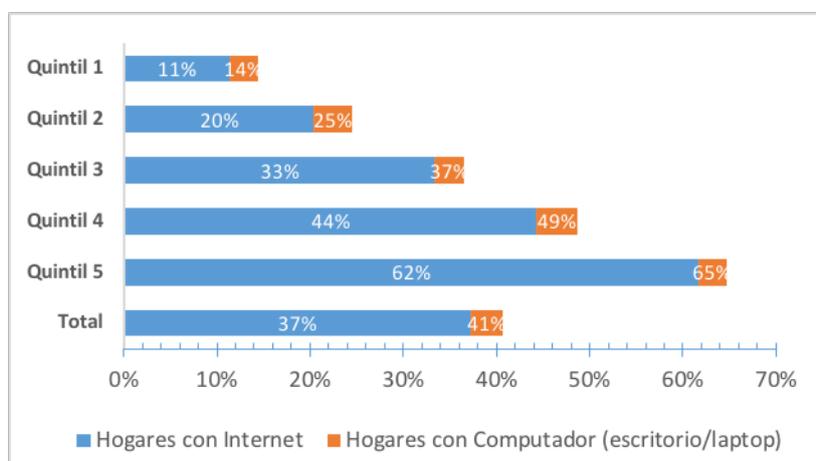


Figura 22. Penetración del Internet fijo y computadores por hogares a nivel de quintiles
Fuente: DNP (2018)

La siguiente tabla muestra las estadísticas comparativas por año, realizadas por INEC, donde se detalla los principales motivos por los cuales no tienen acceso a internet los hogares del Ecuador

Tabla 3.
Razones por la cual en Ecuador no se dispone de Internet

Razones por las que los hogares no cuentan con acceso a Internet	2013	2014	2015
Hogares sin acceso a internet por falta de cobertura	4.98%	5.05%	5.41%
Hogares sin acceso a internet por falta de recursos económicos	62.75%	63.21%	63.73%
Hogares sin acceso a internet porque no les interesa	5.71%	3.95%	4.21%
Hogares sin acceso a internet porque no lo necesitan	13.18%	13.61%	13.55%
Hogares sin acceso a internet porque no sabe utilizar	11.77%	12.49%	11.47%
Hogares sin acceso a internet porque tiene equipo insuficiente	0.92%	0.81%	0.96%

Fuente: INEC (2017a)

Propuesta regulatoria para la existencia de las redes comunitarias, operadores rurales y espectro para despliegue de servicios en zonas prioritarias y población vulnerable en Ecuador

Una propuesta regulatoria que permita la existencia de las redes comunitarias, operadores rurales y la utilización de recursos radioeléctricos en condiciones preferentes, conlleva una modificación en el marco regulatorio vigente, pero primero se debe plantear una alternativa para que estas agrupaciones obtengan personalidad jurídica en Ecuador, como una organización comunitaria sin fines de lucro, con el único fin de cubrir sus necesidades de acceso a la información mediante el uso del Internet (PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA, 2014)

En el artículo 36 de la Ley Orgánica de Participación Ciudadana se establece que las organizaciones sociales que desearan tener personalidad jurídica, deberán tramitarla en las diferentes instancias públicas que correspondan a su ámbito de acción, y actualizar sus datos conforme a sus estatutos.

Mediante el decreto ejecutivo No. 193 de 27 de octubre de 2017, se emite el reglamento para que las organizaciones sociales obtengan personalidad jurídica.

Art. 1.- Objeto. - El presente Reglamento tiene por objeto regular, simplificar y racionalizar los requisitos para el otorgamiento de personalidad jurídica a las organizaciones sociales ciudadanas que voluntariamente lo soliciten, por parte de las instituciones competentes del Estado.

Art. 2.- Ámbito.- El presente Reglamento rige para las organizaciones sociales y demás ciudadanas y ciudadanos con personalidad jurídica que, en uso del derecho a la libertad de asociación y reunión, participan voluntariamente en las diversas manifestaciones y formas de organización de la sociedad para las entidades u organismos competentes del Estado que otorgan personalidad jurídica a las organizaciones que lo soliciten en el ámbito de su gestión; para las organizaciones no gubernamentales (ONG) extranjeras que realizan actividades en el Ecuador; y para quienes requieran de información o promuevan la participación y organización social.

Así, el 10 de mayo del 2011 se emitió la Ley Orgánica de Economía Popular y Solidaria, donde en la sección 1 de las Organizaciones del Sector Comunitario se establece que:

Art. 15.- Sector Comunitario.- Es el conjunto de organizaciones vinculadas por relaciones de territorio, familiares, identidades étnicas, culturales, de género, de cuidado de la naturaleza, urbanas o rurales, o de comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades que, mediante el trabajo conjunto, tienen por objeto la producción, comercialización, distribución y el consumo de bienes o servicios lícitos y socialmente necesarios, en forma solidaria y auto gestionada, bajo los principios de la presente Ley.

Art. 16.- Estructura interna. - Las organizaciones del sector comunitario adoptarán la denominación, el sistema de gobierno, control interno y representación que mejor convenga a sus costumbres, prácticas y necesidades, garantizando su modelo de desarrollo económico endógeno desde su propia conceptualización y visión.

Art. 17.- Fondo Social. - Para el cumplimiento de sus objetivos, las organizaciones del sector comunitario contarán con un fondo social variable y constituido con los aportes de sus miembros, en numerario, trabajo o bienes, debidamente evaluados por su máximo órgano de Gobierno. También formarán parte el fondo social las donaciones, aportes o contribuciones no reembolsables y legados que recibiesen estas organizaciones.

“En el caso de bienes inmuebles obtenidos mediante donación, éstos no podrán ser objeto de reparto en caso de disolución y se mantendrán con el fin social que produjo la donación”, se indica en este documento.

La Ley Orgánica de Telecomunicaciones (LOT) (Asamblea Nacional del Ecuador, 2015), promulgada en febrero de 2015, establece el acceso universal a Internet, convirtiendo a este en un servicio básico que potencialmente estaría sujeto a regulación, como es el caso del agua, teléfono y electricidad.

Cambios necesarios dentro del marco regulatorio en Ecuador

Para la viabilidad de las redes comunitarias, operadores rurales y la utilización de recursos radioeléctricos en condiciones preferentes en el país, se sugiere actualizar y modificar varios instrumentos dentro del marco regulatorio, los cuales se detallan a continuación:

- Actualización del Reglamento para la Prestación de Servicios de Telecomunicaciones y Servicios de Radiodifusión por Suscripción para que se defina el servicio de Redes Comunitarias, como aquellos compuestos por infraestructura propia, auto-gestionada por sus propios usuarios o por las organizaciones sin fines de lucro que los agrupen, y que a través de la cuales se brinde el servicio de acceso a Internet.
- Actualización del Reglamento para la Prestación de Servicios de Telecomunicaciones y Servicios de Radiodifusión por Suscripción para que se defina el servicio de Operadores de Infraestructura Móvil Rural (OIMR), que lo habilite para otorgar fácil acceso y transporte en sectores de interés social, donde no se tenga infraestructura de red propia operativa, sin usuarios finales, numeración propia, ni asignación de espectro radioeléctrico para servicios móviles. Una vez establecida la condición de operador rural, este debe tener los siguientes derechos:
 - Prestar el servicio de telecomunicaciones en las áreas que establezcan el MINTEL o ARCOTEL, conforme los criterios expuestos en la definición.
 - Ser retribuido por las prestaciones brindadas, de acuerdo con criterios que favorezcan el crecimiento de las telecomunicaciones rurales.
 - A solicitar la disposición de uso de facilidades de red del operador más cercano o con las prestaciones necesarias para proveer su servicio en el área solicitada, en caso de no llegar a un acuerdo con el Operador establecido.
 - La aplicación de criterios que ayuden a analizar las condiciones técnicas necesarias para adecuar la red, sin arriesgar la calidad de los servicios, conforme lo determine la ARCOTEL.
 - Acceder al uso de las frecuencias del espectro radioeléctrico, con una tarifa diferenciada en las zonas a prestar el servicio. Estas frecuencias estarán en las bandas: 512 a 608 MHz, 614 a 698 MHz, 790–862 MHz, 2.4GHz, 3.4 - 3.6 GHz, 5 - 5.8 GHz. Esta tarifa estará enfocada únicamente a cubrir los costos administrativos por gestión del espectro radioeléctrico.
- Actualización del Reglamento para Otorgar Títulos Habilitantes para Servicios del Régimen General de Telecomunicaciones y Frecuencias del Espectro Radioeléctrico, para que se incluya a las redes comunitarias con los siguientes requisitos para la obtención del título habilitante de registro.
 - Las redes comunitarias deben abastecer zonas rurales y de prioridad, donde el nivel de accesibilidad y asequibilidad al Internet y telefonía sean nulas o deficientes.
 - Las redes comunitarias deben constituirse como una organización sin fines de lucro, donde su objetivo sea dar acceso al Internet y telefonía a sus miembros.
 - Se considerará como prestaciones complementarias las obligaciones del plan de expansión de los prestadores de servicios de Internet establecidos, para que las redes comunitarias tengan acceso a redes de *backbone*, *backhaul*, y acceso provistas por los ISP.
- Modificación del Reglamento de Derechos por Concesión y Tarifas por Uso de Frecuencias del Espectro Radioeléctrico, donde se promueva una regulación de derechos y tarifas por uso de frecuencias para servicios de telecomunicaciones que incentive el despliegue de infraestructura de redes

comunitarias, principalmente en zonas vulnerables que estén olvidadas y con bajo nivel de accesibilidad al Internet.

- Permitir a redes comunitarias el acceso al uso de las frecuencias del espectro radioeléctrico, con una tarifa diferenciada en las zonas priorizadas por el MINTEL o en poblaciones vulnerables.
- La tarifa diferenciada estará enfocada únicamente a cubrir los costos administrativos por gestión del espectro radioeléctrico.
- Actualización del Plan Nacional de Frecuencias, para que promueva el uso compartido de frecuencias en zonas de interés social, donde no es utilizado el espectro concesionado a uno o varios operadores de telecomunicaciones; así como reservar un espacio dentro del plan para operadores de índole comunitario y/o social.
- Estas frecuencias deben estar en las bandas de frecuencia en las que se especifique su uso para brindar servicios de Internet fijo y móvil, u otras que determine MINTEL.
- Para los canales ubicados en la banda UHF, 21 al 51, se requiere una modificación del PNF2017 con la finalidad de contar con el marco jurídico para ofrecer servicios secundarios en estas bandas de frecuencias.
- Con la finalidad de fomentar el despliegue de las redes comunitarias, se dará prioridad a zonas priorizadas o población vulnerable en el plazo de dos años, luego del correspondiente análisis realizado por ARCOTEL y se considere la exoneración de cargas regulatorias y económicas determinadas por MINTEL o ARCOTEL, como, por ejemplo: plan de expansión, sanciones por reportes de calidad de servicio, entre otras.
- El arrendamiento de infraestructura activa y pasiva, y de recursos asociados para la prestación de Servicios de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones a los prestadores de dichos servicios no requerirá de la obtención de licencia, ni de inscripción de registro.
- Generar acuerdo ministerial para impulsar la política pública para la generación de las redes comunitarias en zonas de prioridad y desatendidas del país con bajo nivel de accesibilidad y asequibilidad al Internet.

CONCLUSIONES

El presente estudio busca impulsar la puesta en marcha de redes comunitarias en Ecuador, como un vía factible y sustentable para reducir la brecha digital en el país como parte del Plan de Servicio Universal 2018-2021 que está llevando a cabo el MINTEL, en la meta de bajar el índice de analfabetismo digital que permita fomentar el buen uso de las TIC en áreas olvidadas, donde el acceso a Internet es nulo o deficiente.

La presente investigación muestra varios ejemplos de redes comunitarias en Latinoamérica, donde ya existe un marco regulatorio que permite la viabilidad de este tipo de redes; así como también la existencia de varias concesiones para utilización del espectro radioeléctrico, con el fin de brindar servicios de telecomunicaciones de uso comunitario, lo cual nos da el punto de partida para impulsar este ecosistema en el Ecuador.

Con algunos cambios dentro del marco regulatorio del Ecuador, uno de ellos es la actualización al Reglamento para la Prestación de Servicios de Telecomunicaciones y Servicios de Radiodifusión por Suscripción, esto será posible para definir el servicio de redes comunitarias formado por una infraestructura propia y auto gestionada por sus usuarios, sin fines de lucro.

Es imperante que las redes comunitarias y los operadores móviles de infraestructura tenga acceso a un título habilitante que les permita operar en el país sin obstáculos, por lo que es necesario actualizar el Reglamento para Otorgar Títulos Habilitantes para Servicios del Régimen General de Telecomunicaciones y Frecuencias del Espectro Radioeléctrico, en donde se establezcan componentes que faciliten el acceso a los permisos de funcionamiento y recursos necesarios para su operación.

Sobre la utilización del espectro radioeléctrico, el Estado debe garantizar bandas de frecuencias de uso social y comunitario, para lo cual se propone actualizar el Plan Nacional de Frecuencias, para que promueva el uso de estas en zonas rurales, donde no es utilizado el espectro concesionado por uno o varios operadores de telecomunicaciones; así como, reservar un espacio dentro del Plan Nacional de Frecuencias para operadores de índole comunitario.

Actualmente existe en la normativa vigente el acceso a infraestructura pasiva de proveedores que poseen títulos habilitantes, lo que permitiría el desarrollo de las redes comunitarias. Es importante esta normativa regulatoria que tiene el país, ya que se busca fomentar el acceso a la telecomunicaciones y TICS a personas vulnerables y de escasos recursos que no tienen la posibilidad del despliegue de esta infraestructura, por lo que el Estado debe promover el uso de estas herramientas para que existan dentro del marco regulatorio vigente.

REFERENCIAS

- Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones. (2018). Servicio Móvil Avanzado. https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2015/01/BOLETIN-ESTADISTICO-Junio-2018_f.pdf
- Altermundi. (2018). Redes libres comunitarias y descentralizada. <https://altermundi.net/documentacion/>
- ARCOTEL. (2017). Reglamento Títulos Habilitantes de Telecomunicaciones y Frecuencias. pp. 95. http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/014_reglamento-otorgar-titulos-habilitantes-regimen-general-telecomunicaciones-espectro.pdf
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2015). Ley Orgánica de Telecomunicaciones. Ecuador: Registro oficial No. 439.
- Baca, C., Belli, L., Huerta, E., & Velasco, K. (2018). Redes comunitarias en América Latina: Desafíos, Regulaciones y Soluciones. *Internet Society*.
- Benitez, L., & Gonzáles, I. (2010). Estudio de viabilidad técnica ampliación de la red WiFi de Telemedicina EHAS. Lima.
- Bloom, E. H. (2018). *Manual de Telefonía Celular Comunitaria*. Gabriela Díaz.
- CEPAL. (2017). Estado de la Banda Ancha en América Latina y el Caribe. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43365/1/S1800083_es.pdf
- Commotion. (s.f). Guías para Redes Mesh. Commotionwireless. <https://www.commotionwireless.net/es/docs/cck/networking/guidelines-for-mesh/>
- Conferencia Interamericana de Telecomunicaciones. (2016). Res. CITELE 268/2016. CITELE.
- Cumbre Latinoamericana de Redes Comunitarias. (2018). Declaración_CLRC-2018. Argentina.
- Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2018). Aproximación al impacto de las TIC en la desigualdad de ingresos en Colombia. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Aproximacion-impacto-TIC.pdf>
- Egido, I. P. (s.f.). (2017). Proyecto Napo: Innovación social con conectividad y Salud . Peru.
- GSMA. (2018). Beyond the basics: How smartphones will drive future opportunities for the mobile money industry. <https://responsiblefinanceforum.org/wp-content/uploads/2018/11/2017-SOTIR-deep-dive-How-smartphones-will-drive-future-opportunities.pdf>
- HEAS, F. (2020). Innovación, conectividad y salud en la Amazonía peruana. https://www.aecid.es/ES/Paginas/Sala%20de%20Prensa/Noticias/2020/2020_07/15_proyectoNAPO.aspx
- Hernández, M. D. (2018). Marcos regulatorios para las redes comunitarias: Argentina, Brasil, Colombia y México. Buenos Aires: Derechos Digitales.
- Hernández, S. R. (2016). Metodología de la Investigación. México: McGraw Hill Education.
- INEC. (2017a). Encuesta de Empleo, Desempleo y Subempleo – ENEMDU <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/empleo-desempleo-y-subempleo/>

- INEC. (2017b). Programa Nacional de Estadísticas y Censos. Obtenido de https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Normativas%20Estadisticas/Planificacion%20Estadistica/Programa_Nacional_de_Estadistica-2017.pdf
- Ishmael, J., Bury, S., Pezaros, D., & Race, N. (2008). Deploying rural community wireless mesh networks. *IEEE Internet Computing*, 12(4), 22-29. <https://doi.org/10.1109/MIC.2008.76>
- MINTEL. (2018). PLAN DE SERVICIO UNIVERSAL 2018-2021. Quito: MINTEL. <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/wp-content/uploads/2018/11/Plan-de-Servicio-Universal.pdf>
- RECOMENDACIÓN UIT-D 19. (2010). Telecomunicaciones para las zonas rurales y distantes. UIT.
- PRESIDENCIA DE LA REPUBLICA. (2014). Ley Orgánica de Economía Popular y Solidaria. pp. 38. Obtenido de http://www.pichincha.gob.ec/phocadownload/LOTAIP_Anexos/Lit_A/lit_a2/7_ley_organica_de_economia_popular_y_solidaria.pdf
- Serrano, A., & Martinez E. (2003). *La brecha Digital: Mitos Y Realidades*. Mexico.
- Taborda, L. (2017). Despliegue de una Red Inalámbrica Libre Comunitaria: un ejercicio de soberanía digital en el barrio Villa del Río (Bogotá, Colombia). *Hamut' ay*, 4(2), 80-91. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6230646>
- Unión Internacional de Telecomunicaciones. (2014). Iniciativas de política y reglamentación para el desarrollo. Dubái.

DECRETOS DE MEDIDAS CAUTELARES PRIVATIVAS DE LA LIBERTAD EN EL PROCESO JUDICIAL COLOMBIANO: ESTUDIO DEL MODELO EVALUATIVO DE PREDICCIÓN DE RIESGOS CON INTELIGENCIA ARTIFICIAL

DECREE OF PRECAUTIONARY MEASURES DEPRIVING OF LIBERTY IN THE COLOMBIAN JUDICIAL PROCESS: A STUDY OF THE RISK PREDICTION EVALUATION MODEL WITH ARTIFICIAL INTELLIGENCE

Johan Sebastián Lozano Parra

Universidad Libre de Colombia

sebaslp2308@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-3414-9984>

Sergio Andrés Caballero Palomino

Corporación Universitaria Remington, Colombia

sergio.caballero@uniremington.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-4715-8537>

Katerin Yulieth Cruz Cadena

Corporación Universitaria Remington, Colombia

Katerin.cruz@uniremington.edu.co

<https://orcid.org/0000-0003-2729-8030>

Nancy Edith Ochoa Guevara

Corporación Universitaria Remington, Colombia

nancy.ochoa@uniremington.edu.co

<https://orcid.org/0000-0002-4533-4990>

RESUMEN

La problemática de la investigación consiste en establecer la necesidad de evitar errores jurisdiccionales, así como la existencia de riesgos al momento del decreto de una medida privativa, mediante la implementación de una inteligencia artificial como herramienta que permita no solo evitarlos, sino que a su vez reduzca los peligros y riesgos por un indebido decreto u omisión. Esto debido a la existencia de dos errores de tipo dentro de esta clase de medidas. Por una parte, los presentes en dictar una medida de bajo riesgo, y otra donde no se dicta una medida de alto riesgo. Por lo tanto, la pregunta problema a responder es: ¿permite el modelo evaluativo de predicción de riesgos de inteligencia artificial, evitar errores jurisdiccionales y esquemas de peligro en el decreto de medidas cautelares dentro de un proceso judicial? cuyo objetivo general es analizar la procedencia de la inteligencia artificial y su modelo evaluativo de predicción de riesgos, dentro del decreto de medidas privativas de la libertad en el proceso judicial colombiano, que se desarrolla mediante el empleo de una metodología básica jurídica, descriptiva, explicativa y hermenéutica. Esto permitió, dentro de la ejecución del proyecto, entablar como resultados que la inteligencia artificial, por su naturaleza, es una herramienta que permite configurar algoritmos que resuelvan las diversas variantes que implica el dictar una medida privativa de la libertad. De tal modo que dentro del sistema jurídico colombiano ya se encuentra en operatividad un sistema que efectúa dichos análisis con inteligencia artificial y efectiviza las reglas procesales como un esquema lingüístico.

PALABRAS CLAVE

Funcionamiento defectuoso, inteligencia artificial, medidas cautelares, modelo de riesgos, periculum

ABSTRACT

The problem of the research is to establish the need to avoid jurisdictional errors, as well as the existence of risks at the time of the decree of a privative measure, through the implementation of artificial intelligence as a tool that allows not only to avoid them, but also to reduce the dangers and risks due to an improper decree or omission. This is due to the existence of two type errors within this kind of measures. On the one hand, those present in dictating a low-risk measure, and another where a high-risk measure is not dictated. Therefore, the problem question to be answered is: does the evaluative model of risk prediction of artificial intelligence allow avoiding jurisdictional errors and danger schemes in the decree of precautionary measures within a judicial process? The general objective is to analyze the appropriateness of artificial intelligence and its evaluative model of risk prediction, within the decree of measures depriving of liberty in the Colombian judicial process, which is developed through the use of a basic legal, descriptive, explanatory and hermeneutic methodology. This allowed, within the execution of the project, to establish as results that artificial intelligence, by its nature, is a tool that allows configuring algorithms that solve the different variants that implies the dictation of a measure of deprivation of liberty. Thus, within the Colombian legal system, there is already in operation a system that performs such analysis with artificial intelligence and implements the procedural rules as a linguistic scheme.

KEYWORDS

Defective operation, artificial intelligence, precautionary measures, risk model, periculum

INTRODUCCIÓN

La existencia del derecho parte en sí mismo de la interacción del ser humano en sociedad, esto, presupone la existencia de un sujeto con capacidades para actuar, realizar una serie de actividades, ejecutarlas y perfeccionarlas, circunstancias que, en términos escolásticos, constituyen la razón y naturaleza misma del ser humano. Tales aspectos se han relacionado recientemente con la capacidad que tiene este, para aceptarse como un ser inteligente dotado de habilidades y destrezas que le permiten reconocerse dentro de un espacio en el cual puede realizar una conducta, orientarse y generar diferentes posibilidades o hipótesis sobre las cuales se debe seguir un patrón de comportamiento. Este procesamiento de información proveniente en gran manera de una relación con el entorno y la sociedad se configura como un sistema neuronal de perspectivas empíricas. Por ende, es factible hablar que tal proceso de contextos y condiciones de comprensión, de lugar al surgimiento de nuevas formas de entender el procesamiento de información, definido en el mundo moderno, bajo el concepto de inteligencia artificial – en adelante por sus siglas IA–.

Tal concepto, desde lo axiológico, se pueda considerar como unificado o universalmente aceptado, pues sus nociones son tan variadas como los enfoques aplicativos que puedan llegar a existir. Es por ello que en la actualidad, a raíz de lo anterior, han nacido una serie de áreas interdisciplinarias que han abarcado el estudio de la inteligencia artificial desde el ámbito de lo argumentativo y del lenguaje propio, que se utiliza para el uso e implementación de esta forma de comprender los nuevos procesos de información denominada como “ingeniería del lenguaje computacional” (Lobo, 2010), la cual llevada al marco jurídico, ha marcado un precedente en la formación contemporánea de la hermenéutica, posicionándose como parte esencial de todos aquellos análisis formales que se quieran realizar. Esta inflexión, por lo tanto, hace necesario estudiar el área denominada *artificial intelligence and law* (Eemeren et al., 2014), no solo por los cambios que su ejecución conlleva en la existencia del derecho, sino también por su injerencia en las capacidades humanísticas y la relevancia que pueda traer esta herramienta para la sociedad, desde la perspectiva positiva y negativa.

En este orden de ideas, es procedente abordar la temática del proceso judicial, al ser comprendida como un conjunto de actos dentro de un sistema jurídico que mantiene un orden complejo, coherente, íntegro y ordenado; y que a su vez, puede concebirse como una serie de operaciones establecidas dentro de la codificación procesal, tendientes a dirimir conflictos y darles solución jurídica a problemas presentados en la sociedad por medio de la aplicación directa de principios y reglas, que configuran un sistema íntegro de forma razonable y lógica. Esto permite asimilar y realizar una disyuntiva de aplicación, respecto de los algoritmos que de forma lógica y coherente representan el esquema de operación de la IA (Urania, 2019). En otras palabras, tanto la IA, como el proceso, son instrumentos basados en actos organizados que permiten llegar a un objetivo, es aquí donde nace por lo tanto una relación más casuística entre derecho e inteligencia artificial, ya alejado del orden interpretativo lingüístico de la comprensión de los contextos humanos y sociales.

Por lo tanto, la relación entre estos dos instrumentos, según la rama interdisciplinaria de la *artificial intelligence and law*, consiste en diseñar desde el lenguaje computacional algoritmos que ejecuten reglas y principios procesales, en condiciones iguales y proporcionales a las que en la actualidad lo realizan los abogados, jueces y demás operadores jurisdiccionales, dando lugar en todo caso a la existencia de diversas condiciones vinculadas al proceso.

No obstante, si bien existen diferentes ecosistemas digitales y de datos emergentes en la era tecnológica actual, como lo son las herramientas del *big data*, la minería de datos, las redes neuronales, el *blockchain*, entre otros, solo la inteligencia artificial permite dentro del proceso la creación de algoritmos que den aplicación a las múltiples variantes que el derecho procesal tiene, condición que se verá en el cuerpo del texto respecto de cómo la IA se incorpora al proceso como una forma lingüística.

A partir de ello pueden surgir una serie de múltiples preguntas e interrogantes acerca de tal correlación, partiendo del error jurisdiccional, el defectuoso funcionamiento de la administración de justicia y el *periculum* – o en español denominado como peligro –, en materia de decreto de medidas cautelares de privación de la libertad, – pues no existe bien jurídico tutelado que represente de mejor manera la dignidad humana como lo es la libertad, ni tampoco un tema tan relevante entre IA y derecho, como aquel que dignifique la existencia de las personas–. Por una parte, respecto del error jurisdiccional, este se da por acción u omisión del operador judicial, presupuestos que constituyen uno de los regímenes de responsabilidad del Estado de mayor trascendencia jurídica que puede suscitarse en dos situaciones en concreto: cuando no se efectúa el decreto de una medida cautelar y cuando se otorga una medida cautelar; generando a su vez un escenario en el cual existe el denominado *periculum*, tanto para quien solicita la medida cautelar debido a la mora, lentitud o retardo del juez en la emisión de una decisión judicial, como a su vez para la sociedad por el riesgo que puede representar el decreto de una medida cautelar no privativa de la libertad para aquellos que puedan reincidir en conductas delictivas ocasionando revictimización o trasgrediendo otro tipo penal, trasgrediendo la justicia e impidiendo la no comparecencia en el proceso.

Es a partir de estas múltiples variantes que se puede dar aplicación a la IA como herramienta que permita tecnificar la toma de decisiones sobre medidas cautelares, y evitar la existencia de errores humanos que se vean reflejados en yerros judiciales que conlleven una posible responsabilidad del Estado, siendo la implementación de este sistema un mecanismo evaluativo de predicción de riesgos. De tal forma, se plantean dos preguntas problema a raíz de la mixtura algorítmica y jurídica de las variantes presentadas, las cuales son: ¿Permite el modelo evaluativo de predicción de riesgos de inteligencia artificial, evitar errores jurisdiccionales y esquemas de peligro en el decreto de medidas cautelares dentro de un proceso judicial? o por el contrario ¿el modelo evaluativo de predicción de riesgos de IA permitiría aun la existencia de errores jurisdiccionales y esquemas de peligro dentro del proceso judicial mediante el decreto de las medidas cautelares? por lo tanto, para darle respuesta a estos interrogantes, el presente capítulo tiene como finalidad hacer hincapié en el prístino carácter de las medidas cautelares privativas de la libertad, en la cual versa el estudio de la inteligencia artificial como modelo evaluativo de predicción de riesgos y donde se presentan a su vez dos variantes de las cuales devienen múltiples situaciones fácticas; por una parte, el error jurisdiccional, y por otra el *periculum*.

Para esto se trazaron tres objetivos específicos a saber, que se estructuran de manera formal en el desarrollo de este manuscrito del siguiente modo: el primer momento busca analizar el modelo de inteligencia artificial propio de un sistema evaluativo de riesgos, para lo cual se estudiará la relación directa que tiene la aplicación del *machine learning* y el derecho, así como la posibilidad de errores jurisdiccionales o defectuosos funcionamientos de la administración de justicia provenientes de la operatividad de la IA; de igual forma revisar la estructura y beneficio impacto del *big data* en el derecho para mitigar las brechas en la equidad e igualdad del procesamiento de los datos para todos con inclusión. En el segundo momento se indaga en las medidas cautelares y la importancia que esta tiene dentro del proceso judicial, acudiendo de forma metodológica a ejemplos propios de la jurisprudencia colombiana, donde se muestra la existencia de errores judiciales y un indebido decreto de las medidas cautelares; y finalmente, en el tercer momento se estudia el modelo evaluativo de riesgos dentro del sistema procesal penal colombiano, para lo cual se acude al caso ejemplificante del proyecto PRISMA, implementado por la Fiscalía General de la Nación y al análisis de los algoritmos usados.

Incorporación de la IA en el derecho procesal

A partir de la Ley 270 de 1996 –Ley estatutaria de administración de justicia– en su artículo 95, el Consejo Superior de la Judicatura, en su avance por prestar un servicio de calidad, eficiente y efectivo, debe pro-

curar por la incorporación de la tecnología como elemento esencial para la prestación de la administración de justicia. Conforme a ello, es válido indicar que la incorporación de la inteligencia artificial (IA), al margen del derecho colombiano, tiene como punto de partida la acción procesal (Ayuda, 1990) en sí misma, pues conforme a mandatos jurisprudenciales (Corte Constitucional, C-037, 1996) esta se debe enfocar en la práctica a la conservación y reproducción de expedientes, en la materialización de las formas de notificación, en la práctica de pruebas y como medio para garantizar el funcionamiento adecuado y razonable en la toma de decisiones jurisdiccionales.

Teniendo esta finalidad establecida por vía legal y desarrollada jurisprudencialmente, se plantea en el ámbito del derecho colombiano dos objetivos para la implementación de la IA. El primero de estos es mejorar la gestión y el desempeño del sistema judicial, y el segundo consiste en implementar medios tecnológicos en todas las instituciones de la rama judicial, con el fin único de mejorar el acceso a la justicia (Suarez & De León, 2018); de tal sentido que la IA, dentro del desarrollo del derecho procesal, hace especial énfasis iniciando por las decisiones judiciales.

IA en la toma de decisiones judiciales

Al igual que se indicó en la parte introductoria del artículo, se establece que la IA es un sistema que permite reconocer variantes y patrones de información o datos. En este sentido, según la doctrina, en materia de estudio lingüístico computacional existen tres variantes o clases de IA, que sin ser estas las únicas que existen, son las de mayor nivel de estudio. Por una parte, se encuentra el *deep learning* o aprendizaje profundo, por otra el *machine learning* o aprendizaje automático –llamado también por algunos autores como aprendizaje supervisado; y por último el *big data*, el cual se enfoca en el análisis de datos para todos, por medio de variables de entrada clasificando y organizando un patrón de salida para la toma de decisiones estratégicas.

La primera se asemeja en gran medida a una serie de redes neuronales de características artificiales, las cuales requieren de una gran cantidad de datos para ser operativas, esto representa, en otras palabras, la existencia de un sistema que funciona progresivamente de forma lógica conforme es entrenada para la realización de una actividad determinada, pero que, con posterioridad a ello, puede retroalimentarse y adquirir nuevas formas de interpretar y razonar. Este primer aspecto, incorporado en el entorno de un lenguaje o semántica jurídica del derecho procesal, representaría un déficit, pues carecería de los aspectos motivos o razón suficiente y propiamente explicativos, sobre los cuales se establece una decisión judicial (Corválan, 2019). Lo anterior se sustenta bajo el siguiente ejemplo, cuando una IA con *deep learning* identifica una situación fáctica, unos hechos jurídicamente relevantes o un problema jurídico, lo realiza conforme a los datos otorgados, es decir, emite un resultado aproximado, una comparación y mera predicción, que desde lo gramatical no pasa de ser una sola sintaxis, circunstancia que le impide explicar el método implementado y las razones que le permitieron insertar cierta frase, oración, o cita jurisprudencial.

Desde un punto de vista técnico de la IA, no es factible la implementación de este primer sistema, pues la técnica que utiliza el *deep learning*, en este caso es la comparación correlacional por medio de patrones de información, que si bien se realiza de una forma más efectiva y eficiente que una inteligencia humana – en este caso la de un abogado -, esta carecería del elemento de motivación. Aunque múltiples doctrinantes afirman que el aprendizaje profundo es la forma definitiva y verdadera de comprender la IA, al ser este un modelo con un mayor rango de complejidad y auto aprendizaje, con el tiempo no dependería de un ente externo para regular información, más allá de lo meramente técnico del sistema computacional, si presenta falencias en lo que respecta a la decisión o fallo.

En lo que respecta a la segunda, denominada *machine learning*, se concibe como una forma de obtener predicciones automatizadas, así como clasificaciones y detección de ciertos patrones, sin el riesgo de llegar a conclusiones y eliminando el margen de inexplicabilidad de las decisiones. Conforme a lo anterior, se presenta como un sistema que beneficia las tareas judiciales, pues permite la producción y precisión en ciertas tareas, esto se debe en gran medida a la técnica inductiva que permite la introducción de datos, la correlación de patrones facticos y la automatización de decisiones judiciales (Ponce, 2018). Por último, la tercera, *big data*, es el tratamiento de datos no solo entendido como algoritmos matemáticos derivados de un proceso electrónico; sino comprende también el tratamiento de la información derivada de las expresiones u opiniones hechas en redes sociales, páginas web, fotos, videos, entre otros.

Aprendizaje automático o supervisado: hacia el modelo de sistema evaluativo

Las reglas procesales en la medida que pueden presentar variantes cualitativas y una diversidad de matices en su aplicación, se permite la posibilidad de ser automatizables, sin dejar de lado que aun con la automatización o supervisión de estas, existen problemas jurídicos. Este es el caso de los supuestos ambiguos o las múltiples formas de interpretar una norma que se refleja en el hipotético caso, cuándo debe otorgarse una medida cautelar sobre privación de la libertad, donde existen por una parte los argumentos que otorga la Fiscalía frente a los elementos de conocimiento necesario que respaldan la medida, en cumplimiento de los criterios establecidos por el legislador, sustentados en el riesgo para la sociedad, la justicia y la víctima; como los que otorga la defensa, tendientes a desvirtuar la procedencia del decreto de la medida cautelar, al considerar que los presupuestos que aduce la Fiscalía para su decreto carecen de necesidad, proporcionalidad, racionalidad y del peligro que es otorgar la medida aun cuando la persona presenta condiciones claras que demuestran un nulo peligro para la sociedad, ambos criterios encontrándose debidamente sustentados por disposiciones normativas y jurisprudenciales.

En este sentido, no solo se encuentra en discusión aspectos propios de la semántica jurídica, a su vez se discute el contenido mismo del derecho como lo son los principios como mandatos de optimización (Alexy, 1993); conforme a lo cual, el aprendizaje automático, a modo de crear un sistema evaluativo, requiere para su aplicación la toma de decisiones respecto de las medidas cautelares, más allá de un análisis, acerca del precedente y del contenido de los derechos sustantivos. Por este motivo, el aprendizaje automático o supervisado parte de dos premisas:

- **Interpretación de las normas procesales:** la codificación procesal colombiana, que, para efectos de la investigación, se entenderá contenida en la Ley 1564 de 2012 – Código General del Proceso – y la Ley 906 de 2004 – Código de Procedimiento Penal – desarrollan en su contenido una serie de reglas dirigidas no solo para los abogados en ejercicio; sino también para los operadores jurisdiccionales, y además, en el caso de las medidas cautelares privativas de la libertad, como ejemplo desarrollado en el presente artículo, la potestad dentro del ente acusador. Corválan (2019A) señala que estos aspectos se presentan con similitud a la forma de operar de la IA y posibilitan que en el Estado colombiano se entrene mediante algoritmos una herramienta que facilite la tarea no de dictar una medida cautelar en sí misma, sino de otorgar aproximaciones evaluativas de un posible riesgo, es decir, cuantificar porcentualmente qué tan factible sea para el juez decidir X o Y circunstancia.
- **Sentido de la norma procesal en un lenguaje de IA:** en el trasegar de los párrafos antecesores se ha encaminado la dialéctica del escrito hacia el mero entendimiento de la norma jurídico-procesal como una fórmula del lenguaje, entendida como una serie de criterios léxicos comprendidos desde el estricto sentido de la palabra. Lo anterior, en todo caso, no representa del todo los conflictos que

tendría la IA dentro del proceso, pues si se limitará a la mera interpretación de reglas codificadas, desde hace varios años los operadores jurisdiccionales hubiesen sido remplazados por inteligencias artificiales. Lo anterior, quiere significar que el conflicto en sí mismo que tiene la IA en cualquier modelo es el sentido mismo de la norma, en este caso de la procesal, concebida no desde un ámbito propio del lenguaje, sino por el contrario, de la expresión de los signos que quiso representar una determinada norma; en otras palabras, del sentido que el legislador quiso darle a cierto artículo o la interpretación sistemática que ha realizado de esta un determinado órgano jurisdiccional.

Estos problemas no solo son propios de una aplicación normativa con IA, se evidencian a su vez al tenor de las múltiples interpretaciones y formulaciones normativas que pueden brindar los abogados sobre un caso en concreto, al existir vaguedad o ambigüedad dentro de una norma (Rodríguez & Bulygin, 2002). Es decir, a pesar de que se sigan criterios taxativos, se pueden representar dos o más formas de comprenderse una norma, así como también las extensiones de la misma, las dudas respecto del concepto jurídico, los elementos que la integran, los casos particulares, entre otros aspectos que representan la necesidad, no solo de incorporar las reglas procesales y el sentido lingüístico, sino también el sentido integro de la norma procesal que se incorporaría dentro del sistema evaluativo, lo cual cimienta entonces lo que a concepto personal determinó como reglas normativas con sentido lingüístico específico. Esto no sería otra cosa, que, de forma asistida a la IA, pueda incorporar los elementos jurídicos anexos a las reglas establecidas en los códigos procesales, para con ello solucionar de forma extendida los análisis profundos que realizaría un modelo con *deep learning*.

Al respecto de lo anterior, autores como Genero R. Carrió (1965) realizaban dicho análisis acerca de los sistemas del lenguaje jurídico y cómo la regulación de tales aspectos no se hace necesariamente bajo aspectos legislativos, sino propiamente integrales de los intérpretes de la norma. Esto sustentando en que tanto para los humanos, como para los sistemas de IA, no es posible totalizar los casos posibles, ni incluir o excluir ciertos aspectos de forma totalmente automatizada o de aprendizaje profundo, pues lo que permite aplicar una norma a un caso en concreto, es lo mismo que realiza una IA consistente en simples previsiones o aproximaciones.

Entrando ahora en el campo de lo teórico, y haciendo una revisión en retrospectiva a la necesaria regulación tanto judicial, en el sentido de cómo operará la IA en las diferentes disciplinas del derecho; como en el aspecto legislativo, que deviene de la identificación de los aspectos en específico de cada disciplina en que se debe incorporar la IA, surge el tema de la responsabilidad del Estado por error jurisdiccional y el defectuoso funcionamiento de la administración de justicia.

El error jurisdiccional o defectuoso funcionamiento de la administración pública como fuente de responsabilidad estatal

¿Qué sucede cuando falla una IA con un modelo de aprendizaje supervisado? Entrando en materia, inicialmente se podría considerar la existencia de un error jurisdiccional o judicial, al tenor de lo establecido por el artículo 66 de la Ley 270 de 1996, que lo define como todo aquel:

“(…) cometido por una autoridad investida de facultad jurisdiccional, en su carácter de tal, en el curso de un proceso, materializado a través de una providencia contraria a la ley” (Ley 270, Art. 66).

Esta definición, llevada al campo de la inteligencia artificial, aplicaría que si al momento de fallar y el operador jurisdiccional tomase una decisión errónea (*Figura 1*), al haber acogido la aseveración o predicción

porcentual de riesgo que otorga IA, eventualmente se podría considerar como una forma de error en el funcionamiento judicial.



Figura 1. Aplicación de IA
Fuente: elaboración propia.

Por ello, es pertinente entrar a debatir si dicho error (Figura 2) se generó por tres de las siguientes situaciones fácticas:

- La IA determinó de manera razonable que la decisión tomada acude a criterios propios de las reglas procesales, el sentido lingüístico de la norma, y el caso en específico, pero, no obstante, como se vio anteriormente que dichas decisiones no obedecen en sí mismo a otros aspectos aún más específicos del sentido de la norma, constituyendo un error jurisdiccional, al ser la decisión contraria a la ley.
- Los datos incorporados al algoritmo de la IA – al ser esto un modelo asistido– no corresponden a los verdaderos datos, no solo a los derivados de las reglas normativas con sentido lingüístico específico, sino que a su vez omitió detalles que le hubiesen permitido a la inteligencia realizar una evaluación de riesgos más acertada a la realidad.
- El operador jurisdiccional no tomó en cuenta que la IA, con un modelo asistido de *machine learning*, permite analizar el caso y dar en un rango de evaluación una determinada decisión, aspecto que puede estar conforme a derecho, pero no ha hecho, o por lo contrario, estar conforme a hecho y no al derecho.

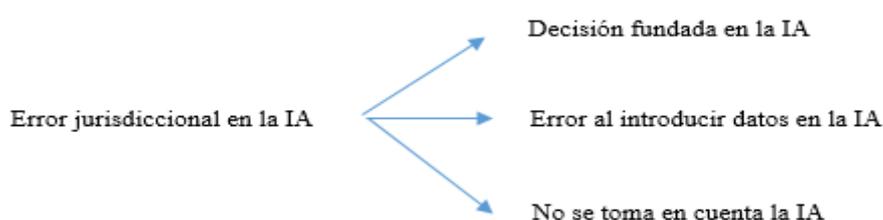


Figura 2. Error jurisdiccional en la IA.
Fuente: elaboración propia.

Al respecto de lo anterior, el Consejo de Estado, en el año 2012, indicó en la sentencia 22205 que el error jurisdiccional se da por una interpretación errónea, una aplicación indebida, una falta de aplicación normativa; en los casos de vía de hecho, cuando se configura en una mera decisión caprichosa y arbitraria, es decir, una motivación interna del operador judicial; concepto que, en todo caso, podría acoplarse a los tres supuestos de hecho citados en el párrafo anterior.

No obstante a ello, cabe precisar que, en el caso de las medidas cautelares, cuando el juez sustenta la decisión que tomó por decretarlas u omitirlas, en razón a la IA con sistema evaluativo de riesgos, no solo se

constituye el régimen de responsabilidad por error jurisdiccional, ya que para el caso específico, el verdadero régimen imputable es el defectuoso funcionamiento de la administración de justicia, sustentado en la acción u omisión presentada con ocasión del ejercicio de la función de impartir justicia, que puede provenir no solo de los operadores jurisdiccionales; también podrá constituirse en los casos de particulares investidos de facultades jurisdiccionales, empleados, agentes y auxiliares judiciales. Esto quiere decir que en los casos en que la IA falle, que un empleado o agente fallase al incorporar los datos exactos al algoritmo de la IA, o que el juez tomase una decisión únicamente basando su criterio en la IA, configuraría un defectuoso funcionamiento en la administración pública, pues en el caso específico de las medidas cautelares se estaría generando un daño a la persona que configura consigo el *periculum*, y un riesgo de viniente de la IA.

Anexo a esto, la doctrina y jurisprudencia ha establecido una diferenciación entre error y funcionamiento defectuoso, sustentando en que el funcionamiento se da en todo aquel momento que se produzca una acción u omisión entre las fases necesarias para adelantar el proceso o la ejecución de providencias judiciales (Ruiz, 2016). Es decir, las medidas cautelares entrarían en esta categoría, tal y cómo se verá en el siguiente apartado.

Medidas cautelares: omisión y decreto

Es plausible indicar en palabras de Rojas (2017) que no existe medida cautelar, cuya adopción esté libre de generar efectos dañinos a la integridad de una persona, un riesgo para la sociedad o un peligro para quien la solicitase, pues todas realizan un ejercicio de limitar derechos, y, por lo tanto, la proporcionalidad que deviene de estas constituye en últimas un perjuicio. Si bien no todas las medidas generan un equiparable riesgo, el caso de la privación de la libertad o detención preventiva es por naturaleza, la de mayor agravio para una persona, ya sea que esta se decrete, o en últimas se omita decretar, y, por lo tanto, se genere un daño a la sociedad o a quienes, en su momento, por solicitud de la Fiscalía, se pidió proteger. De esta manera, la medida cautelar toma especial análisis, pues compromete la integridad y dignidad humana, por lo tanto, suena paradigmático no solo aplicar la IA como forma de dignificar a la persona por la toma de decisiones en el ámbito de las medidas cautelares, tanto para los casos de riesgo – como lo es el caso del sistema evaluativo-; si no también como alternativa para agilizar dicha toma de decisiones y evitar un *periculum*.

Medida cautelar de privación de la libertad con IA

Teniendo esta dirección como eje central, cabe indicar que la IA, además de las reglas normativas con sentido lingüístico específico que se representan en todo caso con la construcción y aplicación de un algoritmo; se deben tener en cuenta para el momento de emitir un concepto, fallo o aseveración en términos de porcentaje de riesgo o peligro, los elementos de la proporcionalidad, razonabilidad y necesidad (Fábrega, 1998). Esto representa dos escenarios concretos en un trato específico, por una parte, establecer que la proporcionalidad, razonabilidad y necesidad se optimicen mediante algoritmos a la IA, o, por el contrario, que esta tarea sea específica del juez con posterioridad a la aproximación que emitió la IA en el caso específico.

Esto en aras de evitar errores jurisdiccionales o funcionamiento defectuoso de la administración de justicia, por haber emitido un fallo arbitrario sin fundamento, o por aspectos propios del sistema evaluativo. En este sentido, la privación de la libertad o detención preventiva se atribuye a tres finalidades enmarcadas en la Ley 906 de 2004 que deben ser en todo caso sustentadas por los fiscales ante los jueces de control de garantías, al momento de presentar la solicitud. Estas son:

- Asegurar la comparecencia del imputado y con ello se permita el cumplimiento con posterioridad de la sentencia.

- Evitar que se obstruya de una u otra forma el correcto ejercicio de la administración de justicia.
- Proteger la seguridad de la sociedad y de las víctimas, evitando el posible riesgo de reincidencia.

Así mismo, respecto a estas causales, se ha indicado a manera de complemento las siguientes finalidades:

- Evitar que se entorpezca la investigación.
- Impedir que el investigado continúe delinquiriendo durante el transcurso del proceso.
- Asegurar que de forma efectiva comparezca al proceso y con posterioridad cumpla su condena.

Hacia una solución entre reglas y principios

En este orden de ideas, y teniendo claro que debe acudirse a las reglas normativas con sentido lingüístico específico, así como a los criterios y explicaciones normativas, donde el operador jurisdiccional cumple un papel relevante dentro de la toma de decisiones que se contienen en el fallo, es importante indicar que a efectos de darle operatividad a un sistema de evaluativo de riesgos, donde se mida el nivel de probabilidad y porcentaje, al otorgar una medida o negarla, este no se encuentra al tenor de un debate entre principios y reglas, pues el mandato de optimización, que en un inicio se tomó como punto de partida, no tendría lugar en este caso específico, puesto que bajo ninguna circunstancia se estaría dando por aludida la presunción de inocencia, en el entendido que cómo se verá a continuación mediante los precedentes jurisprudenciales, lo que se buscaría en sí mismo es evitar la existencia de un peligro o un riesgo.

Casos de error judicial defectuoso, funcionamiento jurisdiccional y medidas cautelares

El primero de octubre de 1992, el Consejo de Estado en la sentencia 7058 emitió lo que se conoce como uno de los primeros fallos en materia de defectuoso funcionamiento jurisdiccional, dentro del caso, donde al señor Fabio Efraín Sánchez, se le encontró en su poder armas de fuego sin los debidos requerimientos legales para portarlas. Durante el proceso, al acusado se le dictó como medida cautelar la privación de la libertad, aun cuando este no presentaba antecedentes penales u otros aspectos de relevancia jurídica para justificar su procedencia, y adicional a ello, se encontraba con problemas de salud relacionados; circunstancia que obtuvo como resultado de su indebida aplicación, que el señor Sánchez falleciese sin que hubiese terminado el trámite procesal.

En un segundo caso, el 09 de septiembre de 2013, el Consejo de Estado, en sentencia 27452, encontró patrimonialmente responsable al Estado colombiano, dentro del caso en el que un juez de control de garantías se abstuvo de decretar una medida cautelar privativa de la libertad, aun cuando quien la solicitó en la audiencia preliminar, indicaba que existía un riesgo y un peligro de que se constituyera una agresión física a la víctima y su núcleo familiar. Resultado de esto una mujer fue agredida al límite de configurarse un intento de homicidio y sus hijos fueron víctimas de múltiples lesiones físicas y psicológicas.

En un tercer y último caso, el 26 de febrero de 2015, el Consejo de Estado, en fallo 32207, exoneró de responsabilidad al Estado por defectuoso funcionamiento de la administración de justicia, en el caso de una persona que fue privada de la libertad con ocasión a una medida cautelar, circunstancia que constituyó un daño antijurídico derivado de la pérdida patrimonial por la inejecución de sus actividades económicas. Esto

sustentado en que el Consejo de Estado, si bien encontró la presencia de un daño, el demandado no presentó el suficiente soporte fáctico y jurídico en la demanda de responsabilidad.

En todos los casos hay tres aspectos específicos que derivaron al error jurisdiccional o al defectuoso funcionamiento de la administración, consistentes en la existencia del riesgo, el *periculum* y un daño. Conforme a lo anterior, ¿cómo pueden realizarse las evaluaciones donde el juez de manera acertada pueda tomar una decisión en materia de medidas cautelares, sin que de esta forma se genere un daño, exista un riesgo o peligro?

La respuesta al anterior interrogante pareciera un tanto complicada a simple vista, pues si se tienen en cuenta los ejemplos, en los tres casos, aun existiendo aseveraciones tanto jurídicas, como fácticas por parte del juez para tomar una decisión, existen elementos dañinos para las partes, en el primer y tercer caso por el decreto y en el segundo por omisión. En esta medida, teniendo en cuenta las reglas para establecer cuando debe ser decretada una medida cautelar, cabe destacar la alta posibilidad de otorgarle una herramienta al juez que le permita con un mayor rango de aproximación porcentual indicar si existe o no un riesgo peligro, y que estos en últimas no deriven en un daño. Aunado a lo anterior, están los argumentos expresados por la fiscalía, en su calidad de ente encargado de sustentar cuando un imputado representa un riesgo para la sociedad, así como un potencial obstructor de la justicia; y de otro lado, los de la defensa argumentando que al dictarse la medida se estarían vulnerando los derechos y configurando un daño a la persona. Esta situación un tanto paradigmática, a simple vista evidenciaría la inexistencia de condiciones idóneas para la aplicación de la IA, al presentarse múltiples elementos, reglas y situaciones jurídico – fácticas. Llevándonos a preguntar si ¿es entonces posible establecerlo dentro de un algoritmo mediante el lenguaje jurídico?

La respuesta es afirmativa, y en Colombia, como se verá en el siguiente capítulo, se ha venido utilizando desde el año 2018, únicamente para los esquemas internos de la fiscalía; sistema que llevado a una herramienta jurisdiccional es definitivamente la herramienta que le permitiría al juez, con un mayor rango de aseveración, dictar medidas con toda la confianza sin que deriven entonces a un error jurisdiccional o un defectuoso funcionamiento de la administración de justicia – claro está sin exceptuar los casos descritos en el numeral 1.2-

Sistema evaluativo de riesgos

El autor Jordi Nieva (2018) afirma que existe la tendencia de darle un valor estadístico al riesgo y al peligro. Tesis que, si bien es correcta, a su vez confirma que para llegar a una conclusión en lo que respecta a la existencia de un riesgo, a este debe otorgársele un valor numérico, siendo en el caso concreto el porcentaje que se obtiene y permite la construcción de un pronóstico, en referencia a la decisión correcta o incorrecta de un determinado fallo. No obstante, a ello, también indica que, para darle un margen de precisión y confianza en este mecanismo de fallar las medidas cautelares, debe existir un porcentaje de incertidumbre, el cual como se indicó en párrafos anteriores, puede ser llenado por el juez al momento de tomar una decisión final respecto del porcentaje que arrojó la IA como modelo evaluativo.

Principalmente esto se refleja en que el sistema evaluativo de riesgos con IA no nace esencialmente como una forma de suplantar o suprimir los análisis internos que realiza el juez al momento de fallar, por el contrario, pretende otorgarle al operador jurisdiccional un mayor rango de confianza en las decisiones que expida, evitando una serie de situaciones negativas que pueden ocurrir. En este orden de ideas, sumado esto a riesgos, peligros y daños que genera una omisión o decreto indebido de una medida cautelar, junto al error jurisdiccional o funcionamiento defectuoso que deviene del juez, o en un caso, ya contemporáneo de la mis-

ma IA por una falla en el servicio; se suman los errores de tipo I y II derivados de predicciones o inferencias que son aquellas que deben ser pasadas a algoritmos:

- Tipo I: se decreta una medida a un imputado que según los aspectos fácticos tiene un bajo riesgo por reincidir en un delito u obstaculizar la justicia.
- Tipo II: no se decreta una medida a un imputado que, si poseía un alto margen de riesgo por reincidir en una conducta punible, así como afectar la investigación y obstaculizar la administración de justicia.

Entonces, con estos datos sobre el proscenio, otorgarle un mayor margen de aceptabilidad a una decisión no solo permitiría brindar mayor seguridad jurídica al proceso en general u ocasionar que el proceso penal en particular adquiriera una mayor confiabilidad; a su vez, por vía de criterios hermenéuticos, podría ser aplicado de forma similar a los tramites jurisdiccionales derivados de la aplicación de otras ramas del derecho, con el fin de evitar los diferentes riesgos que existen.

El riesgo como concepto tasable

En la medida que el riesgo sea calculable y evaluable, respecto de una medida cautelar conforme a las reglas procesales, es indudable llegar a pensar que con un margen entre el 90% y 99% de certeza en una decisión, se concluya que desaparece sin duda alguna y por completo el riesgo tanto para el imputado, como para la sociedad. Frente a tal aspecto, sin señalar cuál es la pena que se deberá aplicar sobre la confianza jurídica que pueda otorgar el modelo de IA al proceso, respecto del daño, el peligro o el riesgo, los contrastes entre la ficción y la realidad únicamente se dan con posterioridad al proceso. Ejemplo de lo anterior es el caso de los recursos, el querer implementar un sistema evaluativo de riesgos en ninguna instancia busca eliminar esta sede, pues esto acarrearía que las decisiones judiciales emitidas por el juez, fuesen abiertamente arbitrarias al no poder ser recurridas. En lo que respecta a los recursos con la implementación de la IA, no surtirán ninguna modificación sustancial, facultando a la defensa y la fiscalía, si así lo consideran jurídicamente necesario, a interponerlo en la respectiva etapa procesal el recurso, argumentando las razones jurídicas y fácticas por las cuales se debe o no otorgar la medida cautelar privativa de la libertad.

Criterios unificados

Si bien se ha indicado que la incorporación de un sistema evaluativo de riesgos no interfiere de forma directa en los llamados mandatos de optimización, esto se resuelve por medio de la integración de los criterios del juez al momento del fallo. Lo que sí permite la IA respecto de los principios, es propender por su garantía e inviolabilidad, creando consigo en todo el territorio colombiano la unificación, no solo de criterios jurídicos que devienen de las reglas normativas con sentido lingüístico específico; sino también de los fácticos y propiamente jurisprudenciales.

Lo anterior se sustenta en los índices aportados por la Fiscalía entre los años 2018 – 2019, donde se evidencia que las medidas cautelares de privación de la libertad que se presentaron, permitieron con más frecuencia que se configuren errores de tipo I, es decir, se les decreta a personas que tienen un bajo nivel de riesgo. Esto no solo transgrede el sentido lingüístico por el cual se establecen las reglas sobre solicitud de medida cautelar, dispuestas en la Ley 906 de 2004, a su vez viola el principio de proporcionalidad, así como el uso ineficiente de los recursos públicos destinados al sistema carcelario.

Por citar un ejemplo llevado al marco porcentual, se estima que, para el segundo periodo del año 2018, se realizaron un total de 59.723 imputaciones, de las cuales se solicitaron medidas cautelares privativas de la libertad en los casos donde las personas presentaban bajo nivel de riesgo un total de 22.304 veces, equivalentes al 37.3 %, y para el caso de mayor riesgo un total de 49.3%. No obstante, a lo anterior, frente a los casos no solicitados al momento de otorgar la medida privativa de la libertad en los asuntos de menor riesgo, se otorgaron un total de 12.515 veces que equivale a un 56.1 % del total de solicitudes, frente a los casos donde la persona presentaba un mayor riesgo, donde fue de tan solo de 9.410 veces, es decir el 31% de las solicitudes (Fiscalía General de la Nación, 2019).

Esto quiere decir una de dos cosas, los fiscales no se encuentran capacitados para la correcta solicitud de medidas, o los jueces no están teniendo en cuenta los elementos de cada caso en específico para su decreto; lo cual podría derivar entonces en un defectuoso funcionamiento de la administración de justicia y se estaría legitimando a la víctima para eventualmente iniciar acciones legales contra el Estado.

Patrones observables como forma de construir un algoritmo

Hernández Giménez (2019) señala que es necesaria la creación de una serie de patrones y construcción de diversos puntos de vista para la realización de un sistema de predicción de riesgos, en miras a evitar la configuración de tales aspectos. Afirmación que suena lógica desde el horizonte negativo que afronta la realidad de las medidas privativas de la libertad.

Desde un punto de vista de la eficiencia, Malavé (2015) señala que se busca reducir con la operatividad de una IA el reducir los riesgos en la reincidencia criminal, así como el peligro y los daños que se generen. Desde un punto de vista jurídico y de factores de justicia, darle cumplimiento a los principios de proporcionalidad, presunción de inocencia y reglas jurídicas establecidas en los códigos procesales. Por lo tanto, los patrones observables son:

- La reincidencia criminal, la posibilidad de obstaculizar la justicia y los medios de investigación.
- Los errores de tipo I y II, así como los jurisdiccionales y de defectuosa administración de justicia que devienen del operador.
- Las solicitudes
- El otorgamiento de la medida.

Es a partir de esto que se puede crear entonces un algoritmo que ponga en funcionamiento el modelo de inteligencia artificial con *machine learning*, o aprendizaje supervisado (Chen & He, 2020).

Hacia una *big data* en materia penal

Finalmente, es procedente indicar que la creación e incorporación de forma oficial al proceso judicial de un sistema evaluativo de riesgos, en el decreto de las medidas cautelares privativas de la libertad, así como para todas aquellas que respondan a un riesgo o *periculum*, permitiría la compilación de un sin número de información que, por su volumen y complejidad, representaría un alto nivel de dificultad administrarla en una sola base de datos. Por ende, el proceso judicial colombiano tendría al día una base de datos de relación estadística que indicará una inferencia entre las medidas cautelares decretadas, así como también las circuns-

tancias de negación creando la posibilidad de tener una *big data* que constituya un conjunto de precedentes que probablemente se puedan ejecutar en un futuro de manera automatizable.

La asociación Gartner (2011) describe el *big data* como activos de información de gran volumen, alta velocidad y/o gran variedad que requieren nuevas formas de procesamiento para permitir una mejor toma de decisiones, descubrimiento de información y optimización de procesos. Sin embargo, el uso del *big data* plantea muchas preocupaciones éticas que debieran ser tenidas en cuenta a la hora de abordar legalmente el tema. Pero su definición está concentrada en la formación de las cinco uves: volumen en referencia al tamaño y escalabilidad, velocidad en la generación y procesamiento de datos, variedad que hace referencia a la cantidad de datos y su tamaño, veracidad de los datos, donde se busca identificar y calificar estos datos para ser tratados, y valor de los datos generando valor agregado a la situación específica (Ladrero, 2020).

Partiendo del proceso judicial de un sistema evaluativo de riesgos en el decreto de las medidas cautelares privativas de la libertad, así como para todas aquellas que respondan a un riesgo o *periculum*, desde el uso y aplicación de un *big data*, donde se prohíbe discriminar a nadie en función de algunos parámetros como raza, sexo, edad, religión, etc. Esto conlleva a lograr la inclusión y mitigar las brechas en la equidad e igualdad para todos. Por tanto, el uso de análisis de *big data* implica el despliegue de una serie de técnicas y herramientas diseñadas para encontrar patrones, indicadores de comportamiento o identidades de individuos, grupos o poblaciones que permitirán el control y manejo de la IA en este sistema evaluativo de riesgo.

METODOLOGÍA

La metodología de la investigación es básica jurídica, es decir, busca concatenar los análisis jurídicos, jurisprudenciales y respectivamente bibliográficos acerca de los modelos de predicción de riesgo de la inteligencia artificial respecto del decreto de medidas cautelares por parte de la entidad jurisdiccional. A su vez, es una investigación de índole teórico, en tanto busca dar una solución a un problema surgido por reflexiones teóricas actuales. Posee esta calidad en tanto los resultados se perciben por medio del análisis de leyes, principios y construcciones de modelos abstractos capaces de representar y explicar la realidad actual de la aplicación de la IA en las medidas cautelares privativas de la libertad. Por lo cual, a su vez, es una investigación eminentemente hermenéutica, puesto que se presenta desde la óptica de la interpretación jurídica (Hernández & Ortega et al. 2017).

El método de la investigación, a razón del nivel de conocimiento, es descriptiva, explicativa y por el tratamiento de la información, es cualitativo. De esta manera, podemos decir que es descriptiva en la medida que el estudio busca identificar o caracterizar un cierto comportamiento, describiendo en este caso la operatividad que tendría la IA dentro de un proceso específico y determinado. De tal forma que la información resultada de la investigación permita ampliar o extender los asuntos de estudio sobre la aplicación de la IA en el proceso del Estado colombiano.

A su vez, es explicativa ya que busca establecer las respectivas causas y efectos, es decir, identificar las causas de por qué es necesario aplicar la inteligencia artificial en las medidas privativas de la libertad, y a su vez determinar cómo aun con la aplicación de esta los errores jurisdiccionales seguirían presentes dentro del proceso. Sobre lo anterior, la investigación permite arrojar reflexiones que configuren las razones y motivaciones de los fenómenos de estudio.

Por tal sentido, el modelo de algoritmo que se implementa usa la tecnología *machine learning* – aspecto que se abordará con mayor detenimiento en el literal b del título siguiente- dicho modelo usa la técnica de aprendizaje supervisado, pero que a su vez usa la técnica de aprendizaje automático de análisis regresivo

de *extreme gradient boosting*, en este sentido, se usará como base el algoritmo $P(Y_{ie} = 1|X) = M(X_{individuo}, X_{Evento}, X_{delito}, X_{medidas}, X_{capturas}, X_{INPEC})$ que es el dado por la Fiscalía General de la Nación para poder abordar la temática de la investigación.

Y finalmente es cualitativa porque los datos que son sometidos a tratamiento y procedimiento de la indagación son eminentemente jurídicos y bibliográficos, y el análisis que se emplea es desde la óptica de lo teórico. El procedimiento que se empleó a razón de lo anterior es deductivo, esto quiere decir que se pasó de las generalidades y conceptos sobre la inteligencia artificial dentro del proceso y se aplicó a un caso en particular que es el colombiano con las medidas privativas de libertad.

RESULTADOS

¿Cómo funcionaría la IA entonces?, es la pregunta final por responder. Alejando los criterios meramente técnicos y computacionales que puede presentar la creación de una IA, en este caso con *machine learning* (Kleinberg, 2006), al ser un sistema evaluativo se toman los siguientes elementos:

- Las características del individuo.
- Los delitos previstos.
- Las capturas previas.
- Las características del evento en cuestión.
- La información dada por el Instituto Nacional Penitenciario y Carcelario.
- Las medidas previas.

Sobre esta última, se debe, a su vez, tener en cuenta las reglas normativas con sentido lingüístico específico, así como todo lo dicho a lo largo del artículo como criterios adicionales. Todo esto, con los aspectos que analiza el juez de forma interna, así como los que otorga la fiscalía y la defensa en su momento, arroja la probabilidad, que es una estigmatización del riesgo y *periculum*. Así las cosas, el algoritmo que obedece el sistema de medidas cautelares privativas de la libertad sería el siguiente: “ $P(Y_{ie} = 1|X) = M(X_{individuo}, X_{Evento}, X_{delito}, X_{medidas}, X_{capturas}, X_{INPEC})$ ” (Fiscalía General de la Nación, 2019).

Este algoritmo actualmente es utilizado por la fiscalía en su modelo de IA PRISMA. Aunque en lo que respecta a la decisión del juez, se debe agregar un factor extra, consistente en todos aquellos elementos adicionales que son observables y no son en ninguna instancia tasables o cuantificables, como lo serían las indagaciones que este le hace al imputado en el momento de tomar la decisión. En todo caso, el algoritmo, sin necesidad de cambiar o modificarse, le estaría añadiendo un elemento humano a la regulación computacional que posee.

Modelo de predicción de riesgos PRISMA: perfil de riesgo de reincidencia para la solicitud de medidas de aseguramiento

Pareciera paradigmático la necesidad por incorporar y regular la IA en el esquema procesal colombiano, cuando la Fiscalía inicio en el año 2019 una prueba piloto con 5 fiscales de las direcciones seccionales, Bo-

gotá, Cartagena, Popayán, Medellín e Ibagué, consistente en la implementación de las IA como herramientas que les contribuyeran a predecir en un esquema porcentual, el riesgo que existía respecto del imputado, para con ello tener garantía que las medidas a tomar eran 100% efectivas y que en todo caso no configura el tomarlas ningún peligro legal (Fiscalía General de la Nación, 2019).

Esta implementación de modelo permitió no solo la disminución del 25% del índice de reincidencia criminal, además logró disminuir en un 36% el decreto de medidas cautelares, permitiendo que los errores de Tipo I y II no encuentren aplicación directa dentro del derecho procesal colombiano en un futuro. No obstante a ello, es necesario que tal herramienta sea ampliada a todo el territorio nacional y otorgada a los operadores jurisdiccionales, sustentado en que la evaluación de riesgo y la inferencia lógica que se realiza no debe recaer en su totalidad en quien solicita, también deberá garantizarse en quien la otorga.

Tal herramienta funciona como ejemplo para esquematizar la explicación un tanto confusa de cómo se establecen los algoritmos dentro de una IA, así como la forma en que estos operan y han contribuido en un alto impacto en el proceso colombiano, pues no solo abre las puertas a la creación de inteligencias artificiales para otras medidas cautelares, en diferentes áreas del derecho donde no es el delito o los antecedentes los que toman papel protagónico, sino los factores patrimoniales de los implicados en el pleito jurídico, lo cual no es ajeno al momento de otorgar o no una medida cautelar. En lo que respecta a este ejemplo, en latinoamericana, según lo establecido por Paz Pellat (2019), México estaría pensando en adquirir modelos similares a los colombianos en lo que se refiere a IA para la administración de justicia, al observar los resultados estadísticos que arrojo PRISMA.

Sobre su especial aplicación en las medidas cautelares en materia penal

El decreto de medidas cautelares, en el caso precedente de la privación de la libertad, es en la *praxis* la medida por excelencia que ejecuta todos los factores y elementos jurídicos de un esquema procesal como el existente en la actualidad en el Estado colombiano, tan así, que el simple decreto u omisión de tal medida cautelar pone en tela de juicio la dignidad de una persona, su derecho fundamental a la libertad y la locomoción, por ser está considerada de un alto nivel de riesgo para la víctima, la sociedad, y en casos determinados, para la investigación o la administración de justicia.

Por otro lado, existe el denominado *periculum*, que no es más que la configuración de un peligro por la sucesión de una determinada concurrencia de hechos o factores jurídicos, siendo a partir de este elemento que sucede el error jurisdiccional y defectuoso funcionamiento de la administración de justicia. De allí que se cumplan los objetivos y se logró contestar la pregunta de investigación planteada en este estudio, con aspectos relevantes como: la IA por su naturaleza, basada en el lenguaje computacional, entiéndase algoritmos y la forma en que ésta funciona a partir de una serie de reglas establecidas para la realización de un conjunto de reconocimiento de patrones, permite no solo su integración al derecho procesal de forma casi orgánica, sino que, a su vez, admite que las reglas y normas procesales sigan patrones y pasos lógicos que puedan transformarse a un algoritmo.

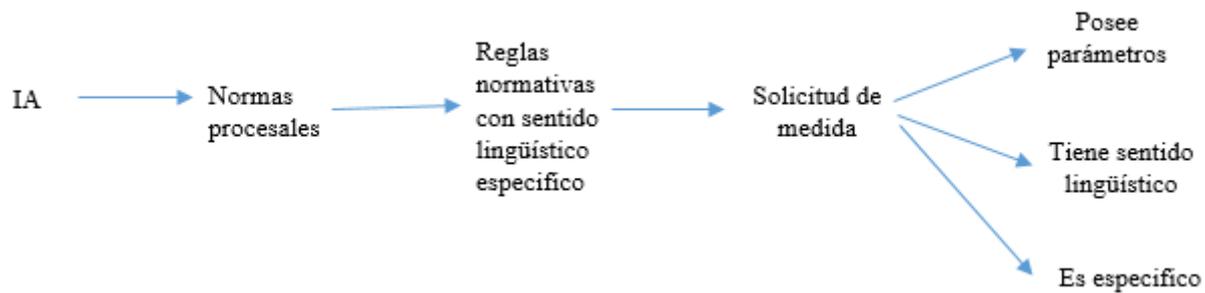


Figura 3. Aplicación de la IA dentro de la solicitud de medida.
Fuente: elaboración propia.

Lo anterior quiere decir que la búsqueda por aplicar la IA, consiste en la transformación de normas procesales a reglas normativas con sentido lingüístico específico, concepto que se conceptualizó y teorizó en el marco de la investigación, con la necesidad de indicar que toda norma procesal, que en su contenido establezca una serie de patrones o reglas, entienda en este caso las aplicables en materia de las medidas privativas de la libertad establecidas por la Ley 906 de 2004, donde existen tres momentos procesales para solicitar la medida privativa; también representa los argumentos a tener en cuenta en juez para otorgarla u omitirla. Esto quiere decir que las normas presentan parámetros; tienen un sentido lingüístico determinado, que es el de la medida cautelar; y es específico porque a su vez presenta especificidad al momento de ser otorgada.

Hacia un modelo de IA en el derecho procesal

A partir de esta última, surgen a su vez los elementos para tener presentes en la construcción y realización en concreto del algoritmo que definiría la IA, que son seis; las características del individuo; los delitos previstos; las capturas previas; las características del evento en cuestión; la información dada por el Instituto Nacional Penitenciario y Carcelario y, por último, las medidas previas. Todos estos parámetros son en últimas cuantificables y tasables, es decir, no solo arrojan decisiones en forma cualitativa, que es inviable para el mundo del derecho, al no responder estas a los factores de motivación de una decisión judicial, sino que, a su vez, arrojarían aseveraciones o aproximaciones desde lo cuantitativo y porcentual, lo que representa una verdadera forma de acercar al juez a tomar una de decisión.

Es por ello que el fin mismo del capítulo no es demostrar que la IA entra a solucionar todos los problemas que el derecho no ha podido, así como tampoco llegar a la conclusión clásica a la que todos llegan, en que la IA es una herramienta para el proceso, por el contrario, la IA debe concebirse como una forma de humanizar el proceso, al ser esta una forma de acercarse a una verdad procesal desde lo lógico y razonable, sin vulnerar principios de proporcionalidad, razonabilidad y necesidad; los cuales, según datos dados por la Fiscalía General de la Nación, se encuentran actualmente transgredidos en el decreto desproporcionado de estas medidas cautelares.

En tal sentido, el modelo de IA óptimo para este tipo de situaciones no sería el del *deep learning*, sino el de *machine learning*. Nieve (2018) sostiene que la IA permite, además de automatizar ciertas tareas o decisiones, la asistencia y facultas para cada caso en particular que surja dentro del proceso judicial, la incorporación de nuevos datos y aspectos que fueron presentados y observados por el juez dentro de la audiencia. Llevado lo anterior a un ejemplo aplicado a la realidad, está el caso de la IA PRISMA, que la Fiscalía General de la Nación ha implementado y en la actualidad ha mostrado una relación de datos favorables y humanizados del proceso.

La afirmación precedente se debe principalmente a que un indebido decreto de medidas cautelares desencadena una serie de situaciones complejas de responsabilidad del Estado, principalmente por errores jurisdiccionales y defectuoso funcionamiento de la administración pública, debido a la generación de los errores de tipo I y II, siendo que en los primeros no se otorga una medida privativa a quien si se debía, y por lo tanto, se pone en riesgo a la víctima y a la sociedad, permitiendo la generación de un daño antijurídico, por lo que se constituye la responsabilidad del Estado; y en el segundo, se decreta a quien no debía realizarse y se genera un daño por situaciones económicas, comerciales y demás, que puedan ser directamente afectadas. La IA, por lo tanto, permitiría que todas aquellas situaciones, donde el juez pueda tener duda en la toma de esta decisión, se cuenten con una herramienta que le ayude a deducir con un casi 100% de seguridad que la medida cautelar otorgada no transgredirá ningún derecho o garantía fundamental.

No obstante, esta última situación sería la paradigmática en lo que respecta a la incorporación de la IA en el proceso, al suscitarse dos nuevas formas de error o funcionamiento defectuoso. Por una parte, donde el juez deja todo su criterio a la aproximación arrojada por la IA, situación que sería arbitraria del ideal que el juez, además de su propio criterio e indagación preliminar, se sirva de la IA como forma de ayuda; y la segunda, donde la IA emitió una aproximación errónea, esto debido a que el operador judicial o técnico experto en estos sistemas introdujo un dato erróneo dentro del sistema, aspecto que nuevamente llevaría a debatir en las altas cortes la responsabilidad por defectuoso funcionamiento (Nieva, 2018).

Finalmente, generando un nuevo aporte, y pasando lo explicando anteriormente de la materia penal a la procesal civil y administrativa, es procedente a concepto propio generar un algoritmo tasable que en este sentido sería:

$$P(Y_{ie} = 1) = M(X_{\text{ingresos}}, X_{\text{gastos}}, X_{\% \text{de embargo}}, X_{\text{duración}}, X_{\text{deuda/daño}})$$

Aspectos que por regla general se encuentran en cualquier proceso donde se solicite una medida cautelar.

CONCLUSIONES

En aras a responder la pregunta problema de investigación establecida en el libelo introductorio del capítulo, cabe indicar que aún con todos los beneficios que tiene la IA para este tipo de medidas cautelares, los errores, riesgos y peligros dentro del proceso judicial no dejarían de existir, pero esto si permitiría disminuir en gran medida los injustos. Esto significa que la mera aplicación de la IA, dentro del decreto de medidas cautelares, no representa dentro del contexto del proceso penal que bajen los errores o defectuosos funcionamientos de la administración de justicia, sino por lo contrario, estos pueden disminuir, pero a su vez, daría pie a la existencia de otras variantes de errores jurisdiccionales.

Ahora bien, respecto de los objetivos específicos planteados, es procedente concluir de cada uno lo siguiente:

- Analizado el modelo de inteligencia artificial pertinente para el sistema jurídico procesal del Estado colombiano, que es en este caso un sistema operativo con *machine learning*, se encontró que efectivamente la aplicación de la IA permite disminuir en gran medida la ocurrencia de errores judiciales en tanto el juez puede tener un “segundo” análisis de la decisión con base en los datos que arroja dicha herramienta, no obstante, aun así el juez puede acogerse o no a tal decisión, dando por consiguiente dos escenarios: el juez acoge la decisión y aun así su análisis genera un daño en tanto no apreció otros aspectos facticos y el juez se alejó de la decisión y aun con ello ocurrió un daño.

- Respecto del segundo objetivo, es factible indicar que existen dos grandes situaciones fácticas que suscitan errores jurisdiccionales: cuando se dictan, pero no debía ser decretada y cuando se omiten, pero este si debía ser decretada, esto admite establecer los elementos, lo que permite establecer cuáles son los parámetros en los cuales debe operar la IA y cómo el juez debe alejarse de estas situaciones para evitar un defectuoso funcionamiento de la administración de justicia.
- Finalmente, el sistema evaluativo de riesgo dentro del sistema jurídico colombiano opera mediante el proyecto PRISMA, el cual además de permitir materializar los errores y parámetros anteriormente establecidos, arroja los elementos normativos con sentido lingüístico, los cuales permiten proyectar datos tasables. En tal sentido, estos aspectos son: las características del individuo, los delitos previstos, las capturas previas, las características del evento en cuestión, la información dada por el Instituto Nacional Penitenciario y Carcelario y las medidas previas.

Todo lo anterior permite afirmar que efectivamente darle operatividad a la inteligencia artificial, dentro del proceso colombiano, es factible, posible y logable, en tanto ya se encuentra en aplicación; no obstante, deben ser tenidos en cuenta los escenarios de error no solo del operador jurisdiccional, sino a su vez de la herramienta al ser un mecanismo de ayuda al juez y al fiscal.

REFERENCIAS

- Alexy, R. (1993). *Teoría de los derechos fundamentales*. Centro de estudios Constitucionales. Madrid, España.
- Ayuda, F. G. (1992). Acción procesal como punto de partida para la relación inteligencia artificial-derecho. *Informática y derecho: Revista iberoamericana de derecho informático*, (1), 85-100.
- Carrió, G., (1965) *Notas sobre Derecho y Lenguaje*. Editorial Abeledo – Perrot. Buenos Aires.
- Chen, T. & He. T. (2020) Xgboost: Extreme Gradient Boosting. Disponible en: <https://cran.r-project.org/web/packages/xgboost/vignettes/xgboost.pdf>
- Congreso de Colombia. (15 de marzo de 1996). [Ley 270 de 1996] Diario oficial No. 42.746 recuperado de: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0270_1996.html
- Congreso de Colombia. (31 de agosto de 2004). [Ley 906 de 2004] Diario oficial No. 45.658 recuperado de: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_0906_2004.html
- Congreso de Colombia. (12 de julio de 2012). [Ley 1564 de 2012] Diario oficial No. 48.489 recuperado de: http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1564_2012.html
- Consejo de Estado. (1 de octubre de 1992). Sala de lo Contencioso Administrativo, Sección Tercera, [C.P. Daniel Suarez Hernández] Exp. 7058.
- Consejo de Estado. (27 de enero de 2012). Sala de lo contencioso administrativo, sección tercera [C.P. Carlos Alberto Zambrano Barrera] Exp. 22205.
- Consejo de Estado. (9 de septiembre de 2013). Sala de lo Contencioso Administrativo, Sección Tercera, [C.P. Olga Melida Valle de la Hoz] Exp. 27452.
- Consejo de Estado. (26 de febrero de 2015). Sala de lo contencioso administrativo, Sección Tercera [C.P. Olga Melida Valle de la Hoz] Exp. 32207.
- Corte Constitucional. (1996). Sentencia C-037. Rad. P.E.-008. M.P. Vladimiro Naranjo Mesa
- Corvalán, J. G. (2019). Inteligencia artificial y proceso judicial. Desafíos concretos de aplicación. Diario Derecho para Innovar. DPI.
- Corvalán, J. G. (2019A). *Prometea Inteligencia Artificial para Transformar Organizaciones Públicas*. Editorial Astrea.
- Eemeren, F., Garssen, B., Krabbe, B., Snoeck, A., & Verheij, B. (2014). Argumentation and Artificial Intelligence. *Handbook of argumentation Theory, Springer Science*, pp. 615 – 675. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9473-5_11
- Fábrega, J. (1998). *Medidas cautelares*. Editorial Gustavo Ibáñez, Bogotá.
- Fiscalía general de la nación. (2019). Herramienta PRISMA: Perfil de Riesgo de Reincidencia para la Solicitud de Medidas de Aseguramiento. Dirección de políticas públicas y estrategia.

- Gartner. (27 de junio de 2011). Says Solving 'Big Data' Challenge Involves More Than Just Managing Volumes of Data. *Businesswire*. <https://www.businesswire.com/news/home/20110627005655/en/Gartner-Says-Solving-Big-Data-Challenge-Involves-More-Than-Just-Managing-Volumes-of-Data>
- Hernández Giménez, M. (2019) Inteligencia artificial y derecho penal. *Actualidad jurídica iberoamericana*, (10), 792-843.
- Ladrero, I. (16 de diciembre de 2020). Las 4 V's del Big Data. BAOSS. <https://www.baoss.es/las-4-vs-del-big-data/>
- Lobos, R. L. (2010). El Uso de Nuevas Tecnologías en el Sistema Judicial: experiencias y precauciones. *RL Lobos, El Uso de Nuevas Tecnologías en el Sistema Judicial: experiencias y precauciones (págs. 2-13)*. Brasilia: Centro de Estudios de Justicia de las Américas.
- Malavé Naime, L. A. (2015). Inteligencia Artificial, In Dubio Pro Reo y Presunción de Inocencia. Modelando principios del juicio penal mediante un sistema argumentativo. *Revista DOXA*, (38) pp. 131-156, <https://doi.org/10.14198/DOXA2015.38.05>
- Nieva Fenoll, J. (2018). Inteligencia Artificial y proceso judicial. Edit: Marcial Pons
- Paz Pellat, M. (2019). Inteligencia artificial para la procuración y administración de la justicia. *Diario Ruiz Healy Times*.
- Ponce, J. (2018). La prevención de riesgos de mala administración y corrupción, la inteligencia artificial y el derecho a una buena administración. *Revista internacional de Transparencia e Integridad*, 6, 1-19.
- Rodríguez, J. L., & Bulygin, E. (2002). *Lógica de los sistemas jurídicos*. Centro de estudios políticos y constitucionales.
- Rojas Gómez, M. (2017). Lecciones de Derecho Procesal, Tomo 1 Teoría del Proceso. Editorial. ESAJU.
- Ruiz Orejuela, W. (2016). *Responsabilidad del estado y sus regímenes*. ECOES ediciones.
- Suarez, W., & De Leon, G. (2018). Inteligencia artificial y su aplicación en la administración de justicia. *Revista jurídica Mario Alario D' Filippo*. (11) 21, pp. 71 – 83.
- Ulibre (2017). Metodología de la investigación jurídica Derecho No.42. <http://www.unilibre.edu.co/bogota/pdfs/2019/derecho/investigacion-3.pdf>.
- Urania, G. (2019). Inteligencia artificial y revolución industrial 4.0. Potencial, riesgos y desafíos de la revolución tecnológica actual. *Revista Derecho público italiano*.

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE METODOLOGÍAS DE DESARROLLO DE SOFTWARE EN APLICACIONES MÓVILES

PERFORMANCE EVALUATION OF SOFTWARE DEVELOPMENT METHODOLOGIES IN MOBILE APPLICATIONS

Luis Aguas Bucheli

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador
laguas@uisrael.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-6039-3593>

Mario Pérez Cargua

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador
mperez@uisrael.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2171-9765>

Henry Recalde Araujo

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador
hrecalde@uisrael.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0003-0768-4452>

Renato M. Toasa

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador
rtoasa@uisrael.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-2138-300X>

RESUMEN

El uso de metodologías en el proceso de desarrollo de software permite la construcción de un software de alta calidad y que satisfaga las necesidades de los usuarios, pero identificar qué metodología es la que se adapta a las necesidades de cada proyecto, en su mayoría es complicado. En este contexto, este trabajo propone un estudio comparativo de distintas metodologías de desarrollo como las tradiciones, ágiles y metodologías para móviles, para esto se definen indicadores de calidad de cada tipo de metodología, estos indicadores se definen de acuerdo con lo que propone cada método en sus distintas fases. Como resultado, se identifica que, para el desarrollo de aplicaciones móviles, se puede utilizar metodología ágiles; sin embargo, la que satisface las necesidades es la metodología Mobile D, esto lo demuestra la comparación realizada en la presente investigación.

PALABRAS CLAVE

Evaluación, metodologías, desarrollo, móvil.

ABSTRACT

The use of methodologies in the software development process allows the construction of high quality software that meets the needs of users, but identifying which methodology is the one that suits the needs of each project, is mostly complicated. In this context, this work proposes a comparative study of different development methodologies such as traditional, agile and mobile methodologies, for this quality indicators are defined for each type of methodology, these indicators are defined according to what each method proposes in its different phases. As a result, it is identified that, for the development of mobile applications, agile methodologies can be used; however, the one that meets the needs is the Mobile D methodology, this is demonstrated by the comparison made in this research.

KEYWORDS

Evaluation, methodologies, development, mobile

INTRODUCCIÓN

Las metodologías de desarrollo “han ganado popularidad desde hace algunos años, ya que son una buena solución para los proyectos a corto plazo, especialmente aquellos proyectos en los que los requisitos cambian constantemente, un ejemplo de ello son las aplicaciones para dispositivos móviles, ya que éstas tienen que satisfacer una serie de características y condiciones especiales, tales como: canal, movilidad, portabilidad, capacidades específicas de los terminales, entre otras” (Amaya Balaguera, 2015b). El uso de metodologías permite minimizar el riesgo que existe al diseñar aplicaciones basadas en productos o servicios, permitiendo lanzar un Producto Mínimo Viable (MVP) al mercado para validar que realmente esta aplicación tiene impacto en el público objetivo, lo que garantizará si la respuesta es positiva, el lanzamiento de un producto en el menor tiempo posible y reduciendo costos de implementación, garantizando funcionalidad, fiabilidad y usabilidad para el cliente (Morales et al., 2018).

De acuerdo con Blanco et al., (2009), “a medida que el negocio de las aplicaciones móviles crece y se vuelve más rentable, es necesario investigar las metodologías óptimas de desarrollo de software para aplicaciones y entornos que lleven ese desarrollo al éxito de forma atractiva y eficiente”, por lo que se espera que las aplicaciones, cuando se lancen al mercado, “tengan cierto grado de aceptación alto entre los usuarios, ese grado dependerá de las características particulares que cada usuario considere importantes. El desarrollo de este tipo de aplicaciones sufre prácticamente los mismos problemas que la gran mayoría de desarrollos de software. Pero se debe tener en cuenta sus principales peculiaridades, como la corta duración de sus desarrollos, la gran competencia del sector que obliga a una constante innovación, los cambios frecuentes en la plataforma de desarrollo y en el hardware o la simplicidad de algunas aplicaciones. Todo ello influye a la hora de elegir una metodología concreta de desarrollo” (Sangama Oñate, 2020).

Los autores Shaydulin & Sybrandt (2017) sostienen que la mayoría de los planes para el desarrollo de un software se hace con un grupo pequeño de desarrolladores que necesitan de un método sencillo para organizar las actividades, este puede ser de forma ágil, o más estático y predictivo, al tiempo que explican que “el modelo clásico es sólo aplicable cuando están totalmente cerrados los requisitos y no van a cambiar. No hay retroalimentación entre las fases en que se divide el proyecto. Por lo que cada fase se va cerrando de forma secuencial. Todo el proceso está fijado por fechas límites y presupuestos. Este modelo sólo es aconsejable para proyectos móviles muy controlados y previsibles, no existe incertidumbre por lo que se quiere hacer ni influyen los cambios en la industria”.

Cuando una aplicación no se desarrolla aplicando estándares de programación o siguiendo las fases de una metodología de desarrollo de software, se dificulta el mantenimiento del código de la aplicación en el futuro o se hace que la adición de nuevas funcionalidades o modificaciones de estas sea un proceso más complejo, costoso y que en algunos casos compromete funcionalidades de la aplicación.

Existen trabajos que desarrollan propuestas similares, inicialmente Ahimbisibwe et al., (2017) realiza una comparativa de metodologías ágiles y metodologías tradicionales, los resultados indican que varios factores críticos difieren significativamente entre las metodologías ágiles y tradicionales basadas en planes, y de diferentes formas para las diversas medidas de éxito del proyecto.

Por otro lado, Mathur & Satapathy (2019) proponen una comparación analítica para el desarrollo de aplicaciones móviles. Se descubrió que las metodologías ágiles se adaptan mejor al desarrollo de aplicaciones móviles, ya que son de poco tiempo, necesitan flexibilidad, reducen el mal uso y la promoción del tiempo. Por su parte, el trabajo de Shaydulin & Sybrandt expone una comparativa del manifiesto ágil con la metodología tradicional en cascada, donde en los resultados afirman que ninguna metodología reemplaza por completo

a la metodología en cascada y resume las fortalezas y debilidades de cada una. A partir de esto, se puede decir que las metodologías ágiles son, en su conjunto, incapaces de hacer frente a las realidades de la deuda técnica y los sistemas a gran escala.

En este contexto, el presente trabajo pretende realizar una revisión de literatura que exponga casos de éxito en el uso de la metodologías de desarrollo para aplicaciones móviles que permita identificar la más adecuada para este tipo de aplicaciones, por lo que se decide dividir el documento de la siguiente manera: la sección dos presenta la metodología aplicada en este estudio, la sección 3 muestra los resultados obtenidos y finalmente las conclusiones y trabajos futuros se exponen en la sección 4.

METODOLOGÍA

El presente trabajo inicia con la búsqueda de literatura en bases de datos indexadas que permiten garantizar la calidad de los trabajos. Luego se plantean las distintas metodologías ágiles que serán evaluadas de acuerdo con diferentes indicadores que se definen de acuerdo a la tendencia actual.

Según la literatura revisada, “una metodología es una colección de procedimientos, técnicas, herramientas y documentos auxiliares que ayudan a los desarrolladores de software en sus esfuerzos por implementar nuevos sistemas de información. Una metodología está formada por fases, cada una de las cuales se puede dividir en sub-fases, que guiarán a los desarrolladores de sistemas a elegir las técnicas más apropiadas en cada momento del proyecto y también a planificarlo, gestionarlo, controlarlo y evaluarlo” (Silva et al., 2017). De esta manera, podremos decir que los métodos utilizados para el desarrollo del software permiten establecer un proceso disciplinado, con el propósito de hacerlo más predecible y eficiente.

Para Pressman (2010), “el concepto de metodología, dentro de la ingeniería del software es, sin duda, uno de los más oscuros y que más confusión produce tanto en estudiantes, como en profesionales involucrados en procesos de desarrollo de software”. En muchos proyectos de desarrollo la aplicación de una metodología no se considera, siendo este un concepto casi desconocido. Además, la constante innovación tecnológica hace que cada vez sea necesaria la aplicación de nuevas metodologías adaptadas a la actualidad.

“El uso de metodologías permite a los desarrolladores contar con una colección de procedimientos, técnicas, herramientas y documentos que apoyan en sus esfuerzos por implementar nuevos sistemas de información”, explica Amaya Balaguera (2015). Esto permite que se realice un análisis de las distintas metodologías tradicionales y ágiles las cuales puedan adaptarse al desarrollo de proyectos de aplicaciones móviles.

En el portal de Uqbar (s.f), sostienen que “una metodología ordena, contiene y permite definir límites. Construir un software complejo requiere un gran esfuerzo: tecnología, dinero y, sobre todo: personas que interactúan entre sí, con diferentes grados de conocimiento, con diferentes roles e intereses. Una metodología propone un esquema de trabajo que nos permite entender cuál es nuestro rol dentro del proyecto, nos acerca una cierta sensación de tranquilidad, de seguridad. Sin un proceso no sabemos cómo comenzar y cuándo terminar”.

A continuación, se mencionan las diferentes metodologías:

Metodologías ágiles

Tienen como principal propósito el desarrollo de software iterativo e incremental, esto asociado a la complejidad del producto de software a desarrollar. El enfoque del trabajo mediante equipos auto organiza-

dos y multidisciplinarios permiten la toma de decisiones y resultados a corto plazo. Además, la división de tareas mediante interacciones permite involucrar al usuario final de forma activa como parte del proceso de desarrollo que permite entregas del producto adaptado a los cambios.

En concreto, las metodologías ágiles de desarrollo de software buscan proporcionar en poco tiempo piezas pequeñas de sistemas de software en funcionamiento para mejorar la satisfacción del cliente. Estas metodologías utilizan enfoques flexibles y el trabajo en equipo para ofrecer mejoras constantes. Por lo general, el desarrollo ágil de software implica que pequeños equipos autoorganizados de desarrolladores de software y representantes empresariales se reúnan regularmente en persona durante el ciclo de vida del desarrollo de software. “La metodología ágil favorece un enfoque sencillo de la documentación de software, y acepta los cambios que puedan surgir en las diferentes etapas del ciclo de vida, en lugar de resistirse a ellos” (RedHat, s.f).

Metodología XP

Es una metodología ágil (ver *Figura 1*) “centrada en fomentar las relaciones interpersonales como clave para el éxito en desarrollo de software, promoviendo el trabajo en equipo, preocupándose por el aprendizaje de los desarrolladores, y propiciando un buen entorno de trabajo. XP se basa en una retroalimentación continua entre el cliente y el equipo de desarrollo, una comunicación clara entre todos los antes mencionados, permitiendo simplicidad en las soluciones de software implementadas y valor para enfrentar los cambios. XP se define como especialmente adecuada para proyectos con requisitos imprecisos y muy cambiantes, y donde existe un alto riesgo técnico” (Salazar et al., 2018).

PROGRAMACIÓN EXTREMA (XP)

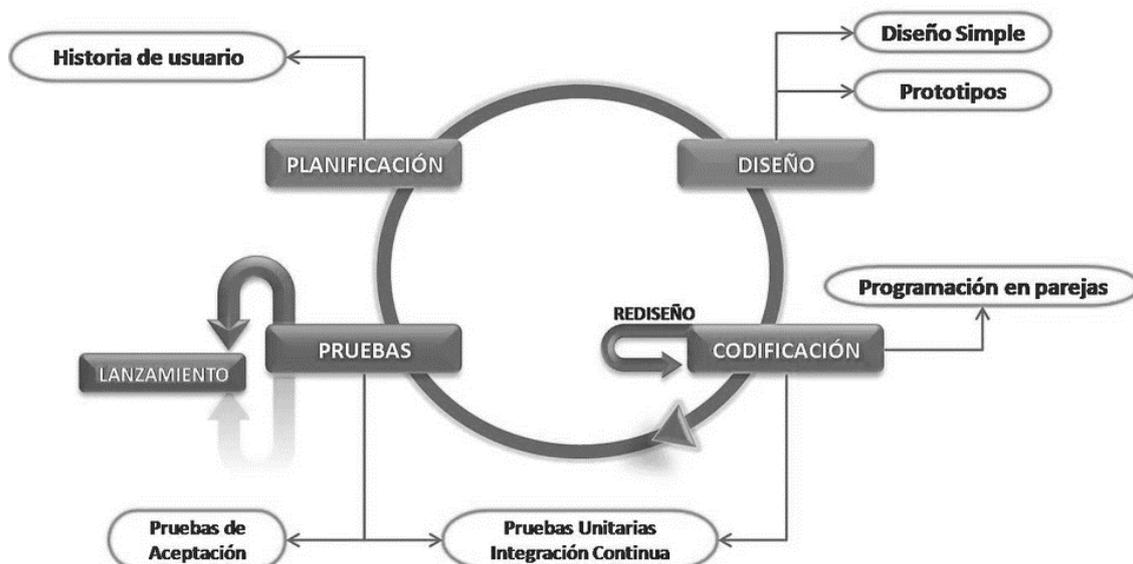


Figura 1. Metodología XP
Fuente: Muradas (2018)

Para Muradas (2018), “XP intenta reducir la complejidad por medio de un trabajo orientado directamente al objetivo, basado en las relaciones interpersonales y la velocidad de reacción. XP tiene una debilidad cuando se utiliza en dominios de aplicaciones complejas o situaciones difíciles en la organización: el rol

del cliente no refleja los diferentes intereses, habilidades y fuerzas a las que enfrentan los programadores durante el desarrollo de proyectos”.

Metodología Scrum

Esta metodología ágil tiene características compartidas con XP en su enfoque de la colaboración entre el equipo de trabajo y el cliente, pero su propósito principal es la realización de las actividades de gestión de proyectos.

“Scrum es una metodología que permite realizar proyectos de software de forma iterativa e incremental” (Salazar et al., 2018), como se evidencia en la *Figura 2*.

El empirismo y Scrum requiere foco en la entrega de valor



Tomado de mi libro: Notas de Scrum Profesional en <https://www.amazon.com/dp/B082S26DLH>

Figura 2. Metodología Scrum
Fuente: Huambachano (2020)

“Scrum es un marco de trabajo de procesos que ha sido usado para gestionar el trabajo en productos complejos desde principios de los años 90. Scrum no es un proceso, una técnica o método definitivo. En lugar de eso, es un marco de trabajo dentro del cual se pueden emplear varios procesos y técnicas. Muestra la eficacia relativa de las técnicas de gestión de producto y las técnicas de trabajo de modo que podamos mejorar continuamente el producto, el equipo y el entorno de trabajo. El marco de trabajo Scrum consiste en los equipos Scrum y sus roles, eventos, artefactos y reglas asociadas. Cada componente dentro del marco de trabajo sirve a un propósito específico y es esencial para el éxito de Scrum y para su uso” (Clark, 2020).

Por lo tanto, de acuerdo con Clark (2020), es una opción para mejorar y controlar los proyectos en entornos complejos, permitiendo optimizar la productividad del equipo de trabajo y obtener resultados de forma rápida y ordenada”.

Metodologías de desarrollo de software tradicionales

Este enfoque está condicionado a un proceso lineal el cual requiere que para empezar una fase del desarrollo de software, debe haberse concluido una anterior, este es un modelo orientado a resultados en donde el usuario tendrá una participación al inicio y al fin del desarrollo del producto de software.

Su proceso, basado en definir antes que diseñar, diseñar antes que codificar, codificar antes que realizar pruebas y realizar pruebas antes de implementar; permite tener resultados una vez que el producto esté terminado, y si existieran errores, implica un rediseño y con esto costos y tiempo de desarrollo.

Metodología RUP

De acuerdo con Noordeloos et al. (2012), la metodología RUP (por sus siglas en inglés o Proceso de Desarrollo Unificado) proporciona disciplinas en las cuales se encuentran artefactos con lo cual se podrá contar con guías para poder documentar e implementar de una manera fácil y eficiente con el propósito de asignar tareas y responsabilidades dentro de una organización del desarrollo, todo esto dentro de las respectivas fases con las cuales cuenta. “Su objetivo es asegurar que el producto final de software sea de alta calidad y que permita resolver las necesidades de los usuarios dentro de un presupuesto y tiempo establecidos”, puntualiza.

A continuación, en la *Figura 3* se ven las etapas de esta.

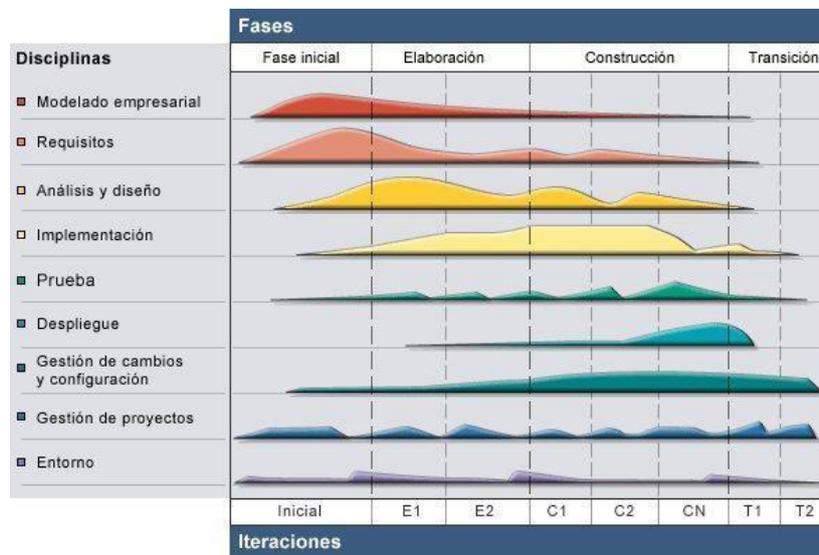


Figura 3. Metodología RUP
Fuente: *bannysolano (2010)*

Para Bannysolano (2010, “los procesos de RUP estiman tareas y horario del plan midiendo la velocidad de iteraciones concerniente a sus estimaciones originales. Las iteraciones tempranas de proyectos conducidos RUP se enfocan fuertemente sobre arquitectura del software; la puesta en práctica rápida de características se retrasa hasta que se ha identificado y se ha probado una arquitectura firme”.

Metodologías de desarrollo para aplicaciones móviles

En el sitio de RedHat (s.f) se expresa que “en esta era de tecnología móvil y constante actividad, las personas que trabajan en campo esperan que el nivel de conexión que les ofrece su teléfono inteligente sea el mismo que el de los compañeros que trabajan en un escritorio”, por lo que objetivo de crear aplicaciones móviles para empresas es posibilitar dicha conectividad y, a su vez, cumplir con los requisitos de confiabilidad y seguridad de una compañía de alto nivel. “Las empresas buscan que sus aplicaciones estén disponibles en los dispositivos móviles sin que ello implique una cantidad excesiva de tiempo de desarrollo. Hay una

variedad de estrategias de desarrollo para diseñar aplicaciones móviles, desde soluciones móviles y pre empaquetadas que no requieren código hasta soluciones completamente personalizadas y plataformas de desarrollo integradas en los dispositivos móviles”, explican.

Al tiempo que detallan que “para muchas empresas, la estrategia de desarrollo basada en servicios con funciones móviles integradas se está convirtiendo en el método estándar. La integración del desarrollo de aplicaciones móviles en una estrategia más amplia basada en microservicios nativos de la nube ofrece muchos beneficios, como el aumento de la productividad, la reducción de los costos y la mejora de la seguridad, así como mayores niveles de visibilidad y control”.

La necesidad de aplicar el éxito de las metodologías de desarrollo para aplicaciones móviles ha permitido crear metodologías orientadas a proyectos cortos que se centren en la experiencia de usuario, es por eso que el éxito de metodologías ágiles y tradicionales permite la creación de metodologías que se adapten al desarrollo de aplicaciones móviles tomando lo mejor de estas y orientado a la experiencia de usuario y la celeridad en los productos entregables, sin olvidar las pruebas de calidad.

Metodología Mobile-D

El autor Sangama Oñate (2020) sostiene que el objetivo de esta es “conseguir ciclos de desarrollos muy rápidos en equipos muy pequeños (de no más de diez desarrolladores) trabajando en un mismo espacio físico. Según este método, trabajando de esa manera se deben conseguir productos totalmente funcionales en menos de diez semanas. Se trata de método basado en soluciones conocidas y consolidadas: *Extreme Programming (XP)*, *Crystal Methodologies* y *Rational Unified Process (RUP)*, XP para las prácticas de desarrollo, Crystal para escalar los métodos y RUP como base en el diseño del ciclo de vida” (Sangama Oñate, 2020).

En la *Figura 4* se ilustran cada una de estas fases, donde el ciclo indica que inicialmente se debe analizar la situación y perspectivas que tiene la entidad cliente, qué estrategias debe seguir el equipo de desarrollo para alcanzar los objetivos trazados, cuáles son los tiempos definidos para alcanzar estos objetivos, cómo se va a comprobar que se están cumpliendo y de esta manera ir obteniendo e integrando los resultados hasta obtener un producto final (Hidalgo & Iza, 2016).



Figura 4. Metodología Mobile D
Fuente: Sangama Oñate (2020).

Metodología mobile espiral

Esta propuesta metodológica utiliza el modelo de desarrollo en espiral como base y permite incorporar procesos que evalúan la usabilidad y tomando lo especial de las metodologías ágiles, que es la participación del usuario en todos los procesos del ciclo de vida de diseño, y así garantizar un diseño centrado en el usuario (Amaya Balaguera, 2013).

Este proceso permite a los desarrolladores de aplicaciones móviles detallar todos los criterios de usabilidad de la aplicación, tomando en cuenta dos pasos, de acuerdo a Amaya (2013):

- El primero es identificar a los usuarios, las tareas y contextos en los que se utilizará la aplicación móvil,
- El segundo es dar prioridad a los atributos de usabilidad, identificar cuáles son los más relevantes, y definir para cada uno un conjunto de métricas para verificar el grado en que se cumplen en el producto.

En la siguiente *Figura 5* se ve cómo es el proceso del ciclo en espiral.

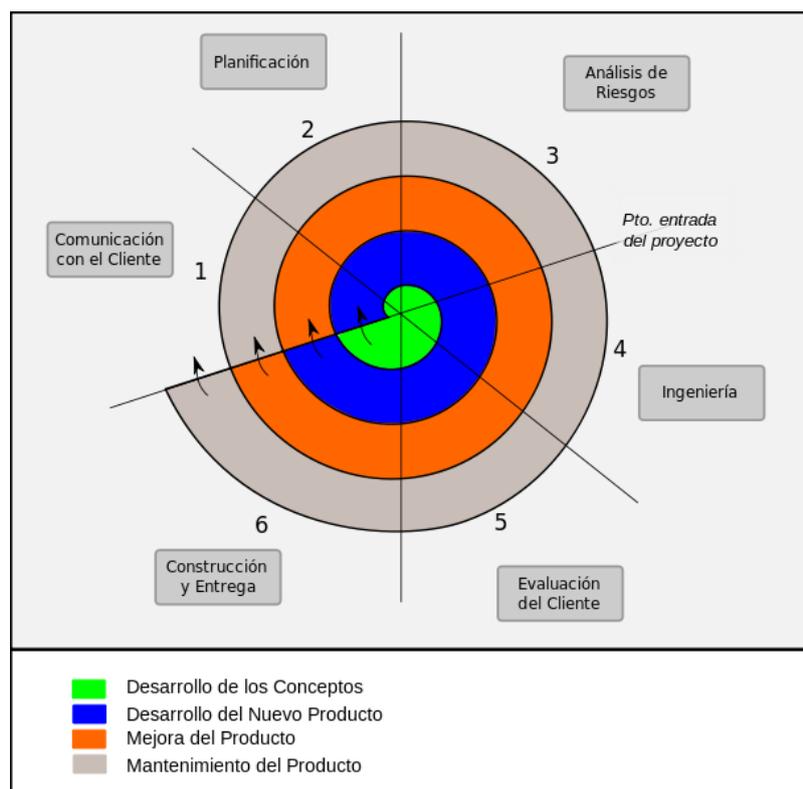


Figura 5. Metodología Espiral
Fuente: Amaya Balaguera (2013).

Según Amaya Balaguera, en el modelo anteriormente mencionado, el software se desarrolla en una serie de versiones incrementales. Durante las primeras iteraciones, la versión incremental podría ser un modelo en papel o un prototipo. Durante las últimas iteraciones se producen versiones cada vez más completas del sistema diseñado. Este modelo tiene un gran impacto en la ingeniería del software, ya que este utiliza un enfoque evolutivo en la ingeniería, permitiendo al desarrollador y al cliente entender y reaccionar a los ries-

gos en cada nivel evolutivo. Por otra parte, utiliza prototipos como un mecanismo de reducción de riesgo. Además, se ha verificado que este modelo es de gran complejidad y solo es utilizado en sistemas grandes, que, si son desarrollados con éxito, logran doblar la productividad.

Desarrollo orientado a pruebas

Amaya (2015) sostiene que este condiciona la mentalidad de los desarrolladores dando una guía a través del desarrollo y se enfoca en la calidad del producto final de software. “El desarrollo mantiene un exhaustivo juego de pruebas por partes del programador, ninguna parte del código pasa a producción a no ser que pase sus pruebas asociadas, esta forma de desarrollar cambia drásticamente la mentalidad de cualquier equipo, generalmente agilizando los resultados y aumentando la calidad del producto de software”, puntualiza.

“El desarrollo orientado a las pruebas lleva más de 10 años en la industria del software, y su principal aplicación en la actualidad es en proyectos con metodologías ágiles, tal como XP, Agile o Scrum, pero se puede ver que es posible aplicarlo en otros proyectos, y no solo en nuevos” (Vaca et al., 2013).

Indicadores KPI

El ciclo de vida del software (por sus siglas en inglés SDLC, Systems Development Life Cycle) son etapas o fases que se debe pasar para desarrollar un software, la aplicación de un modelo dependerá de varios factores internos y externos y de cómo el grupo de desarrollo decidan implementar en la realización de los proyectos de software, podemos citar a varios autores que definen el SDLC según su nivel de aceptación (sin ningún orden en especial):

- Fase 1, análisis. Fase 2, diseño. Fase 3, codificación. Fase 4, prueba. Fase 5, mantenimiento, (Álvarez, 2007).
- Fase 1, requerimientos. Fase 2, análisis / diseño. Fase 3, construcción. Fase 4, pruebas. Fase 5, producción/mantenimiento, (Fábregas, 1991).
- Fase 1, investigación preliminar. Fase 2, determinación de requerimientos. Fase 3, desarrollo del software. Fase 4, prueba del sistema. Fase 5, implantación y evaluación (Senn et al., 1992).

Para trabajar en un proyecto de software no solo se debe considerar al software como tal, si no también la forma cómo se le gestión, de tal manera que garantice un producto final de calidad. Es por esta razón que se requiere de indicadores para seleccionar la mejor metodología aplicable a un proyecto de desarrollo de software móvil.

Luego de analizar las metodologías propuestas con anterioridad, y alinearse a los factores de calidad según la norma ISO 27001 (ISO 25010, n.d.), que deben cumplir un producto final:

- a. Adecuación funcional
- b. Eficiencia de desempeño
- c. Compatibilidad
- d. Usabilidad

- e. Fiabilidad
- f. Seguridad
- g. Mantenibilidad
- h. Portabilidad

El proceso de creación de aplicaciones móviles difiere del proceso creación de software tradicional en varios aspectos, lo que conlleva a que las metodologías usadas para estos entornos también difieran de las del software clásico. La diferencia radica en que las aplicaciones móviles tienen que cumplir con otros requisitos para su funcionamiento.

Al enfocarnos en las aplicaciones móviles, debemos considerar también los indicadores que hacen la diferencia en el desarrollo para la evaluación de este tipo de aplicaciones, que de acuerdo a Mathur & Satapathy (2019), estas son:

- a. Tiempo de Ejecución
- b. Mantenimiento
- c. Fiabilidad
- d. Confiabilidad
- e. Uso de Batería
- f. Conectividad

Para este trabajo se han establecido los siguientes factores (*Tabla 1*) a considerar para la selección de la metodología a utilizar en el desarrollo de aplicaciones móviles.

Tabla 1.
Indicadores de calidad

KPIS	Nombre	Descripción
KP01	Independiente de tecnologías	Puede ser utilizado con cualquier tecnología a desarrollar y Ejecutar
KP02	Documentación	Existe documentación completa sobre la metodología
KP03	Estrictamente sistémico	Contiene una serie de pasos, los cuales siguen un orden determinado de ejecución
KP04	Orientado a los Procesos	Tiene como principal énfasis la ejecución de los procesos
KP05	Enfocado a las Personas	Tiene como principal énfasis el manejo de las relaciones intra-personales del proyecto
KP06	Prioridad en la Funcionalidad	Se orienta más a la ejecución que a la documentación
KP07	Cliente Activo	Inmiscuye al cliente dentro del proceso de desarrollo

KP08	Control y manejo del Tiempo	Gestiona el tiempo dentro de sus proceso y etapas
KP09	Refactorización de Código	Reestructuración del código fuente, sin cambiar su comportamiento funcional
KP10	Respuesta a la gestión de cambios	El modelo debe tener una gestión de cambios establecida
KP11	Usabilidad	Fomentar la interacción entre la interfaz y el usuario
KP12	Seguimiento de pruebas y eficiencia	Validar el funcionamiento, mediante pruebas

Fuente: elaboración propia

RESULTADOS

Después de realizar el análisis comparativo de cada metodología planteada en este trabajo, la siguiente *Tabla 2* muestra un resumen de cada una.

Tabla 2.
Resumen metodologías

Metodología	Resumen
XP	Es una metodología ágil centrada en fomentar las relaciones interpersonales como clave para el éxito en desarrollo de software.
Scrum	Su enfoque es la colaboración entre el equipo de trabajo y el cliente, pero su propósito principal es la realización de las actividades de gestión de proyectos.
RUP	Proporciona disciplinas en las cuales se encuentran artefactos con lo cual se podrá contar con guías para poder documentar e implementar de una manera fácil y eficiente.
Mobile-D	Consigue ciclos de desarrollos muy rápidos en equipos muy pequeños.
Mobile Espiral	Utiliza el modelo de desarrollo en espiral como base y permite incorporar procesos que evalúan la usabilidad tomando lo especial de las metodologías ágiles
Orientado a pruebas	El desarrollo mantiene un exhaustivo juego de pruebas por partes del programador.

Fuente: elaboración propia

En la *Tabla 3* se asigna valor al cumplimiento de los indicadores definidos en secciones anteriores, donde 1 indica que cumple con el indicador y 0 no cumple, Mobile D, cumple y se adapta al programador para un desarrollo efectivo, ya que es la metodología que más cumple con los KPI planteados.

Tabla 3.
Resultados

Metodología	KP01	KP02	KP03	KP04	KP05	KP06	KP07	KP08	KP09	KP10	KP11	KP12
XP	1	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
Scrum	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
RUP	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1
Mobile D	1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1
Mobile Espiral	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
Orientado a pruebas	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1

Fuente: elaboración propia

En la siguiente *Figura 6* se observa lo anteriormente dicho, que la metodología Mobile D, es la que más se adapta a los planteado y la más efectiva en el momento de desarrollo.

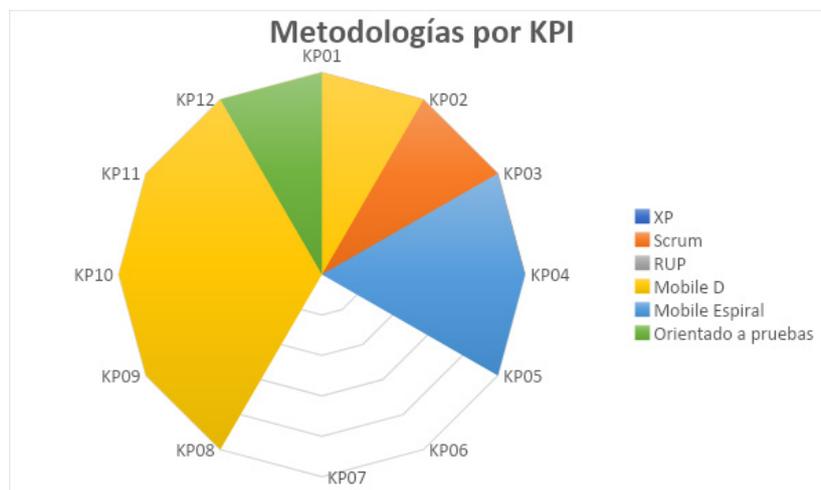


Figura 6. Metodologías por KPI
Fuente: elaboración propia

La metodología Mobile-D interactúa constantemente con el cliente dándole un protagonismo importante durante la fase de desarrollo de la aplicación móvil. Esta permite un desarrollo ágil y oportuno, dando como resultado la reducción de tiempo durante la etapa de desarrollo de la aplicación móvil, además, con la documentación recolectada en las distintas fases de esta metodología, permite garantizar la calidad y usabilidad del producto.

El método Mobile-D se desarrolló junto con un proyecto finlandés en el 2004. Fue realizado, principalmente, por investigadores de la VTT (Instituto de Investigación Finlandés) y, a pesar de que es un método antiguo, sigue en vigor (se está utilizando en proyectos de éxito y está basado en técnicas que funcionan). En palabras de Ramírez Vique (2011) "el objetivo es conseguir ciclos de desarrollos muy rápidos en equipos muy pequeños (de no más de diez desarrolladores) trabajando en un mismo espacio físico. Según este método, trabajando de esa manera se deben conseguir productos totalmente funcionales en menos de diez semanas. Se trata de método basado en soluciones conocidas y consolidadas: Extreme Programming (XP), Crystal Methodologies y Rational Unified Process (RUP), XP para las prácticas de desarrollo, Crystal para escalar los métodos y RUP como base en el diseño del ciclo de vida".

La metodología Mobile D especializada para el desarrollo de aplicaciones móviles se compone de 5 fases o etapas (ver *Figura 7*): exploración, iniciación, producción, estabilización y prueba del sistema (Blanco et al., 2009). Cada una de ellas tiene un conjunto de tareas asociadas que permiten la consecución de los objetivos.



Figura 7. Fases Mobile-D
Fuente: Blanco et al., (2009)

Cuya descripción, de acuerdo a Blanco et al. (2009), sería:

- **Explorar:** en esta fase el equipo desarrolla un plan y establece las particularidades del proyecto, para esto se realizan en tres etapas: establecimientos actores, definición del alcance y establecimiento de proyectos. Los usuarios finales o clientes forman parte activa en el proceso de desarrollo.
- **Iniciación:** aquí los desarrolladores estructuran y preparan los recursos necesarios para el proyecto. Se crean planes necesarios para las siguientes fases y se establece el ambiente técnico de los recursos involucrados como: físicos, tecnológicos y de comunicaciones, se incluye además la capacitación del personal de desarrollo. Esta fase tiene cuatro etapas: puesta en marcha del proyecto, planificación inicial, día de prueba y día de salida.
- **Producción:** se repite la programación de tres días (planificación, trabajo, liberación), se repite de forma iterativa hasta implementar todas las funcionalidades del proyecto. En primer lugar, es importante planificar la iteración de trabajo en términos de requisitos y tareas a realizar, es importante realizar las pruebas de cada iteración. En esta fase todas las tareas se las realizarán durante el día de trabajo, desarrollando e integrando el código con los repositorios de código. En el último día se lleva a cabo la integración del código desarrollado del sistema, esto en caso de que estuvieran trabajando varios equipos de forma independiente, seguida de las pruebas de aceptación de la iteración.
- **Estabilización:** se realizan las últimas acciones de integración con el objetivo de asegurar que el sistema funciona sin errores. Esta fase es la más importante en proyectos multi-equipo con diferentes subsistemas desarrollados por varios equipos. En esta los desarrolladores realizarán tareas similares a las que debían desplegar en la fase de "producción", aunque en este caso, todo el esfuerzo se dirige a la integración del sistema.

- **Prueba y reparación del sistema:** tiene como objetivo la disponibilidad de una versión estable y plenamente funcional del sistema. El producto terminado e integrado se prueba con los requisitos de cliente o usuario final y se eliminan todos los errores encontrados, (Amaya Balaguera, 2015).

Según la efectividad de la metodología Mobile D, se ha considerado la siguiente *Figura 8* hecha en escala de liker, donde se tiene lo siguiente:

Característica	Mobile D
Desarrolladores	5
Clientes	4
Confianza	5
Requerimientos	5
Arquitectura	5
Refactorización	5
Tamaño	3
Etapas con las que cuenta la metodología	1
Tipos de requerimientos	5
Tipos de proyectos	3
Tiempo de desarrollo	4
Complejidad de desarrollo	4
Documentación(Producto final)	2
Alineación del desarrollo con los objetivos de negocio	5
Utilización de herramientas de código libre	5
Tipos de pruebas	5
Total	61

Figura 8. Ponderación Escala Liker Mobile D
Fuente: Hidalgo & Iza (2016)

En esta figura de valoración se puede apreciar que la calificación de la metodología Mobile-D es la más alta, por lo tanto, es la que más se ajusta a las necesidades de un proyecto pequeño y es la que se orienta solamente al desarrollo de aplicativos móviles.

En cuanto a la característica de los desarrolladores, estos poseen un amplio conocimiento en el tema al estar especializados en el mismo. A la característica de Clientes, estos se integran a la producción, pero sólo en las fases de desarrollo y pruebas. También fue mejor ponderada en Mobile D la característica de referente a los requerimientos, pues en esta son emergentes y con rápidos cambios, lo que posibilita que el aplicativo evolucione según los propios requerimientos del cliente y según lo requiera el propio desarrollo. En el caso de la arquitectura, tiene 5, pues es orientada a los requerimientos actuales.

Mobile D sí es económicamente alta por requerir gestión de cambio. En cuanto a las etapas, solo trabaja sobre las fases clásicas (análisis, diseño, desarrollo y pruebas). Esta vuelve a ganar protagonismo, pues independientemente de que posee menos clasificaciones, estas son más específicas y centradas en el desarrollo de aplicativos para móviles (Hidalgo & Iza, 2016).

Como parte de sus ventajas, Sarango (2017) nombra:

- Posee bajos costos al realizar un cambio en el proyecto.
- Entrega rápidos resultados.
- Asegura el software adecuado en el momento adecuado.
- Los casos de estudio son fáciles de entender.
- Promueve detección y corrección de errores de manera temprana.
- Promueve la entrega de prototipos de calidad en corto tiempo.
- Se tiene *feedback* constante de los clientes.
- Promueve el trabajo en equipo.
- El proceso de desarrollo puede ser completamente visualizado y medido.

Y entre las desventajas, el mismo autor detalla:

- No sirve para grupos de desarrollo demasiado grandes o segmentados.
- Depende demasiado de que exista una buena comunicación entre los miembros del equipo.
- Pensado para equipos de desarrollo de 10 personas o menos.
- El equipo debe estar enteramente involucrado y comprometido con el proyecto para que este sea exitoso.
- Hace énfasis en la refactorización del software, el tiempo, el proceso de
- Implementación, lo que puede disminuir la productividad de otros aspectos.

Según Sarango (2017) Mobile-D es una mezcla de muchas técnicas. Los investigadores no dudaron en aprovechar las prácticas habituales de desarrollo software. Pero, al mismo tiempo, consiguieron crear una contribución original para el nuevo escenario del desarrollo de aplicaciones para sistemas móviles.

CONCLUSIONES

En el desarrollo en aplicaciones móviles, las metodologías cumplen un rol importante al momento de gestionar las actividades, hay que tener presente que toda metodología cumple su función en un entorno aplicado, y que cada una se adapta a unas características particulares del producto a obtener.

Con el resultado de la ponderación de cada una de las metodologías, se verifica que la metodología Mobile D cumple con mayor cantidad de indicadores, la cual permite un mayor control en la gestión de las aplicaciones móviles, debido a que estas aplicaciones son muy cambiantes y rápidas en su construcción.

Según los resultados de este trabajo, la metodología Mobile-D cumple con los parámetros requeridos para que el desarrollo de aplicaciones móviles sea óptimo, considerando la complejidad, funcionalidad, seguridad, consistencia y fiabilidad de cada proyecto en desarrollo.

De acuerdo a lo mencionado en este trabajo, se espera aplicar esta metodología en la construcción de una aplicación real que permita validar los resultados obtenidos.

REFERENCIAS

- Ahimbisibwe, A., Daellenbach, U., & Cavana, R. Y. (2017). Empirical comparison of traditional plan-based and agile methodologies: Critical success factors for outsourced software development projects from vendors' perspective. *Journal of Enterprise Information Management*, 30(3), 400–453. <https://doi.org/10.1108/JEIM-06-2015-0056>
- Álvarez, J. (2007). Ingeniería de Software Un Enfoque Práctico. Reseña de Libros. In CITEG Revista Arbitrada. Año I. N°2. http://fondoeditorial.uneg.edu.ve/citeg/numeros/c02/c02_art10.pdf
- Amaya Balaguera, Y. D. (2013). Metodologías ágiles y desarrollo de aplicaciones móviles . V Congreso Internacional de Computación y Telecomunicaciones. <http://repositorio.uigv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.11818/832/Memoria-COMTEL-2013-177-184.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Amaya Balaguera, Y. D. (2015a). Guía metodológica ágil, para el desarrollo de aplicaciones móviles “AE-GIS-MD.” *Revista de Investigaciones UNAD*, 14(1), 97. <https://doi.org/10.22490/25391887.1348>
- Amaya Balaguera, Y. D. (2015b). Metodologías ágiles en el desarrollo de aplicaciones para dispositivos móviles. Estado actual. *Revista de Tecnología*, 12(2), 111–123. <https://doi.org/10.18270/rt.v12i2.1291>
- bannysolano. (09 de febrero de 2010). RUP EN ESPAÑOL. <https://bannysolano.wordpress.com/2010/02/09/rup-en-espanol/>
- Blanco, P., Camarero, J., Fumero, A., Warterski, A., & Rodríguez, P. (2009). Metodología de desarrollo ágil para sistemas móviles. Introducción al desarrollo con Android y el iPhone. *Dr. en Ing. Sist. Telemáticos*, 1-30.
- Clark, W. (2020). Metodología Scrum: Una Guía definitiva para principiantes para el dominio de la metodología de gestión de proyectos Scrum (Libro En Español/Self Publishing Spanish Book Version). Independently Published.
- Fábregas, J. L. (1991). *Sistemas de información planificación, análisis y diseño: Ciclo de desarrollo de sistema*. <https://www.urbe.edu/UDWLibrary/InfoBook.do?id=1811>
- Sangama Oñate, A. F. (2020). Metodologías ágiles Scrum, XP, SLeSS, Scrumban, HME, Mobile-D y MASAN empleadas en la industria de dispositivos móviles: Un contraste en favor de la industria del desarrollo móvil. Universidad Peruana Unión.
- Hidalgo Toctaguano, L. R., & Iza Quishpe, M. G. (2016). *Análisis comparativo de las metodologías de desarrollo móvil: hybrid methodology desing y mobile-d, caso práctico implementación de una aplicación de visita virtual a la casa de los marqueses de miraflores en la ciudad de latakunga durante el periodo 2014-2015* (Bachelor's thesis, LATACUNGA/UTC/2016).
- Huambachano, J. (09 de julio de 2020). Scrum no es una metodología, es un marco de trabajo. Scrum.org. <https://www.scrum.org/resources/blog/scrum-no-es-una-metodologia-es-un-marco-de-trabajo>
- Uqbar. (s.f). Introducción a las metodologías de desarrollo de software. <https://wiki.uqbar.org/wiki/articles/introduccion-a-las-metodologias-de-desarrollo-de-software.html>
- ISO 2500. (s.f). ISO/IEC 25010. <https://iso25000.com/index.php/normas-iso-25000/iso-25010>

- Mathur, B., & Satapathy, S. M. (2019). An analytical comparison of mobile application development using agile methodologies. In *2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)* (pp. 1147-1152). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icoei.2019.8862532>
- Morales, J. J., Cedeño, L. C., Parraga-Alava, J. A., & Molina, B. A. (2018). Propuesta Metodológica para Proyectos de Infraestructura Tecnológica en Trabajos de Titulación. *Información Tecnológica*, 29(4), 249–258. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000400249>
- Muradas, Y. (08 de marzo de 2018). Conoce las 3 metodologías ágiles más usadas. *OpenWebinars*. <https://openwebinars.net/blog/conoce-las-3-metodologias-agiles-mas-usadas/>
- Noordeloos, R., Manteli, C., & Van Vliet, H. (2012, August). From RUP to Scrum in global software development: A case study. In *2012 IEEE Seventh International Conference on Global Software Engineering* (pp. 31-40). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICGSE.2012.11>
- Pressman, R. (2010). *Ingeniería de Software. Un enfoque práctico*. sd: Editorial Mc Graw Hill. Desarrollo de Software.
- Ramírez Vique, R. (2011). Métodos para el desarrollo de aplicaciones móviles. [https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Informatica/Tecnologia_y_desarrollo_en_dispositivos_moviles/Tecnologia_y_desarrollo_en_dispositivos_moviles_\(Modulo_4\).pdf](https://www.exabyteinformatica.com/uoc/Informatica/Tecnologia_y_desarrollo_en_dispositivos_moviles/Tecnologia_y_desarrollo_en_dispositivos_moviles_(Modulo_4).pdf)
- RedHat. (s.f). El concepto de desarrollo de aplicaciones móviles para empresas. <https://www.redhat.com/es/topics/mobile>
- Salazar, J. C., Casallas, Á. T., Linares, J. C., Lozano, A., & Valbuena, Y. L. (2018). Scrum versus XP: similitudes y diferencias. *Tecnología Investigación y Academia*, 6(2), 29–37. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/tia/article/view/10496>
- Sarango Palacios, S. (2017). Propuesta de una metodología para el desarrollo de aplicaciones móviles en el campo educativo (Mobile Learning) para la Carrera de Ingeniería en Sistemas de la Universidad Nacional de Loja [Universidad Nacional de Loja]. <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/19040/1/Sarango%20Palacios%2C%20Stalin%20Joe.pdf>
- Senn, J. A., Medal, E. G. U., & Velasco, O. A. P. (1992). *Análisis y diseño de sistemas de información* (Vol. 2). McGraw-Hill.
- Shaydulin, R., & Sybrandt, J. (2017). To agile, or not to agile: A comparison of software development methodologies. *arXiv preprint arXiv:1704.07469*. <https://arxiv.org/abs/1704.07469v1>
- Silva, C., Toasa, R., Martínez, H. D., Veloz, J., & Gallardo, C. (2017). Secure push notification service based on MQTT protocol for mobile platforms. *XII Jornadas Iberoamericanas de Ingeniería de Software e Ingeniería Del Conocimiento 2017, JIISIC 2017 - Held Jointly with the Ecuadorian Conference on Software Engineering, CEIS 2017 and the Conference on Software Engineering Applied to Control and Autom.*
- Vaca, P. A., Maldonado, C., Inchaurredo, C., Peretti, J., Romero, M. S., & Bueno, M. (2013). Test-Driven Development-Una aproximación para entender su utilidad en el proceso de desarrollo de Software. *Conaiisi-Cordoba*, Octubre de, 2347-0372.

CONSIDERACIONES PARA LA APLICACIÓN DE LA INDUSTRIA 4.0 EN ECUADOR 2021

CONSIDERATIONS FOR THE APPLICATION OF THE INDUSTRY 4.0 IN ECUADOR 2021

Pablo Recalde Varela

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

precalde@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-7256-2836>

Ivan Andocilla Oleas

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

iandocilla@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6041-1379>

Henry Recalde Araujo

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

hrecalde@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0768-4452>

Luis Fernando Aguas Bucheli

Universidad Tecnológica Israel, Ecuador

laguas@uisrael.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-6039-3593>

RESUMEN

La industria 4.0 es conocida como la revolución industrial del siglo XXI, misma que incorpora la más alta combinación de tecnologías que nunca antes se habían tenido. Incluye el manejo de la inteligencia artificial (IA) y del llamado big data para el descubrimiento de datos en virtualmente cualquier lugar que genere bits y bytes con sensores de IoT y que esté conectado a la gran red mundial. La proyección de información global con minería de datos, análisis y captura de datos automáticos de la web como es el scraping. La aceleración en las comunicaciones, debido a la conectividad global y aún más por la implantación de la tecnología 5G y de una teórica, pero en camino con la tecnología 6G. El uso de la robótica y de las aplicaciones en dispositivos móviles para un control industrial productivo como el de entrega a un usuario final con drones y sistemas autónomos basados en logística conectada y mantenimiento predictivo que puede fabricar sus propias partes de repuesto con impresiones 3D, todo esto evitando un contacto directo posiblemente entre personas que como ha sucedido durante el año 2020 es un tema de salud que se debe controlar, además de existir un beneficio industrial que es el no parar de producir por falta de actividad.

PALABRAS CLAVE

Industria 4.0, inteligencia artificial, IoT, big data, pandemia

ABSTRACT

Industry 4.0 is known as the industrial revolution of the 21st century, which incorporates the highest combination of technologies ever. It includes the use of artificial intelligence (AI) and so-called big data for data discovery in virtually any place that generates bits and bytes with IoT sensors and is connected to the global network. The projection of global information with data mining, analysis and automatic data capture from the web such as scraping. The acceleration in communications, due to global connectivity and even more by the implementation of 5G technology and a theoretical, but on the way with 6G technology. The use of robotics and applications on mobile devices for productive industrial control such as delivery to an end user with drones and autonomous systems based on connected logistics and predictive maintenance that can manufacture their own spare parts with 3D printing, all this avoiding direct contact possibly between people that as has happened during 2020 is a health issue that must be controlled, besides there is an industrial benefit that is not to stop producing due to lack of activity.

KEYWORDS

Industry 4.0, artificial intelligence, artificial intelligence, IoT, big data, pandemic

INTRODUCCIÓN

Ecuador es un país cuya población estimada en el año 2021 es de aproximadamente diecisiete millones y medio de habitantes y concomitantemente, acorde a estudios de La revista Industrias (2020), que resume información del Banco Central del Ecuador, del Sistema de Rentas Internas y de la Cámara de Industrias existen doce tipos de industrias que representan aproximadamente el ochenta por ciento del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, entre ellas la agricultura, ganadería, seguida de petróleo y minas, manufactura, suministros de electricidad y agua, construcción y comercio, dentro de los principales rubros industriales. Adicionalmente, el ranking empresarial sitúa a empresas como Corporación Favorita, Banco Pichincha, Claro, General Motors del Ecuador, entre otros, como parte de este *ranking*.

Estas relaciones han marcado varias cuestiones a responder, tales como la generación del PIB relacionado con el tipo de empresas dentro del segmento de industria a las que pertenecen: ¿tiene alguna relación común? ¿es posible que se puedan adoptar características de estas destacadas empresas para que el resto de actores industriales las puedan implementar?

Estas inquietudes llevan al tema de este trabajo, abordando el tema desde un enfoque de revisión de la realidad actual, y las perspectivas que se tiene como país y como parte de la región.

Marco teórico

De acuerdo con datos del Servicio de Rentas Internas (Industrias, 2020) las actividades comerciales y la manufactura no petrolera son las principales fuentes de ingresos locales por ventas en Ecuador enero-noviembre 2019, seguido de las actividades de agricultura, ganadería y pesca. Esto es coherente con el análisis que se puede hacer del PIB del país, donde los sectores económicos más representativos son la acuicultura, producción camaronera, y pesca, además de las actividades de servicios financieros (IND Industrias, 2020).

Un análisis, efectuado por Revista Líderes evidencia que los emprendimientos con fundadores ecuatorianos son aproximadamente un tercio de los existentes desde 2014 y que dos de cada tres emprendimientos se internacionalizaron y que todos ellos tienen bases en tecnología.

En otro campo, como el de la medicina, Ecuador es considerado uno de los pioneros de Sudamérica al utilizar la detección del COVID-19 mediante detección de imágenes y procesamiento de análisis por inteligencia artificial. Huawei, la multinacional de origen chino, entregó el software y el equipamiento para este tipo de análisis y está siendo utilizado en hospitales de varias ciudades de la sierra como Quito y de la costa en Guayaquil (Donoso, 2020). A esto se suman diferentes proyectos e iniciativas privadas e independientes asociadas a temas como el apoyo a pacientes con discapacidad, dispositivos de control de salud personal, entre otras; el uso de tecnología de *machine learning* (aprendizaje automático) en el diagnóstico médico no es una novedad a nivel global; sin embargo, el entorno latinoamericano en general ha tenido una limitada incursión en este campo; diferentes proyectos académicos han permitido determinar la factibilidad de la aplicación de estos procedimientos como un complemento a la acción de los profesionales de la salud.

La banca es otro de los campos donde ha proliferado el uso de nuevas tendencias de tecnología, donde los llamados robots o simplemente *bots*; son una herramienta que realiza tareas automáticas mediante el uso de inteligencia artificial y mantiene seudo conversaciones con las personas.

La utilización de *chatbots* está creciendo de forma amplia a nivel mundial y en Sudamérica, Ecuador registra un casi 10% de utilización acorde un informe presentado en julio de 2018 por la Revista Lideres, la

cual para plantear este resultado hizo un sondeo a diferentes bancos de sur y centro américa sobre cómo están desarrollando aplicaciones para equipos móviles, manejo de mensajería, Internet móvil y uso de asistentes virtuales. Dicho informe estable que entre 2017 y 2018 se registraron más de trescientos por ciento de incremento, dos de seis de los bancos ecuatorianos más grandes ya usaban *chatbots* financieros y que los cuatro restantes ya estaban en el desarrollo de sus propios asistentes. Esta relación de uso, se coloca a Ecuador como unos de los líderes de utilización de esta tecnología a nivel regional. Dicho desarrollo va de la mano con proyectos locales y externos asociados a tecnología de reconocimiento de voz, semántica, análisis emocional, entre otros (Tapia, 2018).

El uso de tecnologías como el *machine learning* permite, además, la detección de actividades inusuales y sospechosas que pueden ser analizadas y validadas para la detección de posibles errores o fraudes en movimientos bancarios, o incluso, prácticas poco eficientes; esto permite mejorar la confianza de los clientes en las instituciones bancarias, reducción de gastos e incluso la prevención de problemas legales (Yongxin 2020).

En el contexto del *machine learning*, este puede utilizarse en aplicaciones para el análisis de datos en serie, tendencias de variables meteorológicas y todo lo que implique el uso de grandes volúmenes de datos (Rodríguez, 2021). De acuerdo a estudios realizados en las provincias de Carchi, Esmeraldas, Imbabura y Sucumbíos, la inclusión de inteligencia artificial en las actividades productivas asociadas a los textiles, agricultura, floricultura y ganadería tendría un impacto disruptivo que se traduce en beneficios económicos por el valor agregado bruto; sin embargo, se determina también la relevancia de la facilidad de importación de bienes tecnológicos que permitan procesos de automatización, considerando que Ecuador está por debajo de los índices promedios de la región, incluso con disminución de este indicador en los últimos años (Ruano et al., 2019).

Bajo estas aseveraciones, el país tiene un amplio potencial de uso de la tecnología de *machine learning* y usos de sensores del llamado Internet de las cosas (IoT). En este campo, dadas las condiciones geográficas y climatológicas que afectan sus diferentes regiones.

Acorde a portal del Banco de ideas del gobierno ecuatoriano, existen proyectos para la implementación de una red exclusiva basada en el IoT, que podría ayudar al sector agropecuario, rurales en general y a los Gobiernos locales y seccionales para facilitar el monitoreo de sus productos mediante sensores a larga distancia, con lo cual se controlaría tanto la siembra, cosecha y la distribución de sus productos, ahorrando tiempo y garantizando calidad de los productos. Lo mencionado va a la par con el enfoque de agricultura climáticamente inteligente recomendado por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para reorientar los sistemas agrícolas con la finalidad de apoyar de forma eficaz el desarrollo y garantizar la seguridad alimentaria en el contexto de un clima cambiante.

Un estudio realizado por José Sampietro (2019) estima que el uso del IoT en relación al producto interno bruto (PBI) del país tiene una relación directa, de tal forma que un incremento sostenido de alrededor 10% en el ancho de banda daba lugar un incremento de cinco centésimas porcentuales en el PIB del país; es decir, si el objetivo del país es incrementar su PIB se debe incrementar el ancho de banda de las telecomunicaciones para Internet, en este caso el proceso de adopción y penetración de Internet en Ecuador estaría en buen camino.

Como se evidenció en los estudios, el sector comercial es uno de los mayores impulsores de la economía de Ecuador, el *big data* empodera a las industrias ayudándoles a generar analítica de patrones de compras, ventas y tendencias de sus clientes mediante la segmentación de datos, pero incluyendo también otras

fuentes, volúmenes de datos procesados y enormes cantidades de historial comercial son complicados de obtener de motores transaccionales clásicos debido a temas de capacidad de procesamiento, demora en la ubicación y el lapso en el que fueron obtenidos. El empleo de tecnología actual como Apache Hadoop de *big data* o Google Analytics es requisito necesario, claro, dentro de diferentes opciones de herramientas para centrar el negocio en acciones adecuadas y principalmente oportunas que aceleran entre otros procesos, la innovación y transformación digital (We Solutions, 2017). Acorde a Charlie Vayas, el encargado de *big data* de la transnacional de telefonía Telefónica, el manejo del análisis de datos se ha transformado en un negocio redituable para las empresas que manejan las tecnologías móviles, especialmente al hacer la interpretación de datos y poder crear preferencias de conducta y prácticas de expendio que sirven a las corporaciones para ofrecer nuevos productos. Lo expuesto va acorde a las tendencias globales donde la ciencia de datos se ha convertido en unas de las profesiones con más demanda versus la aun relativamente reducida cantidad de profesionales en el campo (Dávalos, 2019).

La cuarta revolución industrial, o también llamada industria 4.0, es un tema de adopción actual que genera también una tendencia al futuro cada vez más fuerte en el proceso de competitividad de las organizaciones.

En el año 2019 se da por hecho que las capacidades humanas de pensar serán transferibles a las computadoras y al llegar el 2045 se multiplicará la cabida intelectual por miles de millones, es decir, una clara influencia de la tecnología e Internet en la sociedad. De no apadrinar el uso de las tecnologías en los próximos años, las sociedades no poseerán capacidad de innovación ni forma de sostenerse en este momento digital (Noboa, 2018).

Acorde a la información dada por HughesNet proveedor de Internet satelital, Ecuador dominaba la mayor accesibilidad de Internet dentro de los países más poblados de Latinoamérica, repuntando el 81%, superando a países como Argentina, que se ubica en los 78% y respecto al 77% de Chile, entre otros. Además, comparando con países cercanos como Colombia, que alcanza el 58% o Perú, con el 56%, Ecuador es un líder en uso de Internet a nivel regional (HughesNet, 2020).

Ecuador ha realizado diferentes convenios para impulsar la transformación digital hacia la industria 4.0 en el marco del Libro Blanco de la Sociedad de la Información y el Conocimiento (LBSIC), en particular; se ha recibido la cooperación de la Cámara de Industrias y Comercio Ecuatoriano Alemana teniendo como contraparte local al Ministerio de Telecomunicaciones (MINTEL, s.f.), con la intención de que exista una amplia difusión en el entorno industrial local como internacional (Enyoghasi et al., 2021).

En el contexto industrial automotriz, como el de las ensambladoras de vehículos, se registran informes oficiales de la Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana y la Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE), donde se expone que hay una pérdida de competitividad del ensamble local frente a las corporaciones internacionales, donde los procesos están siendo llevados por prácticas de industria 4.0 y por ende podrían llevar a la debacle de la económica e industrias de las empresas automotrices del Ecuador (AEADE, 2019).

Varios estudios de competitividad, basados en la transformación digital, concluyen que la competitividad basada en industria 4.0 permite la hibridación del ambiente físico con el digital, ampliando la estabilidad y permanencia de un negocio dentro de un mercado competitivo global. Dentro de este análisis, el Banco Interamericano de Desarrollo cree que el setenta por ciento de las profesiones en Latinoamérica transitan el riesgo de eliminarse por la sistematización tecnológica; no obstante, esto no se dará a corto plazo, dado que los procesos de aplicación a sucesos tecnológicos se han llevado de modo pausado en la totalidad de los

naciones de la región, además de que no se cuenta con las capacidades o habilidades en servicios básicos necesarios para dar plena capacidad a esta revolución tecnológica (Cepal, 2018).

En los países de Suramérica, incluido Ecuador, los procesos de automatización son lentos comparados con países llamados desarrollados, lo cual representa que esta región se mantendrá postergada a los avances científicos con ejecuciones tardías de las nuevas tecnologías.

En el 2019 existían aproximadamente diecisiete millones de habitantes en Ecuador, esta fue una proyección basada en el censo del 2010, cuya tasa de participación global en la economía se ubicó en el 76% por ciento, once millones y medio de población y, con un nivel de desempleo hasta junio que bordeó el 4.4 % (Dávalos, 2019).

Al realizarse la proyección, aproximadamente ocho millones de empleos (69% del total) se encuentran en un alto riesgo de ser desplazados por robots. La *Figura 1* muestra los niveles de empleo en Ecuador por cada una de las ramas de las actividades económicas.

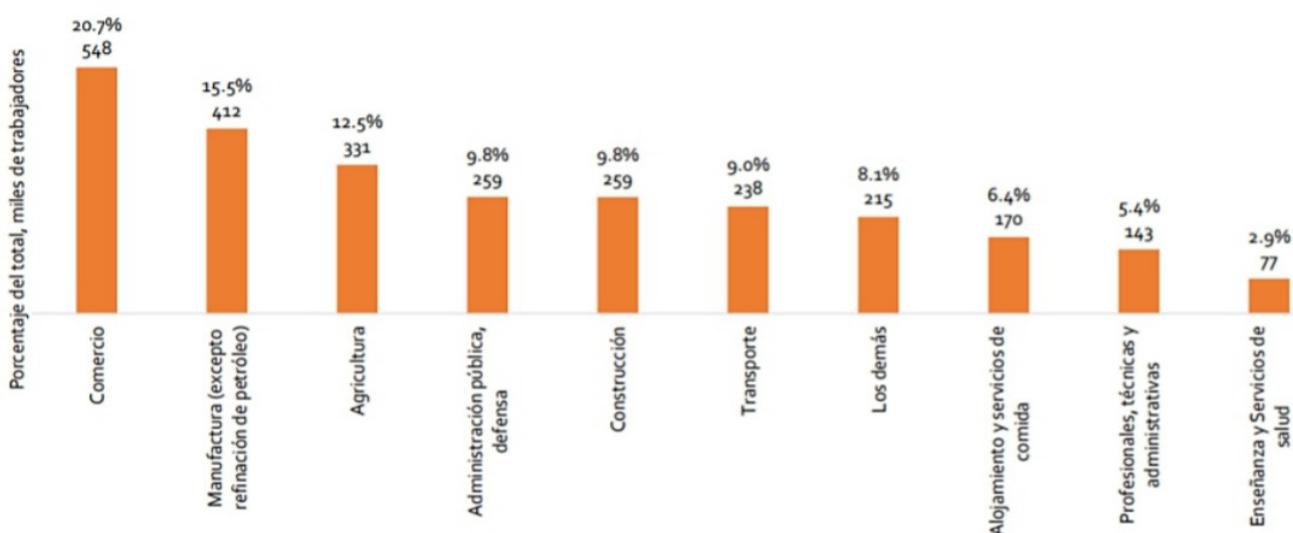


Figura 1. Trabajadores con empleo adecuado por rama de actividad económica
Fuente: INEC-ENEMDU

Ecuador no ha ejecutado estudios para establecer cuáles son los empleos más idóneos a perderse por la sistematización; no obstante, a nivel regional existen investigaciones que sirven como referencia para este estudio, ya que la generalidad de los países latinoamericanos participa de rasgos similares en los aspectos culturales, sociales, estadísticos, productivos, financieros, etc.

Diversos estudios regionales han averiguado sobre la correlación directa entre ejecución tecnológica y el adelanto social y económico de una colectividad, y sus resultados prueban que, estos dos elementos: ejecución tecnológica y progreso social-económico se encuentran interrelacionados y son correspondientes entre sí.

Con los actuales modelos productivos y científicos, los países que no alcancen a modular de manera satisfactoria los progresos tecnológicos como agentes de producción y de innovación de la misma sociedad, serán quienes conserven los actuales niveles de miseria y discordancia, al no llevar una simetría de desarrollo profesional en el marco del ambiente global.

La mayor conectividad y disposición al acceso, enlazan la economía digital y el desarrollo de las infraestructuras necesarias para estas tecnologías. Además, se diseñan nuevos escenarios o programas que permiten su ejecución y finalmente se crean servicios relacionados a la tecnología (no hubiera sido factible sin los dos elementos anteriores), lo que consiente el dinamismo de actividades que en la actualidad únicamente las pueden realizar las personas. Las tecnologías también son una coyuntura para los emprendedores, ya que sin ellas nunca se hubieran formado empresas de redes sociales como Facebook, las de búsqueda Google, la de transporte (Uber, Cabify, otras), las de alojamiento como Airbnb, o las de venta online como Alibaba, entre muchas otras, que han dado oposiciones al nuevo tipo de demandas de la sociedad.

Uno de los principales factores impulsores del aumento de conectividad y mejoramiento de la calidad de dichas conexiones es la adopción de la tecnología 5G como modernización de la tecnología 3G/LTE existente como estándar actual, para esto se ha realizado ya en el país la migración de más de quinientas radio bases en seis provincias, y se planea una expansión constante a través de la infraestructura que se está instalando y probando en colaboración con diferentes empresas internacionales del área de las telecomunicaciones (García & Tigreiro, 2018).

El índice mundial de innovación es un medio con el cual se pueden evaluar los factores de innovación de manera constante. Bajo este marco de referencia, la clasificación mundial del 2017 ubica dentro de los primeros veinte puestos a los países que emplean alta tecnología, como la robótica, procesos automatizados e IoT como referentes en sus procesos productivos, entre ellos Estados Unidos, Singapur, Japón, China, etc., dejando relegados a países más chicos o menos adelantados en el uso de alta tecnología como los regionales de América Latina y a Ecuador dentro del grupo (Mubarak 2020).

METODOLOGÍA

Como aspecto metodológico, es pertinente mencionar que se ha recurrido a una perspectiva de carácter investigativo documental (Vargas et al., 2015), tomando como objeto de este análisis los elementos relevantes de diferentes casos de productividad industrial basada en automatización de procesos mediante el uso de tecnología, los cuales apoyan al mejoramiento del producto interno bruto del Ecuador. Se identifican similitudes de los elementos comunes en el entorno regional, y se obtiene así una perspectiva general sobre el desarrollo de la industria 4.0.

A su vez, en todo proceso de investigación es necesario plantearse preguntas que permita definir trabajos relevantes referentes al tema de estudio, en este sentido se optó por utilizar una revisión sistemática de literatura basada en 5 fases: definir las preguntas, identificar las publicaciones más relevantes, hacer una evaluación de los estudios, resumir lo recolectado de acuerdo a su relevancia y hacer una interpretación de los resultados (Khan et al., 2003).

La base de esta investigación son los diferentes artículos de las empresas del país, así como investigaciones académicas que hacen referencia al uso de diferentes tecnologías en las industrias revisadas, entre ellos están publicaciones, artículos científicos de catálogos indexados en Scopus, como mayor clasificación, publicaciones de importantes revistas universitarias del país, además de portales de noticias.

RESULTADOS

Se evidenció que el uso de la tecnología en el Ecuador ha ido evolucionando desde 2007 hasta llegar a ser un referente de los países vecinos de la región. La penetración de dispositivos móviles y de las redes

de datos con Internet fijo de operadoras de Gobierno y privadas móviles ha facilitado que la población esté intercomunicada facilitando los negocios entre particulares nacionales e internacionales.

El uso de estos dispositivos, mediante redes de datos de media y alta velocidad como 4G y de la expectativa de uso de la red 5G a mediados de 2021 ha motivado un acelerado interés en el uso de sensores y dispositivos de control clasificados generalmente como elementos del Internet de las Cosas, que permiten a los usuarios emplearlos en diferentes procesos productivos como pueden ser los de agricultura, rastreo de producto, entrega en destino final pasando por el de dar un seguimiento a la eficiencia de producción al controlar cantidad de agua de suministro, la alerta a los responsables de las tierras de que deben abonar y si el abono suministrado maneja la química requerida por esos suelos entre otras aplicaciones (Morales, 2020).

Hay una cantidad enorme de datos que pueden ser aprovechados mediante análisis del *big data*. Operadoras de telefonía móvil están ofertando desde 2017 servicios para poder entregar información a sus clientes justamente basados en los análisis de patrones de comportamiento, lo que incluye entre otras cosas, ubicaciones de origen y destino, tiempos de estadía, basados en los datos de los dispositivos a los que ellos proveen acceso Internet. Potencialmente este tipo de análisis permite predecir a focos de la delincuencia a posibles productos de compra o incluso aquellos sitios o personas que son rechazados, esto facilita a las empresas manejar de mejor manera lo que requiere producir e importar.

Con el surgimiento de estas opciones tecnológicas, es claro que se requiere de personal calificado que pueda manejar, mantener y crear sistemas que aprovechen estas tecnologías, en este sentido, las universidades en el Ecuador ya están produciendo programas de manejo de *big data*, IA e IoT. Hay programas de maestría y cursos financiados por las operadoras para que su personal sea capacitado en el montaje, puesta en producción y despliegue de las redes de datos móviles, lo cual facilitará su implementación como el intercambio de conocimientos a la academia, lo cual haría que las siguientes promociones de graduados de pregrado lleven en sus conocimientos y habilidades el lidiar con estas nuevas tecnologías de comunicación.

A medida que las tecnologías como *machine learning* alcanzan su madurez, en el Ecuador existen varias empresas que han entendido que el uso de una automatización inteligente es capaz de transformar el modelo de su negocio, trayendo múltiples beneficios y ahorros a la compañía.

Este tipo de conceptos ha llevado a que empresas nacionales, por ejemplo, de producción de alimentos, empiecen a implementar un modelo basado en la industria 4.0 en mayor o menor grado, en todas sus líneas de producción, realizando proyecciones, revisando calidad de producto y automatizando procesos mediante robótica e inteligencia artificial, lo cual les genera importantes ahorros anuales por mejoras de fórmulas, reducción de material de empaque y eficiencias de mano de obra que ahora es usada para procesos puntuales y no para toda la línea productiva.

El próximo paso de este tipo de industrias es digitalizar la información que generan los equipos actuales para poder obtenerla en tiempo real y generar indicadores de eficiencia y calidad que permitan la toma de decisiones en línea.

También existen otras industrias que nacieron con este tipo de tecnologías, la de tarjetas electrónicas, Tarpug en la zona de Cuenca. Desde el comienzo usó un formato altamente automatizado para tener un control de todos sus procesos y garantizar un producto de alta precisión, lo cual requiere de personal sumamente calificado. Bajo estos conceptos, el progreso de las nuevas tecnologías de la información e innovación han forzado a la sociedad a incluir, dentro de su ofrecimiento, carreras encaminadas a la industria 4.0.

Así, el informe publicado en 2018 por el Foro Económico Mundial, nombrado “El futuro de los trabajos”, indicaba que durante los próximos cinco años desaparecerían 75 millones de cargos, pero todavía surgirán otros 133 millones de nuevos contratos atados al potencial de las nuevas tecnologías en lo que los especialistas llaman, la cuarta revolución industrial que será el dinamizador del mercado profesional.

El ambiente académico ecuatoriano se ha manifestado desde varias instituciones que ven necesario la inclusión de conocimientos científicos en sus diferentes carreras, es así como las siguientes afirmaciones han surgido en estos contextos: “Dos de cada tres alumnos, en cinco o diez años van a tener trabajos que hoy no existen. Esto obliga a la academia a reinventarse para mejorar las destrezas de los estudiantes” (Bravo, 2019).

Entre los años 2017 y 2018, esta investigación encontró que la ESPOL maneja dos carreras, mecatrónica y materiales, donde existen 400 alumnos que la cursan, haciéndola una de las más multitudinarias de la universidad. Lo interesante que se evidencia en esto es que, dentro del contenido académico de esta carrera, se incluye una mixtura entre sistemas mecánicos, sistemas electrónicos, control automático e informática. “Todo obedece a la demanda de la industria 4.0” (García et al., 2018).

El Foro Económico Mundial avizora que para 2030 los nuevos empleos serán para expertos en *big data* y desarrollo de software, con lo cual la educación superior que se está gestando será capaz de proveer la demanda de profesionales para estos puestos.

La disposición de la industria 4.0 está coligada a requisitos como fábricas inteligentes, Internet industrial que impulsa la optimización de la elaboración, y disminución de precios con el fin de crear valía para la industria. Se piensa que esta cuarta revolución admite la relación y la comunicación entre personas, aparatos y procesos. Esto se debe complementar con una adecuada planificación empresarial que tome como uno de sus objetivos primarios la evolución hacia la industria 4.0 (Müller, 2020).

Observando el sector de la edificación, se nota que ya se están facilitando los primeros pasos, porque ya existe tecnificación y sistematización de algunas tecnologías. No obstante, hacen falta políticas ordenadas hacia estos procesos y una cohesión entre la academia, el estado y el sector industrial para definir un tipo de industria para los próximos 10 y 20 años que vendrán.

La industria de la salud no permanece libre de esta revolución industrial, pues técnicas como la telemedicina investigan cómo romper los muros que afrontan decenas de países con escasez de personal médico y la movilidad de los mismos a los sectores más lejanos y pobres.

Con la tecnología de 5G, la telemedicina podrá consultar los historiales médicos de manera simple e instantánea. El monitoreo de pacientes habituales se hará más natural por el uso de *wearables* (equipo electrónico que se utiliza típicamente como prendas de vestir de forma natural) que transmiten su información constantemente a la nube (almacenamiento digital distribuido en diferentes lugares del mundo y en diferentes proveedores de servicios) en tiempo real. Los médicos lograrán realizar consultas de manera remota y los equipos tipo bisturí, sutura, sierras, etc. se operarán desde dispositivos móviles (Durán, 2019).

De esta manera, Durán aseveró que IBM Watson (sistema basado en inteligencia artificial capaz de responder a preguntas formuladas en lenguaje natural) redujo en un 78% el tiempo necesario para la aplicación de estudios de detección del cáncer, solamente en la India, coincidiendo en un 90% de ocasiones con el consejo de especialistas de *Highlands Oncology Group* y *Novartis*. En este momento ya se perciben las primeras invenciones de este tipo, como el uso de inteligencia artificial aplicada en la búsqueda de variaciones

moleculares y la implementación de procedimientos de última generación, o la impresión biológica 3D, que admite desarrollar células madre o tejido de piel artificial.

CONCLUSIONES

La adopción de la tecnología al nivel actual con inteligencia artificial y el uso de *big data* y la conectividad han acelerado los procesos en todas las industrias en el Ecuador; no obstante, el costo de su uso aún es limitante para algunos sectores que podrían utilizarlo en su cadena productiva.

Uno de los sectores en el que se evidencia una mayor adopción de esta llamada industria 4.0 es la financiera. De hecho, de las referencias presentadas; Ecuador en los últimos años ha sido referente para la implementación de este conjunto de tecnologías, principalmente de la inteligencia artificial y del *big data*. La conectividad no ha sido un problema real; pese a esto, existen zonas rurales donde la conexión móvil o fija de Internet no existen, y en las grandes ciudades el uso de la llamada conectividad 4G si bien es funcional, la ciudadanía aún espera la 5G, cuya adopción por políticas de despliegue y precios más accesibles aún no se desarrolla por completo.

La adopción de IoT en un solo sector de la producción en el Ecuador, como lo es el eléctrico, genera cinco centésimas porcentuales de incremento al PBI, lo cual, transformado en valor monetario, es un potenciador para adoptar dicha tecnología en este campo como en otros que lo puedan usar, se debe recordar el campo de las ensambladoras de autos, de equipo electrónico, el agrario, que como se evidenció, son de los principales en la economía del país. La cuarta revolución industrial presume un monumental desafío y un océano de oportunidades para Ecuador, creando una discusión entre uso de tecnología y producción habitual. Esencialmente uno de los ejes del “Proyecto Ecuador 2030” impulsado por el Comité Empresarial Ecuatoriano es el desarrollo enfocado a la Industria 4.0, apoyado por 1,88% de inversión del Producto Interno Bruto (PIB) en tecnología e innovación que debe darse a la academia para que se produzca.

En Ecuador se ve una profunda necesidad de rediseñar el entorno productivo a la par del sistema educativo para enfrentar los retos tecnológicos actuales desde un punto de vista competitivo; esto implica un cambio de visión radical ya que la oferta educativa actual en las diferentes ramas del saber no provee aún de una base amplia de profesionales que soporte esta nueva industria.

Acoger la industria 4.0 es desarrollar la optimización de la elaboración, reducir costos y ser más maleables en la producción con un camino hacia la creación de valor para el negocio. La tecnología aumenta a un ritmo acelerado y las empresas deben ajustarse a los cambios lo antes posible para formar así un principio de ventaja competitiva. La digitalización de la industria es una revuelta que cambiará el modelo de la fabricación automática, los entornos de trabajo y la forma de relacionarse tanto con vendedores, como con clientes. La transformación digital no es ya una opción, sino una necesidad para la sostenibilidad de las empresas, sus tecnologías facilitadoras son una herramienta para ejecutar la estrategia de negocio.

La industria 4.0 es, sin duda alguna, un motor potencial en la economía que permite realizar la transición a una economía basada en conocimiento. Conceptos como realidad virtual y aumentada, inteligencia artificial, robots autónomos, drones, etc., se vuelven día a día más comunes. Desde el punto de vista tanto económico, como tecnológico, representa retos importantes que tanto empresas como individuos deben afrontar, sólo así se logrará el progreso y mejora de calidad de vida de millones de personas.

La industria 4.0 persigue la innovación de las cadenas de valor industrial de forma que, en las manufacturas inteligentes, la producción modular; los sistemas inteligentes monitorizan los procesos, crean una copia virtual del mundo físico y toman decisiones de forma descentralizada y virtualmente autónoma y eficiente.

Las mayores consideraciones para la evolución a una industria basada en tecnología de punta como la llamada industria 4.0 son básicamente la creación desde la academia de carreras como la electrónica con el manejo de la robótica, el desarrollo IoT con usos de sensores de todo propósito y la capacitación para el manejo de tecnologías de comunicación móvil como la 5G. El desarrollo de la programación ya no es solo de software de base, sino el del uso de inteligencia artificial aplicada, como es el *machine learning* para modelos de automatización inteligentes. En el campo industrial, la inversión es fuerte pero necesaria para converger a equipos de última tecnología que a su vez puedan producir equipos nacionales que se adapten a esta nueva tecnología.

A nivel estatal, las diferentes industrias deben reclamar la reinversión de parte del producto interno bruto que han producido, en justamente crear planes a corto, mediano y largo plazo para aplicar prontamente industrias de base tecnológica y que sus trabajadores profesionales u obreros tenga conocimientos sólidos que les permitan mantener y superar las exigencias de la robotización y digitalización. Ecuador felizmente ha puesto las bases para la adopción de una industria 4.0, siendo esto un proceso lento, demandante de recursos humanos y económicos, cuyos frutos, como se revisó, estarán disponibles en los próximos diez años.

Por tanto, entre las múltiples consideraciones para la aplicación de la industria 4.0 en Ecuador 2021 se deben tener presentes el apoyo estatal destinando a un porcentaje del PIB, no menor al 2%, mismo que debe ser invertido en los proyectos académicos de formación en profesionales del área de tecnologías de la información y comunicaciones que no solo deben formarse, sino que también deben ser capacitados en temas como telecomunicaciones de quinta y sexta generación en robótica e Internet de las cosas para que sirvan de base para captación y uso masivo de datos que deben ser aprovechados por aplicaciones de *big data* y minería de datos que daría ventaja empresarial e industrial al país.

Las nuevas generaciones de profesionales deben ser preparados desde las aulas escolares y en las mismas universidades en niveles mucho mayores de matemáticas y programación, de tal forma que puedan aprovechar el desarrollo de la inteligencia artificial y sus diferentes aplicaciones prácticas en este nuevo, pero creciente mundo de la industria 4.0, que fortalecerá a las empresas haciéndolas competitiva mundialmente.

REFERENCIAS

- AEADE. (2019). Anuario 2019. *Anuario de 2019*. 1-145. https://www.aeade.net/sdm_downloads/anuario-2019
- Bravo Alay, K. V., & Martillo Fernández, K. E. (2019). *Economía circular y la industria 4.0 como estrategia del Comercio Internacional en el Ecuador* (Bachelor's thesis, Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Administrativas). <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/45780>
- Cepal. (2018). Perspectivas económicas de América Latina 2018 Repensando las instituciones para el desarrollo. 271. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43513/1/LEO2018_es.pdf
- Dávalos, N. (2019). Big data aún es el 'objeto del deseo' de las firmas ecuatorianas. *Revista Primicias*. <https://www.primicias.ec/noticias/tecnologia/big-data-alternativa-empresas-lleguen-clientes>
- Donoso, M. (31 de marzo de 2020). Ecuador, pionero en Latinoamérica en el uso de inteligencia artificial para detectar COVID-19. Agencia Anadolu. <https://www.aa.com.tr/es/mundo/ecuador-pionero-en-latinoam%C3%A9rica-en-el-uso-de-inteligencia-artificial-para-detectar-covid-19/1787168>
- Durán, J. (2018). La salud y la industria 4.0. *Revista ITNow*. <https://revistaitnow.com/la-salud-y-la-industria-4-0>
- Enyoghasi, C. Badurdeen, F. (2021). Industry 4.0 for sustainable manufacturing: Opportunities at the product, process, and system levels. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105362. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105362>
- Farinango, F. (s.f.). Plataforma tecnológica IoT para el Ecuador. Banco de Ideas <http://www.bancodeideas.gob.ec/proyecto/view?data=aWQ9MTA4NzI%3D>
- Fondo Económico Mundial. (17 de septiembre de 2018). El futuro de los trabajos. World Economic Forum. 2018. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2018>
- García, J. E., & Tigrero, R. A. (2018). *5G en el Ecuador: análisis y diseño de la infraestructura para dar soporte al ecosistema de 5G en el Ecuador* (Tesis de grado, ESPOL).
- HughesNet, (18 de enero de 2020). Datos curiosos sobre el consumo de los servicios digitales en Ecuador. *Datta Business Innovation*. <https://datta.com.ec/articulo/datos-curiosos-sobre-el-consumo-de-los-servicios-digitales-en-ecuador>
- INEC-ENEMDU (2019). *Encuesta Nacional De Empleo, Desempleo y Subempleo (ENEMDU)*. Indicadores laborales marzo 2019. https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/EMPLEO/2019/Marzo/032019_Mercado%20Laboral_final.pdf
- IND Industrias (2020). 2020: ¿retomaremos el sendero del crecimiento? Año XXV, Vol.1 https://issuu.com/industrias/docs/revista_industrias_enero_2020
- Khan, K. S., Kunz, R., Kleijnen, J., & Antes, G. (2003). Five steps to conducting a systematic review. *Journal of the royal society of medicine*, 96(3), 118-121. <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/014107680309600304>

- La agricultura climáticamente inteligente. (s.f). Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) <http://www.fao.org/climate-smart-agriculture/international-fora/es/>
- Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información (MINTEL). (s.f.). Ecuador recibirá cooperación alemana para consolidar la Economía Digital. <https://www.telecomunicaciones.gob.ec/ecuador-recibira-cooperacion-alemana-consolidar-economia-digital/>
- Morales, J. W. A., Morales, J. C. A., Quiñónez, B. C. (2020). La tecnología 5G en el Ecuador. Un análisis desde los requerimientos 5G. *Polo del Conocimiento: Revista científico-profesional*, 5(2), 805 -822. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/1313>
- Mubarak, M. F., & Petraite, M. (2020). Industry 4.0 technologies, digital trust and technological orientation: What matters in open innovation? *Technological Forecasting and Social Change*, 161, 120332. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120332>
- Müller, J. M., Veile, J. W., & Voigt, K. I. (2020). Prerequisites and incentives for digital information sharing in Industry 4.0—An international comparison across data types. *Computers & Industrial Engineering*, 148, 106733. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106733>
- Noboa, E. (17 de diciembre de 2018). ¿Por qué es importante ser un país innovador? *Datta Business Innovation*. <https://datta.com.ec/articulo/por-que-es-importante-ser-un-pais-innovador>
- Rodríguez, A. (13 de febrero de 2021). Inteligencia artificial, en el clima. *Diario El Comercio*. <https://www.elcomercio.com/tendencias/inteligencia-artificial-clima-ciencia-tecnologia.html>
- Ruano, L., Montenegro, J., & León, R. (2019). Inteligencia artificial e innovación: campos de aplicación para la industria del Ecuador. *Visión Empresarial*, (9), 163-172. <https://doi.org/10.32645/13906852.878>
- Sampietro, J. (11 de septiembre de 2019). IoT en las redes eléctricas. *Diario La Hora*. <https://lahora.com.ec/noticia/1102271831/iot-en-las-redes-electricas>
- Tapia, E. (21 de agosto de 2018). Ecuador utiliza la inteligencia artificial para atender al cliente. *Revista Líderes*. <https://www.revistalideres.ec/lideres/ecuador-inteligencia-artificial-atencion-banca.html>
- We Solutions. (24 de julio de 2017). Big Data y Analítica en Ecuador. <http://www.we-solutions.ec/big-data-analitica-ecuador/>
- Vargas, M. G., Higueta, C. G., & Muñoz, D. A. J. (2015). El estado del arte: una metodología de investigación. *Revista Colombiana de Ciencias Sociales*, 6(2), 423-442. <https://www.redalyc.org/pdf/4978/497856275012.pdf>
- Yongxin, L., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0—a systematic literature review and research agenda proposal. *International Journal of Production Research*, 55(12), 3609-3629. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1308576>

La colección: **Coediciones Actualidad y Perspectivas para un desarrollo sustentable** se propone reunir los resultados de investigación de profesionales en las áreas relacionadas con las Ciencias Administrativas, Ciencias de las Ingenierías y Artes y Humanidades.

Este libro fue resultado de la Convocatoria de Capítulos de Libros que realizó la Universidad Tecnológica Israel (Ecuador), junto a la Universidad de Nariño (Colombia), Universidad Agustiniana (Colombia), Universidad César Vallejo (Perú) y Universidad Católica del Maule (Chile).

En esta obra se sintetiza el esfuerzo conjunto realizado por investigadores que trabajan sobre la construcción de estudios relacionados con el área de las Ciencias de la Ingeniería, específicamente las telecomunicaciones, electrónica y sistemas informáticos. Este libro no pretende ser un manual; su objetivo fundamental es realizar propuestas y generar nuevas preguntas para comprender la complejidad de los procesos tratados en este texto.



ISBN: 978-9942-8945-1-9



9 789942 894519