

Revista de



TECNOLÓGICO

RIDTEC | Vol. 16, N.º 2, 2020, julio – diciembre 2020

P-ISSN 1680-8894

E-ISSN 2219-6714

Edición Semestral

Publicación Regional



PKP|INDEX



Revista de TECNOLÓGICO

Revista de investigación de la Universidad Tecnológica de Panamá

Volumen 16, Número 2, Edición Semestral, Julio - Diciembre 2020

P – ISSN 1680-8894

E – ISSN 2219-6714

Revista de I+D Tecnológico: revista de investigación en la Universidad Tecnológica de Panamá. - Vol. 16, no. 2 (jul. - dic. 2020). - Panamá: Editorial Tecnológica, 2020.

v.; 27 cm.

Semestral

P- ISSN 1680-8894

E- ISSN 2219-6714

1. Universidad Tecnológica de Panamá - Publicaciones seriadas

2. Investigaciones - Publicaciones seriadas

3. Investigación y desarrollo.

Universidad Tecnológica de Panamá

AUTORIDADES

Ing. Héctor M. Montemayor Á.

Rector

Licda. Alma Urriola de Muñoz

Vicerrectora Académica

Dr. Alexis B. Tejedor De León

Vicerrector de Investigación, Postgrado y Extensión

Mgtr. Mauro Destro Stimamiglio

Vicerrector Administrativo

Mgtr. Ricardo A. Reyes B.

Secretario General

Ing. Brenda Serracín de Álvarez

Coordinadora General de los Centros Regionales

La Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC) es una revista indexada abierta (OA) con publicación semestral de la Universidad Tecnológica de Panamá, especializada en las áreas de las ciencias, ingenierías y tecnologías.

Actualmente, la RIDTEC forma parte del Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal (LATINDEX), y The European Reference Index for the Humanities and the Social Sciences (ERIH PLUS), entre otras como REDIB, ROAD, BASE y OAJI.

Para garantizar un proceso de evaluación libre de sesgo y/o conflictos de intereses, cada artículo ha sido evaluado a través de un proceso de "revisión por pares, doble ciego".



Revista de I+D Tecnológico disponible en:

<http://www.revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico>

Plataforma para la Recepción de Artículos:

<http://www.redinvestigadores.utp.ac.pa/revistal+D/openconf/openconf.php>

© Derechos reservados, UTP

Impreso en Panamá, Ciudad de Panamá

Imprenta de la Universidad Tecnológica de Panamá

Tiraje: 300 ejemplares.



Directorio Editorial

P – ISSN 1680-8894
E – ISSN 2219-6714

Director de la revista

Dr. Orlando Aguilar¹

Editor de la revista

Dr. Orlando Aguilar¹

Coeditores

Lic. Cristian Moreno²

Comité Editorial

Dr. Carlos Medina³

M.Sc. Julio Mario Daza Escorcía⁴

Dr. Jesús Javier Alcantar Peña⁵

Dr. Frederick Wittel⁶

Dr. David Álvarez⁷

Proyección Internacional

Dra. Elida de Obaldía⁸

Comité Científico

Dr. Christian Chapa Gonzalez⁹

Dr. Ronaldo Maghirang¹⁰

Dr. Ronaldo Maghirang¹¹

Soporte técnico y bibliometría

Ing. Danny Murillo¹²

Ing. Dalys Saavedra¹²

Dirección de Comunicación Estratégica

Mgter. Danilo Toro¹³

Ing. Libia Batista¹⁴

Mgter. Karin Guillén M.¹⁵

Lcda. Shirley Cedeño¹⁶

Afiliaciones

1. Profesor de la Facultad de Ingeniería Mecánica, Dirección de Investigación, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
2. Dirección de Investigación, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
3. Profesor de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
4. Profesor de la Facultad de Ingeniería Industrial, Politécnico de la Costa Atlántica, Colombia.
5. Investigador Titular B, Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI), Querétaro, México.
6. Docente Administrador, Assoc. Dean of Math, Science, & Health Professions at Richland College, Dallas, Estados Unidos.
7. Docente Investigador, Universidad de los Andes –Bogotá, Colombia.
8. Asesora de investigación de la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
9. Docente Investigador, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computacional, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México.
10. Professor adn Associate Dean for Research and Graduate Programs, Kansas State University, Estados Unidos.
11. Profesor Titular ordinario, Universidad Tecnológica Nacional de La Plata, Argentina.
12. Dirección de Innovación en Tecnología Educativa, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
13. Dirección de Comunicación Estratégica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
14. Editorial Universitaria, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
15. Diseño gráfico, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.
16. Imprenta, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.



*P*resentación

por Ing. Orlando Aguilar, Ph.D.

Editor en jefe, Revista de I+D Tecnológico

Universidad Tecnológica de Panamá

Junio, 2020

La Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) presenta a la comunidad científica y público en general, la segunda edición del año 2020, de la Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC), volumen 16, Número 2. Con el propósito de divulgar la labor de investigación científica en la UTP, nace en 2002, RIDTEC, como una revista abierta (OA) evaluada por pares Doble Ciego, con publicación semestral. RIDTEC es la principal revista panameña para la publicación de trabajos de investigación en las áreas de ingeniería y tecnología, apoyando a docentes e investigadores nacionales e internacionales en la publicación de sus trabajos.

El primer artículo de este número determina la ubicación óptima de plantas virtuales de generación analizando el comportamiento en estado estacionario del sistema, combinando una amplia variedad de recursos energéticos distribuidos y operando como un sistema unificado.

El siguiente artículo tiene como objetivo lograr determinar un índice de riesgo y vulnerabilidad a partir de la calidad fisicoquímica y microbiológico de las aguas superficiales marino-costeras y factores socioeconómicos utilizando como caso de estudio la ciudad costera de Portobelo, provincia de Colón.

El tercer trabajo presenta un estudio de las islas de calor urbano en las principales vías de la Ciudad de Panamá utilizando mapas de isotermas con el método de EBK, comprobando las islas de calor y su relación con edificios altos, uso de automóviles, el uso de asfalto como material para las calles y factores ambientales como la lluvia, nubes y vientos.

El cuarto artículo presenta una propuesta de diseño de un plan de trabajo para el desarrollo de una aplicación Web para el control y gestión de deforestación en el Ecuador utilizando la metodología de las buenas prácticas de PMBOK 5.

El quinto trabajo presenta un estudio de digestividad anaeróbica de BioAR usando el sistema Oxitop, a fin de estimar la cinética y potencial generación de biogás para su posible aprovechamiento.

El siguiente artículo se propone la utilización de técnicas de algoritmos supervisados para observar su utilización y ver el rendimiento de diferentes modelos de algoritmos supervisados para medir la efectividad en la clasificación de un conjunto de datos aplicado para el análisis de sentimientos.

El siguiente trabajo se presenta la resiliencia en los sistemas eléctricos, la conmutación de las líneas de transmisión bajo escenarios de evaluación de contingencia N-1, y, la planificación de expansión de transmisión.

El octavo artículo tiene como objetivo mantener el sistema eléctrico de potencia con estabilidad y confiabilidad orientada hacia el método de flujos óptimos de potencia AC.

El noveno trabajo presenta un análisis de la geometría de las líneas de transmisión, basado en comparaciones de diferentes geometrías, que se proponen para analizar qué sistema es el óptimo para su posible implementación, lo que permite introducir criterios de construcción y diseños apropiados en las líneas de transmisión.

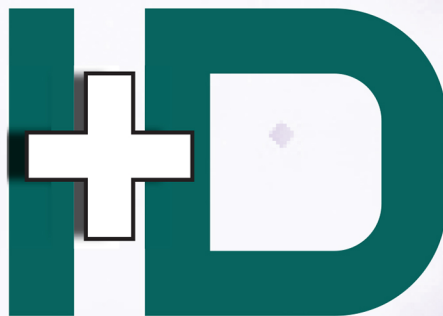
El siguiente trabajo muestra un estudio para minimizar los costos en el consumo de energía eléctrica de un edificio tipo comercial cuando se realiza la recarga de vehículos eléctricos mediante instalación de paneles fotovoltaicos.

El siguiente trabajo utilizó una técnica llamada fusión de sensores en el dominio del edificio para desarrollar primero modelos descriptivos precisos para los perfiles de ocupación y, en última instancia, para poder predecir los perfiles típicos, con el fin de detectar la ocupación en una oficina universitaria.

El duodécimo artículo presenta tres esquemas de optimización para una respuesta de tipo fracción disconforme muestral en un proceso de manufactura mediante la experimentación y modelos de regresión logística.

El decimotercer trabajo compara la medición de la complejidad de un proyecto y la complejidad de proyectos medida utilizando los cronogramas de obra y el desempeño de estos utilizando el coeficiente de correlación de Pearson.

El último artículo presenta el control de un robot portátil paralelo tres grados de libertad para realizar la tarea del conformado metálico por líneas de calor «Line Heating», para embarcaciones en alta mar, mejorando los costos del proceso y los tiempos de servicio de esta tarea de mantenimiento.



Contenido

- | | | | |
|-----------|--|-----------|---|
| 5 | Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia
Optimal location of virtual generation plants in electric power systems based on optimal power flows
Fabrizio Mosquera Diego Carrión | 59 | Aprendizaje automático aplicado al análisis de sentimientos
Machine learning applied to the sentiment analysis
Denis Cedeno-Moreno Miguel Vargas-Lombardo |
| 17 | Determinación de un índice de riesgo y vulnerabilidad en poblaciones costeras: estudio de caso Portobelo, provincia de Colón
Determination of a Risk and Vulnerability Index in Coastal Populations: Case Study Portobelo, Province of Colón
Ariel Antonio Grey Alides Canto Yarisel González Kelsyn Barria Itzel Castillo | 67 | Resiliencia de Sistemas Eléctricos de Potencia mediante la Conmutación de Líneas de Transmisión - Estado del arte
Electrical Power Systems Resilience by Switching of Power Transmission Lines – State of art
Jaime Pilatásig Lasluisa Diego Carrión |
| 25 | Efecto de las islas de calor urbano en las principales vías de la Ciudad de Panamá
Urban heat island effect on the main roads of Panama City
Martín Candanedo | 78 | Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión
State of the art transmission expansion planning
José Palacios Diego Carrión |
| 37 | Plan de desarrollo de una aplicación Web para el control y gestión de deforestación en el Ecuador – «Web-CONGESDEFO»
Development plan of a web application for the control and management of deforestation in Ecuador - «Web-CONGESDEFO»
Paola Segovia Toscano Aránzazu Berbey-Álvarez | 86 | Evaluación de la estabilidad del sistema de transmisión eléctrica a partir de estructuras simétricas considerando transferencia de carga
Evaluation of the stability of the electrical transmission system from symmetric structures considering load transfer
Saúl Mauricio Jami Solís |
| 51 | Revisión sobre propagación de ransomware en sistemas operativos Windows
Review on propagation of ransomware in windows operating systems
José Moreno Carlos Rodríguez Isabel Leguías | 94 | Recarga de vehículos eléctricos mediante una optimización entera mixta con participación de respuesta de la demanda
Recharge of electric vehicles through a mixed whole optimization with participation of the demand response
Jair Josue Salazar Lopez Edwin Marcelo García Torres Diego Francisco Carrión Galarza |

Contenido

101

Evaluación de la técnica de fusión de sensores para la detección de ocupación en una oficina universitaria

Assessment of the Sensor-fusion Technique for Occupancy Detection in a University Office

Miguel Chen Austin | Dafni Mora | Gianmarco Fajilla | Marilena De Simone

120

Cálculo de la correlación entre la complejidad de proyectos, medida por su red de nodos y arcos, y su desempeño, medido utilizando el método de valor ganado

Correlation calculation between project complexity, measured by their arcs and nodes network, and project performance, measured using the earned value method

Hector J. Polo | Yarissa M. Palma

109

Optimización en manufactura mediante la experimentación y modelos de regresión logística

Optimización en manufactura mediante la experimentación y modelos de regresión logística

Armando Mares Castro

125

Control deslizante de un robot paralelo de tres grados de libertad para realizar actividades de mantenimiento naval

Sliding Mode Control of a parallel robot with three degrees of freedom to perform naval maintenance activities

Miguel Ângelo Dos Santos Pereira | Ilka Arelys Banfieldo

Indexadores



Base de datos



PKP|INDEX



Repositorios



Directorios



Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia

Optimal location of virtual generation plants in electric power systems based on optimal power flows

Fabricio Mosquera ^{1*}, Diego Carrión ¹

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: fmosquerav@est.ups.edu.ec

RESUMEN— El presente trabajo determina la ubicación óptima de plantas virtuales de generación analizando el comportamiento en estado estacionario del sistema, la planta virtual de generación combina una amplia variedad de recursos energéticos distribuidos y los opera como un sistema unificado. Se identificará la localización óptima de plantas virtuales de generación para mejorar el perfil de tensión nodal del sistema de potencia basado en flujos óptimos de potencia de corriente directa con restricciones económicas. El análisis de sistema eléctrico se realiza mediante flujos óptimos de potencia de corriente continua basado en programación lineal entera mixta respetando restricciones económicas, ambientales, cargabilidad de las líneas de transmisión, el manejo de las demandas, nivel de sobrecarga, desviación angular y perfil de tensión. Se realiza una revisión literaria plantas virtuales de generación la cual tiene una serie de ventajas competitivas como el uso de tecnologías renovables y de alta eficiencia energética. También dispone de información para el desarrollo del flujo óptimo de corriente continua.

Palabras clave— *Flujo de carga, despacho de generación de energía, generación de energía distribuida, gestión del sistema eléctrico, recursos energéticos, transmisión de potencia.*

ABSTRACT— The present work determines the optimal location of virtual generation plants analyzing the steady state behavior of the system, the virtual generation plant combines a wide variety of distributed energy resources and operates them as a unified system. The optimal location of virtual generation plants will be identified to improve the nodal voltage profile of the power system based on optimal flows of direct current power with economic and environmental constraints. The electrical system analysis is carried out by means of optimal direct current power flows based on mixed integer linear programming, respecting economic, the chargeability of the transmission lines, the handling of the demands, the overload level, the angular deviation and the voltage profile. A literary review of virtual generation plants is carried out, which has a series of competitive advantages such as the use of renewable technologies and high energy efficiency. It also has information for the development of the optimal direct current flow.

Keywords— *Load flow, dispatch of power generation, generation of distributed energy, management of the electrical system, energy resources, power transmission.*

1. Introducción

En la actualidad la Unión Europea ha cambiado significativamente hacia un sistema de energía con menos dependencia de recursos no renovables, con la introducción de políticas de reducción de emisiones que tienen impactos significativos en los mercados de electricidad [1].

La presencia de generación distribuida (DG) plantea nuevos retos en la gestión y operación de las redes

eléctricas. La DG tales como eólica, calor y energía combinada, etc. Ya representa el 20% o más de la generación total en algunas empresas eléctricas, y esta cifra aumenta constantemente [2].

DG proporciona autonomía y flexibilidad para los usuarios finales, y al mismo tiempo permite una reducción de corto plazo inversiones requeridas en el sistema eléctrico convencional [3]. La energía eólica y la energía fotovoltaica en una DG, pueden llevar a la

Citación: F. Mosquera y D. Carrión, "Localización óptima de plantas virtuales de generación en sistemas eléctricos de potencia basados en flujos óptimos de potencia", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 17 julio 2019. **Recibido con correcciones:** 19 de octubre de 2019. **Aceptado:** 7 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 F. Mosquera y D. Carrión. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

aparente paradoja situación de los precios negativos de la electricidad en momentos de baja demanda de energía [4].

En una DG es importante considerar la respuesta de la demanda de los sistema, así como el almacenamiento de la energía producida [5].

La inserción de los recursos energéticos distribuidos (DER) está en aumento alrededor del mundo, ya que posee un sistema de energía sostenible con menos problemas ambientales y mayor eficiencia energética que de energías no renovables [6].

Un VPP es la unión de recursos distribuidos [6-10], almacenamiento de energía y cargas controlables. Ejemplos de generadores son paneles fotovoltaicos (PV), turbinas eólicas, pequeños sistemas hidroeléctricos, celdas de combustible o CHPs (Central combinada de calor y energía). El almacenamiento de energía comprende almacenamiento electroquímico (por ejemplo, baterías), almacenamiento mecánico (por ejemplo, tanques de aire comprimido o energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo) y almacenamiento térmico [6-11].

Una VPP desempeñan como un solo actor en el mercado de la energía. Dentro de este nuevo concepto de VPP, los propietarios de VPP tienen la posibilidad de acceder al mercado eléctrico, mientras compensan la energía debida a las intermitencias en las fuentes de energía eólica y solar [10].

En [12] VPP se define como una entidad heterogénea multitecnología y multisitio. En [13] se explica que las VPP están compuestas principalmente de varias fuentes de energía renovables (RES).

En el mundo de la VPP [14] tiene tres secciones: VPP basado en la respuesta a la demanda (DR), VPP del lado de la oferta y VPP de activos mixtos.

Con la mayor penetración de DER en la red eléctrica, se requiere más flexibilidad en el lado del consumo. La flexibilidad disponible en el DER desplegado en un edificio residencial puede convertirse en un activo atractivo para el comercio en los mercados de electricidad. Un VPP puede ofrecer una respuesta de demanda a un agregador que opera en el mercado. Sin embargo, en el sector residencial esta flexibilidad puede estar sujeta al comportamiento de los residentes [15].

Actualmente, el principio de VPP basado en la respuesta a la demanda (DR) más utilizado y mejor establecido es la gestión de cargas comerciales e

industriales y la generación distribuida. Varios factores definen los modelos de negocio bajo los cuales los VPP operan [16]:

Método de financiación (mercado o incentivado), mercado objetivo (servicios del sistema, gestión de desequilibrios, día por delante, intradía, mercado de balanceo, etc.). Factor de motivación (estructura de precios, aspecto ambiental, aspecto del sistema, etc.). Tipo de cliente (doméstico, comercial, industrial, público). Características de consumo (capacidad de respuesta, capacidad, confiabilidad, frecuencia, duración, etc.) Características de generación distribuida (recurso primario, capacidad de respuesta, capacidad, confiabilidad, frecuencia, duración, etc.) Tipo de activación (tiempo de respuesta, duración, cambios, capacidad, etc.). Modo de comunicación o activación (manual, semiautomático, automático).

Normalmente, la combinación correcta de los factores mencionados anteriormente establecerá el éxito de un programa de respuesta a la demanda relevante. Los sistemas avanzados de VPP IT recopilan datos de la red, se comunican con los clientes y administran el equipo de control distribuido asociado. También controlan la base distribuida de "recursos" (generación y consumo distribuidos), crean activaciones, implementan el proceso de optimización de energía, monitorean la implementación y evalúan el desempeño cuantitativo y financiero de las operaciones [16].

En general, VPP del lado de la oferta existen dos tipos de mercados en función de cómo se forma el precio en los mismos [17]:

Mercados "pagar como oferta", en los que un VPP recibe exactamente el precio que él ha ofertado, mercados marginalistas, en los que todos los generadores casados reciben un mismo precio, el cual se determina por el cruce de las curvas de oferta y demanda.

En Los VPP de activos mixtos el objetivo final del VPP es que reúne la generación distribuida y la RD para proporcionar un intercambio sinérgico de los recursos de la red para obtener más valor, reduciendo así los costos de capital. Pocos de estos proyectos están en operación comercial hoy [17].

La VPP incluye capacidades de almacenamiento y respuesta a la demanda, permite que las fuentes de energía renovables variables, actúan como una gran planta de energía despachable [18].

La penetración de los sistemas de alimentación distribuida de corriente continua está aumentando rápidamente en las redes de energía eléctrica aisladas, para satisfacer la demanda de energía barata, limpia, de alta calidad e ininterrumpida de la sociedad moderna. corriente continua [19].

Junto con el aumento del consumo de energía en el mundo, las nuevas tecnologías influirán en la forma en que generamos, distribuimos y consumimos energía, mediante esta investigación se plantea un conceptualización de la VPP, así como su funcionamiento y comportamiento en el mercado eléctrico, también se logrará la identificar la localización óptima de plantas virtuales de generación para mejorar el perfil de tensión del sistema de potencia basado en flujos óptimos de potencia de corriente directa (DCOPF) de corriente continua con restricciones económicas y ambientales.

En la sección 2 se defina VPP su clasificación, la comunicación y protocolos que utiliza para ingresar al mercado eléctrico por otro lado se menciona la optimización de VPP con criterios de despacho económico. En la sección 3 se encuentra la conceptualización y desarrollo de flujos de potencia, las ventajas de flujos óptimos de corriente directa (DCOPF) y finalmente se tiene conclusiones acerca del presente trabajo.

2. Definición y características de una VPP

Las VPP se pueden dividir en tres categorías basadas en su modo de operación: generadores distribuidos, dispositivos de almacenamiento de energía y recursos de carga controlables [20].

La estrategia de control de las VPP se puede dividir en tres diferentes patrones: control centralizado, control distribuido y control totalmente distribuido, según su estructura e información, Dependiendo de los roles y la responsabilidad, VPP se distingue como VPP comercial (CVPP), VPP técnico (TVPP) y VPP combinado [21].

VPP comercial (CVPP). En [22] un CVPP se agrega la capacidad de diferentes unidades DER para participar en un mercado mayorista de energía, el objetivo de un CVPP es minimizar los costos de producción y maximizar las ganancias. El operador puede ser cualquier agregador de terceros con acceso al mercado.

En [23] CVPP permite:

Visibilidad de las unidades de DER en los mercados energéticos, participación de las unidades de DER en los mercados energéticos, y maximización del valor de la participación de las unidades DER en los mercados energéticos.

CVPP realizan agregación comercial y no toman en consideración ningún aspecto de operación de red que las redes de distribución activas deben considerar para una operación estable [23].

VPP técnico (TVPP). Un TVPP en [22] consiste en diferentes DERs en la misma zona geográfica ubicación e incluye la influencia en la cuadrícula local. El objetivo principal de un TVPP es ayudar a estabilizar la red de distribución.

En [23] TVPP permite:

Visibilidad de las unidades DER a los operadores del sistema., contribución de las unidades de DER a las actividades de gestión del sistema, uso óptimo de la capacidad de las unidades DER para proporcionar servicios auxiliares que incorporan restricciones de la red local

Esto nos comenta que las unidades pequeñas proporcionen servicios auxiliares y reduce los riesgos de indisponibilidad al diversificar las carteras y la capacidad en comparación con las unidades DER independientes [23].

VPP combinado. En [22]-[24] comenta un nuevo tipo de VPP, mencionados anteriormente, para minimizar sus efectos negativos y maximizar sus beneficios. La VPP combinada debe ser operada por terceros y debe incluir ofertas de productos basadas en el mercado, como servicios de red, y debe considerar el impacto de los horarios en la red eléctrica local.

VPP combinado cubre la brecha entre la optimización económica en un CVPP por un lado y la operación de red estable por el otro [24].

En [24] menciona a la VPP combinado dispone del CVPP que está operativo en los mercados de energía y es responsable de pasar información sobre DER a través del TVPP y participa en la administración del sistema y facilita la administración de las restricciones de la red local, así como la agregación de DER con los parámetros de la red local para su presentación a nivel de transmisión.

2.1 Comunicación de VPP

En [25] una VPP se tiene un grupo de unidades generadoras dispersas, cargas controlables y no

controlables; y sistemas de almacenamiento, agregadas para operar como una planta de energía única.

Los generadores pueden utilizar fuentes de energía tanto fósiles como renovables. VPP tiene un sistema de administración de energía (EMS) que coordina los flujos de energía provenientes de los generadores, las cargas controlables y los almacenamientos como se muestra en la figura 1 [6], [7], [25].

La VPP puede hacer sus tareas solo con la existencia de un EMS para equilibrar las cargas, las producciones [9] y la comunicación es bidireccional, de modo que el VPP no solo puede recibir información sobre el estado actual de cada unidad, sino que también puede enviar las señales para controlar los objetos, la coordinación del funcionamiento es muy compleja [25].

La VPP será el equilibrio de la generación de energía y el consumo en su localidad, el control distribuido se basa en el sistema multiagente [26].

La característica principal de la planta de energía virtual es que cada unidad del VPP está conectada directa o indirectamente con el EMS para que el centro de control pueda recibir la información sobre el estado real del participante [13].

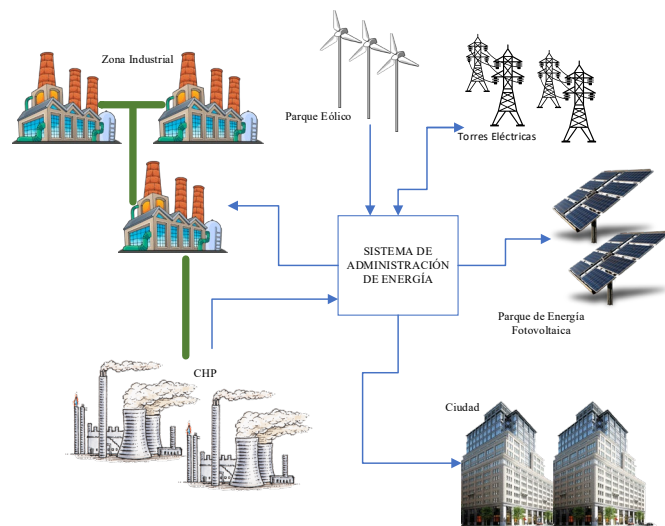


Figura 1. Análisis de VPP

Los diferentes modos de operación de VPP, incluidos el funcionamiento en isla y el funcionamiento conectado a la red, afectarán la salida y los beneficios de su DER interno. En el funcionamiento de la isla, el envío óptimo está en la premisa de DER interno y la carga local dada. La carga interrumpible que es necesaria en el

funcionamiento de la isla se activa para compensar la falta de energía en [20].

El componente central de un VPP es un agregador que opera en los mercados, recupera datos de medición de los DER y envía programaciones o comandos a los controladores de DER. Para las interacciones entre el agregador y los controladores DER, se requiere un canal de comunicación seguro. Actualmente, en muchos países se están implementando medidores inteligentes y de facturación automatizada para mejorar el monitoreo de la red y habilitar tarifas dinámicas en función del tiempo o dinámicas, lectura de medidores remotos y facturación automática [11].

En [11] comprende DLMS (especificación de mensaje de lenguaje de dispositivo) como un protocolo de capa de aplicación para la comunicación con dispositivos de medición, y COSEM (estándar complementario para la medición de energía) como un sistema para orientado a objetos Modelado de equipos de medición de energía. DLMS / COSEM usa el sistema de identificación de objetos (OBIS) para identificar objetos de datos en sistemas de medición de energía, y los servicios de COSEM permiten a los clientes consultar atributos específicos de objetos, asignar valores a atributos de objetos o ejecutar métodos de objetos.

SML (lenguaje de mensajes inteligentes) es un protocolo orientado a mensajes para la comunicación con medidores inteligentes. El protocolo de aplicación SML define archivos SML que consisten en uno o varios mensajes SML. Un mensaje SML puede ser una solicitud o una respuesta. Los medidores inteligentes actúan como servidores, reciben archivos SML de los clientes y procesan los mensajes SML contenidos en el orden de recepción. Actualmente, el SML no se usa ampliamente fuera de Alemania [11].

Para el monitoreo y control de dispositivos distribuidos en diferentes sitios, se requiere un canal de comunicación seguro y confiable. Para Alemania, BSI TR03109 define una AMI (Infraestructura de Medición Avanzada) basada en SMGW (medidor inteligente)[11].

En [25] uno de los protocolos propuestos y utilizados en un enfoque de planta de energía virtual es IEC 61850.

Un clave importante para el éxito de las redes inteligentes y la respuesta a la demanda es la existencia y el uso de estándares. El uso de estándares garantiza la interoperabilidad perfecta entre diferentes partes interesadas. Han surgido varios estándares de redes

inteligentes y están siendo desarrollados por diferentes organizaciones en diferentes regiones. En los Estados Unidos, el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) está liderando la estandarización y en la UE la organización responsable es CEN-ELEC [15].

Desde la perspectiva de la comunicación, hay una necesidad de protocolos estándar para construir casos de negocios sólidos en torno a nuevos temas como la respuesta de la demanda. Actualmente hay dos alianzas industriales que trabajan en la estandarización, automatización y simplificación de la respuesta a la demanda. La alianza OpenADR ha desarrollado un protocolo de capa de aplicación llamado OpenADR 2.0 para facilitar la integración de respuesta a la demanda [15].

Se propone una metodología novedosa para evaluar el desempeño de los protocolos de respuesta a la demanda junto con una estrategia de respuesta a la demanda. Esta metodología se puede utilizar para evaluar una estrategia junto con un protocolo y ajustar de forma iterativa los parámetros en el protocolo o en la estrategia para lograr un rendimiento deseable [15].

2.2 Optimización de la estructura VPP

Para mantener la frecuencia y la tensión del sistema de potencia dentro de los límites permitidos, el operador del sistema independiente (ISO) en [25] debe obtener una “Reserva Rodante” suficiente como servicio auxiliar de control de frecuencia y suficiente potencia reactiva, respectivamente la función objetivo (OF) del EMS es administrar los flujos de energía para minimizar los costos de generación de electricidad, los costos totales y evitar la pérdida de energía producida por generadores basados en energía renovable y operara de acuerdo con su función objetivo un ejemplo, se tomaría como la minimización de los costos de generación o la maximización de las ganancias [25]

En [13] el sistema de control VPP equilibra la generación y el consumo en cada intervalo de tiempo durante el período de un día y la estrategia propuesta puede ayudar al ingeniero de planificación a minimizar el costo de generación de energía VPP.

En [27] El objetivo de VPP es maximizar las ganancias mediante la identificación de oportunidades de arbitraje y la oferta óptima en los mercados.

En [8] el arbitraje comenta como la práctica de tomar ventaja de una diferencia de precio entre dos o más mercados, objetivo que se consigue llevando a cabo

transacciones complementarias, compra y venta del mismo activo (en nuestro caso energía) en los distintos mercados para capitalizar el diferencial de precios.

En [27] arbitraje es el proceso de obtener ganancias sin riesgo al aprovechar el precio diferencial para el mismo activo o seguridad física. Como táctica de inversión ampliamente aplicada, el arbitraje generalmente implica la venta de un valor a un precio relativamente alto y la compra simultánea del mismo valor (o su equivalente funcional) a un precio relativamente bajo.

Además, la información sobre los posibles cuellos de botella en la red desempeña un papel relevante en el proceso de optimización de la operación VPP [6]-[7]. De esta manera, el EMS puede elegir el "modus operandi" óptimo, debido a la naturaleza fluctuante de las fuentes de energía renovables, la predicción de la producción de energía no es un procedimiento fácil [6]-[25].

El EMS detendrá los procesos industriales menos rentables para las pérdidas económicas, para evaluar tales pérdidas económicas se tendrá de la siguiente manera [25]:

$$Costo_{total} = Valor_{Elec} \cdot Total_{Elec} + E_{pr} \cdot E_{red} + V_{pc} \cdot E_{su} \quad (1)$$

Donde:

$Costo_{total}$ es el costo total anual estimado (\$).

$Valor_{Elec}$ es el valor promedio ponderado de los costos anuales de generación de electricidad (\$/MWh).

$Total_{Elec}$ es la energía electricidad total anual producida (MWh).

E_{pr} es el precio de la energía de la red (\$/MWh).

E_{red} es la energía anual comprada en la red (MWh).

V_{pc} es el valor de la carga perdida (\$/MWh).

E_{su} es la energía anual que no se puede suministrar o comprar desde la red (MWh).

Algoritmo para el flujo del control de optimización de una VPP

Paso 1: SI

Existe excedente de energía
SI

El excedente de electricidad es mayor que la suma de la energía Entonces

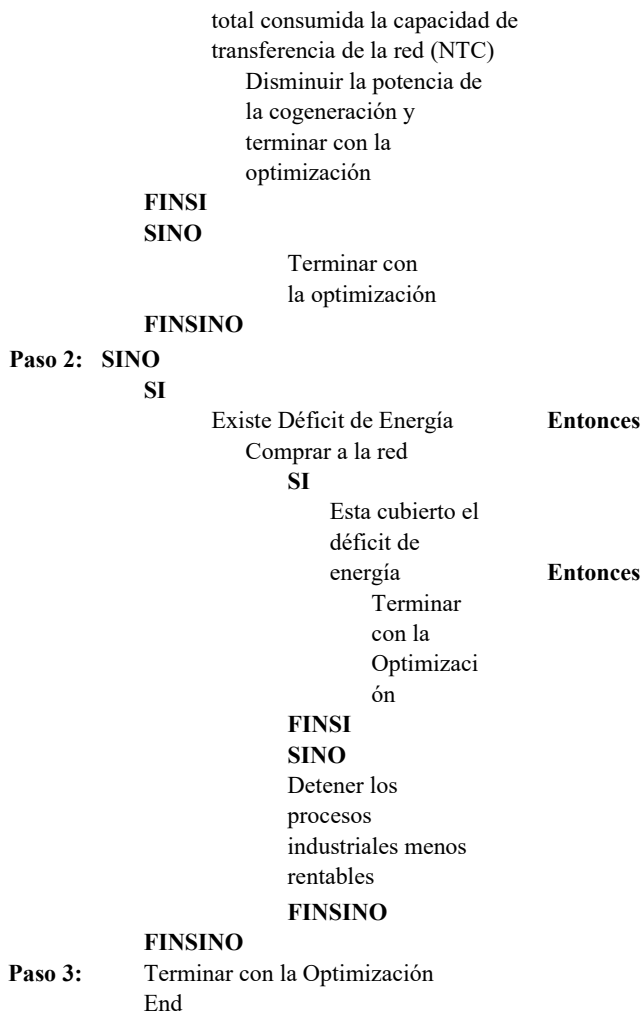


Figura 2. Optimización VPP.

Las principales decisiones que deben ser establecidas por el responsable de la toma de decisiones del VPP [10] son:

Decidir cómo satisfacer su demanda eléctrica relacionada, incluidos los contratos bilaterales, presentar ofertas en esquemas de negociación multinivel para minimizar (maximizar) en de manera cooperativa la energía comprada (vendida) de un a otros VPP interconectados

Los beneficios del concepto de VPP se han identificado para diferentes partes tales como [6], [7], [23]:

Principales beneficios para los propietarios de unidades DER

Capturar el valor de la flexibilidad, incremento del valor de los activos a través de los mercados, reducción

del riesgo financiero por agregación, capacidad mejorada para negociar condiciones comerciales

Principales beneficios para los operadores de distribución y transmisión

Mayor visibilidad de las unidades DER para su consideración en el funcionamiento de la red, uso de la flexibilidad de control de las unidades DER para la gestión de la red, mejor uso de las inversiones en la red, mejora de la coordinación entre los operadores, mitigar la complejidad de la operación causada por el crecimiento de la generación distribuida inflexible.

Principales beneficios para los formuladores de políticas

Integración rentable a gran escala de energías renovables mientras se mantiene la seguridad del sistema, abrir los mercados energéticos a los pequeños participantes, aumentar la eficiencia global del sistema de energía eléctrica al capturar la flexibilidad de las unidades DER. facilitar los objetivos para el despliegue de energía renovable y la reducción de las emisiones de CO₂ mejorar la elección del consumidor, nuevas oportunidades de empleo.

Principales beneficios para proveedores y agregadores

Nuevas ofertas para consumidores y unidades de DER. mitigación del riesgo comercial, y nuevas oportunidades de negocio.

En este documento [28] se presenta un enfoque de optimización de programación lineal de enteros mixtos, que permite un modelado detallado de varias centrales de energía virtual (VPP) que consta de diferentes activos de generación, almacenamiento y demanda con costos operativos específicos, tarifas de incentivo, canales de venta y restricciones de operación habituales. como la demanda mínima y máxima y la potencia de generación, gradientes de carga, etc.

2.3 Despacho Económico

Hoy en día, muchos sistemas de energía funcionan bajo despacho económico con cálculos realizados cada poco minuto. En circunstancias normales, las señales de control se envían a las unidades generadoras para ajustar su salida de potencia de acuerdo con los resultados de optimización [29].

En [30] el despacho económico (DE) tradicional la generación de energía se basa únicamente en el despacho para atender la demanda de carga, para garantizar la fiabilidad de la fuente de alimentación, una gran cantidad

de dispositivos a menudo se configuran en el lado de la generación, lo que resulta en desperdicio.

En [31] la tarea principal del modelado DE del sistema de energía es establecer funciones objetivas y restricciones de acuerdo con las características estructurales y los requisitos operacionales del sistema de energía

En los sistemas interconectados, los resultados de optimización se ajustan aún más mediante un proceso de control de frecuencia de carga (control de generación automático, AGC) , que apunta en [32] para mantener la desviación de la frecuencia y el intercambio de potencia total con las utilidades vecinas dentro de los valores predeterminados. La función objetivo es la suma de los costos del combustible térmico en función de la generación de potencia de salida P y la restricciones más básica son la ecuación de balance de potencia, la cual ponen límites a P [29]. Los factores de la demanda se considerará en el despacho de potencia [30]

En vista de las propiedades duales de VPP tanto como fuente y carga, factores del lado de la demanda son tomados en consideración en el despacho de potencia [31]. Normalmente los consideran en una función de objetivo cuadrático o en un enfoque iterativo, donde las pérdidas se calculan después de una solución anterior de flujos, luego estas pérdidas se añade a una demanda adicional [33]. En [32] se presenta un método de asignación de pérdida de transmisión para los nodos de carga y generador considerando la potencia del nodo y el flujo de potencia de la línea, por lo tanto, el futuro sistema de energía debería poder operar en condiciones de fuerte flujo de energía bidireccional para permitir una integración eficiente de la generación de energía local (especialmente basada en fuentes renovables) [32-34]. Permiten la prestación de servicios del sistema en la red de distribución y transmisión, como la capacidad de reserva operativa [35]. Uno de los indicadores de la calidad de la energía en los sistemas de distribución se traduce en que la tensión que se les suministra a los usuarios.

2.4 Despacho Óptimo de VPP

En [36] los DER integrados se envían de manera óptima para minimizar los costos operativos de VPP por parte del EMS que también se encarga de la predicción de la información sobre la carga, la producción de energía renovable, de modo que se decida la programación de la generación, incluida la salida de DG, la estrategia de

carga y descarga del almacenamiento de energía, ya sea para reducir la carga interrumpible o para comerciar con la red.

En [37] el envío óptimo centralizado no se puede cumplir con el requisitos diversificados y escalabilidad de VPP causados por DER distribuidos geográficamente con varias operaciones. Por lo tanto, un envío óptimo descentralizado sirve para mejorar la decisión de envío óptima [36].

En este artículo [13], el algoritmo APSO se ha aplicado para resolver el problema de despacho óptimo de RES dentro de VPP, y los resultados muestran que este algoritmo proporciona soluciones de alta calidad al tiempo que cumple con las restricciones

3. Flujos óptimos de potencia

El flujo de energía es la solución de estado estable de un sistema de energía bajo ciertas condiciones preestablecidas para la generación, carga y topología del sistema. La solución consiste en conocer la magnitud y el ángulo de la tensión en cada bus del sistema, el flujo de potencia en cada elemento del sistema y las pérdidas de transmisión; en cambio, el flujo de potencia óptimo (OPF) considera un problema de optimización para definir los valores de potencia en cada bus de generación del sistema, sujeto a un grupo de restricciones de igualdad y desigualdad, es decir, límites de generación de energía activa, límites de transmisión de potencia activa, etc [38-39].

El flujo de potencia óptimo es uno de los problemas fundamentales en los análisis de sistemas de potencia. Algunos estudios esenciales en la operación y planificación de sistemas de energía generalmente requieren un gran número de soluciones OPF repetitivas. En estos análisis, la velocidad de convergencia de las soluciones OPF junto con su precisión son dos objetos clave [40].

El objetivo de OPF es encontrar la configuración óptima de una red de sistema de energía determinada que optimice las funciones objetivo del sistema, como el costo total de generación, la pérdida del sistema, la desviación de la tensión del bus, la emisión de unidades generadoras, el número de acciones de control y la reducción de la carga mientras satisfaciendo sus ecuaciones de flujo de potencia, seguridad del sistema y límites de operación del equipo [40-41].

En [39-42] OPF busca la configuración de generación que produce el menor costo de generación para satisfacer una demanda de energía determinada, teniendo en cuenta las limitaciones del sistema y del equipo.

OPF es uno de los problemas conocidos de los sistemas de energía en los cuales se utilizaron muchos métodos numéricos y heurísticos para resolver este problema hasta el momento. Como se observa en estos estudios en la literatura, los métodos heurísticos son más efectivos y más rápidos que los métodos numéricos [43].

De acuerdo con las funciones objetivas y las restricciones, existen diferentes formulaciones matemáticas para el problema OPF [41].

Problema lineal en el que los objetivos y las restricciones se dan en formas lineales con variables de control continuo.

Problema no lineal donde los objetivos o las restricciones o ambos combinados no son lineales con variables de control continuo.

Mixto - problemas lineales enteros cuando las variables de control son discretas y continuas.

Las redes de corriente directa (DC) tienen las siguientes ventajas sobre las redes de corriente alternativa (AC) [22-44].

Algunos dispositivos, por ejemplo, paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas, vehículos eléctricos, aparatos electrónicos y celdas de combustible, se integran más fácilmente con las redes de CC que con las redes de CA. Estos dispositivos son de naturaleza de CC o tienen una frecuencia diferente a la red principal, las microrredes de CC son robustas a las caídas de voltaje y las desviaciones de frecuencia en la red principal. Esto se debe a que los voltajes de CC son fáciles de estabilizar y no hay sincronización de frecuencia para las redes de CC. La eficiencia del sistema puede ser mayor para las redes de CC porque se pueden evitar las pérdidas de conversión de los inversores. Es por esto por lo que los centros de datos modernos utilizan redes DC. El problema del flujo de energía óptimo (OPF) determina las generaciones / demandas de energía que minimizan cierto objetivo, como el costo de generación o la pérdida de energía

En [45], se espera que los programas OPF logren un solución óptima de una función objetivo definida, como el costo de producción, el costo de operación del sistema o las pérdidas del sistema, complementado se deben cumplir todas las restricciones operativas y físicas del sistema de energía.

En [45] varios artículos han intentado alterar las limitaciones de los problemas de OPF o cambiar su función objetivo para mejorar la eficiencia de los problemas de OPF. Aunque en la mayoría de los modelos propuestos se consideran algunas limitaciones del problema de OPF, como los límites de voltaje de las barras y las restricciones de estabilidad y térmica de las líneas de transmisión, hay menos documentos que se han centrado en la maximización de la seguridad del sistema como función objetivo del problema de OPF.

Una amplia variedad de técnicas de optimización ha sido aplicada a la resolución de problemas OPF se pueden clasificar en [46]:

Programación no lineal (PNL), programación cuadrática (PQ), solución basada en Newton de condiciones de optimalidad, programación lineal (PL), versiones híbridas de programación lineal y programación entera. métodos de punto interior.

Debido la estructura física del sistema (topología) de las redes existe: distribuida y descentralizada.

En las redes eléctricas inteligentes, está cada vez más distribuida debido algunas entidades toman la responsabilidad de control de diferentes partes del sistema, aunque estas entidades pueden ser independientes, cualquier decisión tomada por una entidad de control afecta las decisiones tomadas por otras entidades, ya que están interconectadas físicamente a través de líneas de transmisión [42].

Este artículo [42] se analiza los algoritmos distribuidos / descentralizados para la solución de problema del flujo de potencia óptimo (OPF) tales como:

Coordinación de la descomposición, que incluyen la cascada analítica de objetivos (ATC), La descomposición de la condición de optimalidad (OCD), el método de dirección de alternancia de los multiplicadores (ADMM), el principio del problema auxiliar (APP), el consenso más innovaciones (C + I) y el paso de mensaje proximal (PMP).

Debido a la naturaleza de la fuente existe: flujo de potencia óptimo con corriente alterna ACOPF y flujo de potencia óptimo con corriente directa DCOF.

En [47] describe el problema de ACOPF es la representación completa de OPF, debido a su naturaleza no lineal debe resolverse mediante algunos algoritmos iterativos, como Newton-Raphson o Gauss-Sidel.

En consecuencia, ACOPF no solo requieran mucho tiempo para la solución en grandes escalas, sino que

también son prácticamente imposibles de usar en el cuerpo de algoritmos iterativos grandes, como los procesos de planificación [41-47].

En [48] muestra el análisis del ACOPF que se realiza para obtener resultados de flujo de potencia altamente precisos, pero con un costo computacional relativamente alto mientras que el análisis del DCOPF representa un enfoque de análisis relativamente rápido pero simple para calcular valores aproximados de ángulos de bus y flujo de potencia de línea activa utilizando modelos de aproximación lineal de las ecuaciones de flujo de potencia activa de CA.

3.1 Flujo óptimo de potencia DC (DCOPF)

Las ventajas del Flujo de Potencia DC son [41]:

Fiabilidad de la optimización, capacidad para reconocer rápidamente la inviabilidad del problema, de modo que se puedan poner en práctica las estrategias apropiadas, el rango de límites operativos se puede acomodar y manejar fácilmente, incluidas las restricciones de contingencia, la convergencia a la precisión de ingeniería es rápida y también se acepta cuando los cambios en los controles se han vuelto muy pequeños.

Las ecuaciones de DCOPF se pueden aproximar mediante algunas ecuaciones lineales [29-41], [41-47].

Las pérdidas de potencia en las líneas son pequeñas, los voltajes están cerca de sus valores nominales, las diferencias de ángulo de voltaje entre los buses adyacentes son pequeñas.

En [48] DCOPF se derivan de las ecuaciones de CA según cuatro supuestos principales:

Los voltajes del bus son 1 p.u, las resistencias en serie y las admisiones en derivación son despreciables, se ignoran las ecuaciones de flujo de potencia reactiva, y las relaciones de los transformadores son 1 p.u.

DCOPF comenta en [38] que es una herramienta que se usa a menudo para los análisis de contingencia. , debido a su simplicidad y robustez, se ha utilizado en el envío económico en tiempo real y en los análisis técnico-económicos de los sistemas de energía. Es el modelo más aceptable aplicado para llevar a cabo problemas de planificación y operación de sistemas de energía eléctrica, y se usa comúnmente para resolver OPF.

El objetivo es minimizar la suma de los costos de generación de las regiones y las funciones de

penalización sujetas a las restricciones de igualdad local [42].

El DCOPF es similar al despacho económico en su forma. Sin embargo, el despacho económico utiliza formulaciones de dimensión y sofisticación mucho más bajas y algunas variables relevantes, como las magnitudes de voltaje del generador [29].

Como resultado, las restricciones impuestas por consideraciones de seguridad del sistema no se manejan fácilmente mediante procedimientos que utilizan el balance de potencia u otros modelos tradicionales [41-42].

Las ventajas del flujo de carga óptimo no radican tanto en una mayor precisión; más importante es su capacidad para incluir restricciones de seguridad en la formulación [42]. Se pueden definir varios problemas mediante diferentes elecciones de variables de decisión, funciones objetivas y restricciones [29].

En [47] se presenta un nuevo mecanismo para mejorar la precisión del DCOPF convencional, este método modifica la restricción principal de equilibrio de potencia en el problema DCOPF mediante la determinación de algunas acciones nodales de pérdidas de transmisión y la agrega al sistema como nuevas cargas nodales.

Los sistemas de energía eléctrica están sujetos a pérdidas de transmisión debido a la conducción del flujo de energía a través de las sucursales. Sin embargo, la mayoría de los modelos de DCOPF no tienen en cuenta estas pérdidas en las restricciones [33]. Normalmente los consideran en una función objetivo cuadrática o en un enfoque iterativo, donde las pérdidas se calculan después de una solución anterior de flujos en sucursales, luego estas pérdidas se consideran una demanda adicional y el problema se actualiza y se ejecuta un nuevo OPF comenzando una nueva iteración [33].

El modelo (DCOPF) considera explícitamente los flujos, por lo tanto, podemos incluir fácilmente restricciones de capacidad de transmisión, lo que no ocurre con el modelo nodal clásico que tiene voltajes de magnitud y ángulo de fase como variables explícitas, por lo que es necesario algún cálculo para considerar las restricciones relacionadas con el flujo de potencia [33-47].

En [42-49] propone una solución distribuida al problema de DCOPF que considera las generaciones despachables las cargas sensibles y el costo de congestión de la línea donde cada bus en la red eléctrica

está asociado con un controlador local, que es responsable de recopilar información de generación de carga o demanda local, comunicarse con el controlador vecino y actualizar la señal local para el participante local.

En [49] DCOPF se describe que las diferencias de ángulo son suficientemente pequeñas, las magnitudes de voltaje son todas 1 p.u. y la resistencia de la línea de transmisión es despreciable en comparación con la reactancia. Se ha demostrado que este enfoque es lo suficientemente preciso para los cálculos de costos y precios.

En [50] describe el problema de CDOF utilizando el formalismo de puerto hamiltoniano, se ha demostrado que el método de gradiente aplicado al problema de OPF para minimizar las pérdidas en las redes de CC es estable bajo cierta condición en las matrices utilizadas.

Aquí [51] se presenta un algoritmo paso a paso para aplicar el método de relajación de Lagrangian para el problema DCOPF.

El vector multiplicador de Lagrange se inicializa a cero (inicio plano), los subproblemas se formulan y los problemas primarios relajados se resuelven para obtener el minimizador P_{gi} y se obtiene el valor de la función objetivo en el minimizador, los valores de los Multiplicadores de Lagrange se actualizan utilizando el método del subgradiente (descrito en la siguiente sección), y si se cumple la condición de parada, el procedimiento termina. de lo contrario, los subproblemas se resuelven de nuevo en el paso 2.

En [51] se discute la aplicación de la descomposición de Lagrangian Relation (LR) y LR aumentada en el diseño de algoritmos DCOPF descentralizados, aborda un método de optimización distribuida basada en el consenso para tratar el problema DCOPF en una microrred. La descomposición de LR requiere que se compartan los datos relacionados con los flujos de línea de enlace solamente, es decir, las magnitudes de voltaje y los ángulos en los buses de límite.

4. Conclusiones

La Generación Distribuida puede reducir las pérdidas en transmisión y la escasez eléctrica. VPP es una buena solución para participar los generadores de distribución en el mercado eléctrico. Se introduce el concepto de VPP para ayudar a la DG a participar en los mercados. Las estrategias de licitación y la programación son más

importantes en los mercados. Se discuten diferentes modelos para VPP y sus aplicaciones, a partir de la literatura. El algoritmo EMS ayuda al VPP a operar en diferentes modos.

El (OPF) es un problema de optimización ampliamente utilizado en la operación de sistemas de energía y compensación del mercado, intenta encontrar el envío más económico de generadores que satisfagan la demanda y las limitaciones técnicas en el sistema. Con niveles crecientes de incertidumbre debido a una mayor penetración de renovables, el despacho de generación requiere ajustes más grandes y frecuentes en tiempo real para mantener el balance de energía y la viabilidad en todo momento. En la literatura. En este documento se realiza una investigación de las diferentes metodologías para la óptima solución de OPF.

Por lo tanto, el envío óptimo centralizado se puede describir como un problema de la cartera de generación que apunta a la minimización de los costos operativos de VPP.

La asignación óptima (tamaño y ubicación) de VPP en la red del sistema de distribución existente son factores cruciales en la planificación y operación de las redes de distribución activas para mejorar el perfil de voltaje y minimizar la pérdida de energía. Al introducir VPP en el sistema, se puede mejorar el perfil de voltaje porque, puede proporcionar una parte de la potencia a la carga localmente, lo que ayuda a disminuir la corriente a lo largo de una sección de la línea de distribución, lo que, a su vez, dará como resultado un aumento en la magnitud del voltaje en el sitio del cliente. Entre los muchos beneficios de la generación distribuida se encuentra una pérdida de línea reducida, pero dependiendo de las clasificaciones y ubicaciones de las unidades de VPP, es posible que haya un aumento en la pérdida a niveles de penetración muy altos. Además, estos beneficios dependen en gran medida del tipo de VPP.

REFERENCIAS

- [1] P. Del Río and P. Mir-Artigues, "Combinations of support instruments for renewable electricity in Europe: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 40, pp. 287–295, 2014.
- [2] M. A. Salmani, A. Anzalchi, and S. Salmani, "Virtual Power Plant: New Solution for Managing Distributed Generations in Decentralized Power Systems," 2010.
- [3] X. Dominguez, M. Pozo, C. Gallardo, and L. Ortega, "Active power control of a Virtual Power Plant," *2016 IEEE Ecuador Tech. Chapters Meet. ETCM 2016*, no. i, pp. 1–6, 2016.

- [4] F. Alobaid, N. Mertens, R. Starkloff, T. Lanz, C. Heinze, and B. Epple, "Progress in dynamic simulation of thermal power plants," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 59, pp. 79–162, 2017.
- [5] A. Riofrio and D. Carrión, "Approach and deployment of distributed generation. State-of-art based on induction cooker system," *2014 Ieee Andecon*, no. September, pp. 1–1, 2014.
- [6] H. Saboori, M. Mohammadi, and R. Taghe, "Virtual power plant (VPP), definition, concept, components and types," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, 2011.
- [7] C. S. Lin and T. Lin, "Exploring Knowledge Sharing in Virtual Teams : A Social Exchange Theory Perspective," vol. 00, no. C, pp. 1–10, 2006.
- [8] M. Shabanzadeh, M.-K. Sheikh-El-Eslami, and M.-R. Haghifam, "Risk-based medium-term trading strategy for a virtual power plant with first-order stochastic dominance constraints," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 11, no. 2, pp. 520–529, 2017.
- [9] P. Nezamabadi and G. B. Gharehpetian, "Electrical energy management of virtual power plants in distribution networks with renewable energy resources and energy storage systems," *Electr. Power Distrib. Networks (EPDC), 2011 16th Conf.*, pp. 1–5, 2011.
- [10] H. Dagdougui, A. Ouammi, and R. Sacile, "Distributed optimal control of a network of virtual power plants with dynamic price mechanism," *8th Annu. IEEE Int. Syst. Conf. SysCon 2014 - Proc.*, pp. 24–29, 2014.
- [11] F. Heimgaertner and M. Menth, "Distributed Controller Communication in Virtual Power Plants Using Smart Meter Gateways," *2018 IEEE Int. Conf. Eng. Technol. Innov. ICE/ITMC 2018 - Proc.*, pp. 1–6, 2018.
- [12] H. Morais, M. Cardoso, L. Castanheira, Z. Vale, and I. Praga, "A Decision-Support Simulation Tool for Virtual Power Producers," vol. 3512283211.
- [13] S. R. Awasthi, S. Chalise, and R. Tonkoski, "Operation of datacenter as virtual power plant," *2015 IEEE Energy Convers. Congr. Expo. ECCE 2015*, pp. 3422–3429, 2015.
- [14] P. Asmus, "Microgrids, Virtual Power Plants and Our Distributed Energy Future," *Electr. J.*, vol. 23, no. 10, pp. 72–82, 2010.
- [15] S. Rotger-Griful, "Virtual Power Plant for Residential Demand Response," *Comput. Eng.*, no. Aarhus University, p. 28, 2014.
- [16] C. Ross, "Virtual Power Plants," *Electr. Contract. Mag.*, 2011.
- [17] S. Hall and K. Roelich, "Business model innovation in electricity supply markets: The role of complex value in the United Kingdom," *Energy Policy*, vol. 92, pp. 286–298, 2016.
- [18] N. Etherden, V. Vyatkin, and M. H. J. Bollen, "Virtual Power Plant for Grid Services Using IEC 61850," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 12, no. 1, pp. 437–447, 2016.
- [19] S. Singh, A. R. Gautam, and D. Fulwani, "Constant power loads and their effects in DC distributed power systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 72, no. December 2015, pp. 407–421, 2017.
- [20] Z. Ren, W. Yan, C. Ding, J. Yu, and X. Zhao, "Probabilistic optimal power flow analysis of virtual power plant containing photovoltaic generation," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2015–March, no. March, 2014.
- [21] Z. Gao, X. Ai, H. Zhang, and Y. Wang, "Access mode of EVs to grid based on VPP," *IEEE Transp. Electr. Conf. Expo, ITEC Asia-Pacific 2014 - Conf. Proc.*, pp. 1–5, 2014.
- [22] R. Kuntschke, M. Specht, M. Van Amelsvoort, M. Wagler, M. Winter, and R. Witzmann, "Economic optimization in Virtual Power Plants vs. stable grid operation - bridging the gap BT - 20th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2015, September 8, 2015 - September 11, 2015," vol. 2015–Octob, p. IEEE IES; Interdisciplinary Centre for Security, R, 2015.
- [23] Martin Braun, "Virtual Power Plants in Real Applications - Pilot Demonstrations in Spain and England as part of the European project FENIX - Conference papers - VDE Publishing House," no. August, 2009.
- [24] C. R. and G. S. D. Pudjianto, "Virtual power plant and system integration of distributed energy resources," *Nord. Work. Power Ind. Electron.*, no. 1, p. 8, 2004.
- [25] P. Lombardi, M. Powalko, and K. Rudion, "Optimal operation of a virtual power plant," *2009 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet. PES '09*, pp. 1–6, 2009.
- [26] E. Mashhour, "Bidding Strategy of Virtual Power Plant for Participating in Energy and Spinning Reserve Markets — Part I: Problem Formulation," *Power Syst. IEEE Trans.*, vol. 26, no. 2, pp. 949–956, 2010.
- [27] H. Nezamabadi and M. Setayesh Nazar, "Arbitrage strategy of virtual power plants in energy, spinning reserve and reactive power markets," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 3, pp. 750–763, 2016.
- [28] A. Koch, J. Gall, and C. Rehtanz, "Holistic Day-Ahead Scheduling Approach for inhomogeneous Pools considering common German Compensation and Cost Structures," *2018 7th Int. Energy Sustain. Conf. IESC 2018*, pp. 1–9, 2018.
- [29] X. Wang, X. Wang, and M. Xie, *OPTIMIZATION POWER SYSTEM LARGE-SCALE COMPLEX with contributions from. .*
- [30] Y. Wang, X. Ai, Z. Tan, L. Yan, and S. Liu, "Interactive dispatch modes and bidding strategy of multiple virtual power plants based on demand response and game theory," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 7, no. 1, pp. 510–519, 2016.
- [31] C. Huang, D. Yue, J. Xie, Y. Li, and K. Wang, "Economic dispatch of power systems with virtual power plant based interval optimization method," *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 2, no. 1, pp. 74–80, 2016.
- [32] X. Li, S. Yamashiro, L. Wu, J. Li, and M. Ouyang, "Optimization of DC power flow by transmission loss allocation method," *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, no. 9, pp. 0–5, 2009.

- [33] C. H. Fujisawa, M. F. Carvalho, A. T. Azevedo, S. Soares, E. P. Santos, and T. Ohishi, "Optimal power flow models using network flow method," *Proc. 2012 6th IEEE/PES Transm. Distrib. Lat. Am. Conf. Expo. T D-LA 2012*, pp. 1–7, 2012.
- [34] M. Powalko, P. Komarnicki, K. Rudion, and Z. A. Styczynski, "Enhancing virtual power plant observability with PMUs," *2010 5th Int. Conf. Crit. Infrastructure, Cris 2010 - Proc.*, pp. 1–6, 2010.
- [35] A. G. Zamani, A. Zakariazadeh, and S. Jadid, "Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant," *Appl. Energy*, vol. 169, pp. 324–340, 2016.
- [36] M. Lv, S. Lou, B. Liu, Z. Fan, and Z. Wu, "Review on power generation and bidding optimization of virtual power plant," *Proc. - 2017 Int. Conf. Electr. Eng. Informatics Adv. Knowledge, Res. Technol. Humanit. ICELTICs 2017*, vol. 2018–Janua, no. ICELTICs, pp. 66–71, 2018.
- [37] T. Olejniczak, "Distributed Generation and Virtual Power Plants: Barriers and Solutions Energy and Resources," *Thesis, Master Dev. Sustain.*, no. 0357022, 2011.
- [38] J. M. P. Contreras, "Comparative Study of Optimal Power Flow Solution using DC and Generalized Generation Distribution Factor Formulations," *2018 IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Exhib. - Lat. Am.*, no. 1, pp. 1–5, 2018.
- [39] M. N. Goldstein and R. Hiramoto, "Optimal Power Flow by Enhanced Genetic Algorithm," *J. Natl. Cancer Inst.*, vol. 27, no. 3, pp. 487–501, 1961.
- [40] M. Peikherfeh, H. Seifi, and M. K. Sheikh-El-Eslami, "Optimal dispatch of distributed energy resources included in a virtual power plant for participating in a day-ahead market," *3rd Int. Conf. Clean Electr. Power Renew. Energy Resour. Impact, ICCEP 2011*, pp. 204–210, 2011.
- [41] J. Zhu, *OPTIMIZATION OF POWER SYSTEM OPERATION*.
- [42] A. Kargarian *et al.*, "Toward Distributed/Decentralized DC Optimal Power Flow Implementation in Future Electric Power Systems," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 2574–2594, 2018.
- [43] U. Kil, "Solution of Ac-Dc Systems Using Genetic Algorithm," no. I, pp. 2–7, 2013.
- [44] L. Gan and S. H. Low, "Optimal power flow in direct current networks," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2892–2904, 2014.
- [45] M. Tourandaz Kenari and S. Jadid, "Optimal power flow considering system security using loading factor," *2010 9th Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2010*, pp. 234–237, 2010.
- [46] J. A. Momoh, M. E. El-Hawary, and R. Adapa, "A review of selected optimal power literature to 1993. Part planning in large scale power systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 668–676, 1999.
- [47] M. R. Baghayipour and A. A. Foroud, "Modification of DC optimal power flow, based on nodal approximation of transmission losses," *Iran. J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 76–90, 2012.
- [48] C. Zhang, H. Chen, M. Guo, X. Wang, Y. Liu, and D. Hua, "DC power flow analysis incorporating interval input data and network parameters through the optimizing-scenarios method," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 96, no. 381, pp. 380–389, 2018.
- [49] Y. Xu, H. Sun, H. Liu, and Q. Fu, "Distributed solution to DC optimal power flow with congestion management," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 95, pp. 73–82, 2018.
- [50] J. Lee, J. Guo, J. K. Choi, and M. Zukerman, "Distributed energy trading in microgrids: A game-theoretic model and its equilibrium analysis," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 6, pp. 3524–3533, 2015.
- [51] M. Hadi Amini *et al.*, *Decomposition Methods for Distributed Optimal Power Flow: Panorama and Case Studies of the DC Model*. Elsevier Inc., 2018.
- [52] A. Soroudi, *Power System Optimization Modeling in GAMS*. 2017.
- [53] R. T. Bhimarasetti and A. Kumar, "Distributed generation in Unbalanced Mesh Distribution System with different unbalances," *Proc. 6th IEEE Power India Int. Conf. PIICON 2014*, pp. 4–9, 2014.
- [54] G. N. S, D. K. Khatod, and M. P. Sharma, "009-CoimbatoreConferences-P2012.pdf," vol. 28, pp. 42–46, 2012.

Determinación de un índice de riesgo y vulnerabilidad en poblaciones costeras: estudio de caso Portobelo, provincia de Colón

Determination of a Risk and Vulnerability Index in Coastal Populations: Case Study Portobelo, Province of Colón

Ariel Antonio Grey G.^{1*}, Alides Canto¹, Yarisel González¹, Kelsyn Barria¹, Itzel Castillo¹

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: ariel.grey@utp.ac.pa

RESUMEN— El impacto ocasionado por las actividades humanas convierte a las zonas costeras en áreas vulnerables. Es por esto por lo que surge la necesidad de desarrollar un índice de riesgo y vulnerabilidad. El objetivo de la investigación es lograr determinar un índice de riesgo y vulnerabilidad a partir de la calidad fisicoquímica y microbiológico de las aguas superficiales marino-costeras y factores socioeconómicos utilizando como caso de estudio la ciudad costera de Portobelo, provincia de Colón. La metodología se dividió en 3 partes: determinación de un índice de calidad de agua marina costero, el análisis de amenazas y vulnerabilidades y la presentación del índice de riesgo y vulnerabilidad. Como resultado se obtuvo que el Índice de calidad de agua marina fue representada por 71.71, una calidad buena a regular. Se determinó las vulnerabilidades, física con un valor de 2.0, moderado a bajo; educativas de 2.7, bajo a moderado; socioeconómicas de 3.6, moderado a alto; y ambientales de 3.7, moderada a alta. Se obtuvo un índice de Riesgo y Vulnerabilidad de 3.0, considerado moderado. El índice de Riesgo y Vulnerabilidad representa una herramienta que puede ser considerada para determinar un valor que defina el grado de riesgo, amenaza y vulnerabilidad, que está expuesta una comunidad costera y poder implementar medidas de mitigación y concientización a la población para evitar que las amenazas sean de un impacto mayor, provocando desastres mayores y evitando la contaminación de los recursos.

Palabras clave— Índice de Riesgo y Vulnerabilidad, Factores Socioeconómicos, Índice de Calidad del Agua.

ABSTRACT— The impact caused by human activities makes coastal areas vulnerable areas. This is why the need arises to develop a risk and vulnerability index. The objective of the research is to determine a risk and vulnerability index based on the physicochemical and microbiological quality of the marine-coastal surface waters and socio-economic factors using the coastal city of Portobelo, province of Colón as a case study. The methodology was divided into 3 parts: determination of a coastal marine water quality index, the analysis of threats and vulnerabilities and the presentation of the risk and vulnerability index. As a result, it was obtained that the Marine Water Quality Index was represented by 71.71, a good quality to regulate. Vulnerabilities were determined, physical with a value of 2.0, moderate to low; 2.7, low to moderate educational; socioeconomic from 3.6, moderate to high; and environmental of 3.7, moderate to high. A Risk and Vulnerability index of 3.0 was obtained, considered moderate. The Risk and Vulnerability Index represents a tool that can be considered to determine a value that defines the degree of risk, threat and vulnerability that a coastal community is exposed to and can implement mitigation and awareness measures to the population to prevent threats are of a greater impact, causing major disasters and avoiding the contamination of resources.

Keywords— Risk and Vulnerability Index, Socioeconomic Factors, Water Quality Index.

1. Introducción

En las zonas costeras se ha evidenciado la latente amenaza por contaminantes de diferentes fuentes terrestres, que llegan a ella no sólo a través de fuentes naturales como ríos y quebradas sino a través de las

conexiones de tuberías urbanas que depositan allí sus aguas residuales [1].

El impacto ocasionado por las actividades humanas convierte a las zonas costeras en áreas vulnerables para la población. Es por esto, por lo que surge la necesidad

Citación: A. Grey, A. Canto, Y. González, K. Barria y I. Castillo, "Determinación de un índice de riesgo y vulnerabilidad en poblaciones costeras: estudio de caso Portobelo, provincia de Colón", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 12 de septiembre de 2019. **Recibido con correcciones:** 20 de septiembre de 2019 **Aceptado:** 7 julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 A. Grey, A. Canto, Y. González, K. Barria y I. Castillo. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

de desarrollar un índice de riesgo y vulnerabilidad de las zonas costeras ante la contaminación marina, debido a que estas áreas exigen un manejo adecuado que asegure su conservación, desarrollo sostenible y preservación de los valores culturales de las comunidades tradicionalmente allí asentadas [2].

En Panamá, la contaminación de las aguas marinas puede ser observada con facilidad y con mayor énfasis en la vertiente pacífica, ya que es justo ahí donde se concentra la mayor cantidad de zonas pobladas o urbanas del país, en contraste con la vertiente Atlántica, donde existen pocas áreas pobladas, centrándose ésta en el área costera de Colón y Bocas del Toro [3].

La confluencia de las actividades humanas, sumada la falta de planificación y control y la inadecuada disposición de los residuos sólidos y domésticos, vertimientos provenientes de fuentes puntuales y difusas que llegan a través escorrentías fluviales o urbanas [4-6], convierten a las zonas costeras en áreas frágiles y limitadas porque pueden cambiar las características de la calidad del agua, con efectos potenciales sobre las población humana y los ecosistemas marino-costeros [5] incrementando la vulnerabilidad y disminuyendo la capacidad de adaptación [4-7].

Las costas panameñas se han transformado a lo largo de los años gracias al aumento del turismo, el aumento de la población no planificado y la afectación a los recursos naturales, a esto se adjudica el ascenso del nivel del mar debido al calentamiento global con el deshielo de los cascos polares que pueden incrementar significativamente el nivel mundial y con ello afectar costas de todo mundo incluyendo las nuestras de manera significativa.

Teniendo en cuenta lo antes expuesto, surge la necesidad de desarrollar un índice de riesgo y vulnerabilidad de las zonas costeras ante la contaminación marina, debido a que estas áreas exigen un manejo adecuado que asegure su conservación, desarrollo sostenible y preservación de los valores culturales de las comunidades tradicionalmente allí asentadas [2].

El objetivo es lograr determinar un índice de riesgo y vulnerabilidad a partir de la calidad de las aguas superficiales marino-costeras y factores socioeconómicos aplicado a zonas costeras utilizando el área de estudio, la ciudad de Portobelo, provincia de Colón. Se analizó el riesgo y la vulnerabilidad usando la amenaza por contaminación físico-química, inundaciones

y deslizamientos de tierra en la zona costera de la ciudad de Portobelo. También, se evaluó aspectos socioeconómicos, aspectos físicos, educativos que permitan explorar los efectos producidos por el deterioro ambiental en los habitantes del área de estudio.

2. Materiales y Métodos

La metodología empleada en el proyecto se dividió en 3 fases: la determinación de un Índice de Calidad de Agua, el análisis de las amenazas y vulnerabilidades de la comunidad y por último la determinación de un índice de riesgo y vulnerabilidad para la zona costera de la ciudad de Portobelo.

La calidad de agua se mide de acuerdo con distintos parámetros (físicos, químicos y microbiológicos) mediante los cuales se cuantifica el grado de alteración de las cualidades naturales y se le clasifica para un uso determinado como lo es el consumo, la agricultura, pesca, natación o agua que se utiliza en la industria [8].

Los indicadores ICA básicamente son una expresión de un número de parámetros que permiten valorar el recurso hídrico para un determinado uso [9]. Se aplicará el método de Promedio Aritmético Ponderado (ecuación #1), en donde se tomará en cuenta los pesos relativos asignados a cada variable, que son: pH 0.12; Fosfato 0.10; Nitrato 0.10; OD 0.17; Turbiedad 0.08; Temperatura 0.10; DBO₅ 0.10; Coliformes Totales 0.11 [10].

$$ICA = \sum_{i=1}^9 Sub_i \times W_i \quad (1)$$

En la ecuación (1), Sub_i es el subíndice del parámetro y W_i es el peso relativo.

Según Guillén et al., el ICA indica el grado de contaminación del agua a la fecha del muestreo y esta expresado como porcentaje del agua pura; así, agua altamente contaminada tendrá un valor cercano o igual a cero (0), en tanto que el agua en excelentes condiciones tendrá un valor de este índice cercano al cien (100) [8], [11].

Tabla 1. Escala de Valores del ICA

Categoría	Rango numérico
Pésima	0 – 25
Mala	26 – 50
Regular	51 – 70
Buena	71 – 90

Excelente	91 – 100
-----------	----------

Fuente: [12].

La metodología para el análisis de amenazas y vulnerabilidad que fue empleada se dividió en dos fases, la primera consiste en poder recopilar toda la información relevante de la zona de estudio por medio de revisión bibliográfica y a través de técnica de encuestas.

La segunda fase se identificó y evaluó de las amenazas y vulnerabilidades presentes en la comunidad. Para ello se elaboró una metodología llamada “matriz para el análisis de amenazas y vulnerabilidades”, la cual tiene como objetivo evaluar de manera rápida las vulnerabilidades antes las amenazas que se presentan en la comunidad.

Las amenazas evaluadas serán de tipo socio-naturales (inundaciones o deslizamientos de tierras) y de tipo antropogénicas (Contaminación del agua).

Para evaluar las amenazas de tipo socio natural se aplicaron encuestas realizadas a la comunidad, para obtener el porcentaje de viviendas que fueron afectadas por alguno de estos fenómenos. Para un porcentaje mayor de 90% de la población afectada por estos fenómenos el grado de amenaza muy alto con un puntaje de 5 y para un porcentaje menor de 10% el grado de amenaza será muy bajo con un puntaje de 1.

Para las amenazas de tipo antropogénicas se analizó el ICA obtenido, para ello se aplicará la siguiente ponderación:

Tabla 2. Grado de Amenaza para el Índice de Calidad de Agua

Rango numérico en el ICA	Grado de amenaza	Puntaje
0 – 25	Muy alto	5
26 – 50	Alto	4
51 – 70	Moderado	3
71 – 90	Bajo	2
91 – 100	Muy bajo	1

El Índice de amenaza total se calcula el valor promedio de las diferentes amenazas analizadas, aplicando la siguiente ecuación:

$$IA = \frac{AA + ASN}{2} \quad (2)$$

En la ecuación (2), IA es índice de Amenazas, AA Amenazas antropogénicas, ASN Amenazas Socio naturales.

Para la evaluación de los diferentes tipos de vulnerabilidades (físicas, socioeconómicas, educativas y ambientales) se determinó algunas variables e indicadores. Para ello se tomó en cuenta los resultados de las encuestas aplicada a la población. Dependiendo de las variables evaluadas se aplicó rangos de porcentaje para cada indicador y poder obtener un puntaje para determinar el grado de vulnerabilidad.

Para cada tipo de vulnerabilidad se consideró aquellos indicadores que permitan poder evaluar efectivamente la vulnerabilidad antes las distintas amenazas que enfrenta la comunidad.

Para las vulnerabilidades físicas tiene que ver con la ubicación física de los asentamientos y con la calidad de las condiciones de las viviendas [13], se evaluó el tipo de material utilizado en las viviendas y la cantidad de habitantes en la comunidad.

Vulnerabilidades socioeconómicas evalúan las condiciones de vida generales de una comunidad, se analizó los factores en donde se determina la población desempleada, el rango salarial, si la población cuenta con casa propia y si cuentan con servicios básicos como sistemas de acueducto, electricidad, internet, teléfono y radio.

Vulnerabilidades ambientales son aquéllos que se relacionan con la manera cómo una comunidad determinada "explota" los elementos de su entorno debilitándose a sí misma y debilitando a los ecosistemas [13]. Se evaluaron variables como: si la comunidad cuenta con sistema de alcantarillado y un tratamiento de agua residuales y la eliminación de los desechos sólidos que fácilmente pueden indicar un deterioro en el ecosistema afectando de manera indirecta a la población.

Vulnerabilidad educativa, bien se dice que si la población esta lo adecuadamente educado o que tenga conocimiento sobre los peligros potenciales que pueden enfrentar en sus comunidades y de poder prevenirlos se puede bajar de una manera significativa el grado de vulnerabilidad en la población, para ellos se evaluó el nivel de estudio de los pobladores, si tienen conocimiento sobre medidas preventivas ante amenazas por inundaciones y deslizamientos y también se estudiara el conocimiento sobre el cambio climático.

Para obtener el valor del índice de vulnerabilidad total se calcula el valor promedio de las diferentes vulnerabilidades analizadas, aplicando la siguiente ecuación:

$$IV = \frac{VS + VF + VA + VE}{4} \quad (3)$$

En la ecuación (3), IV es índice de vulnerabilidad, VF vulnerabilidad física, VA vulnerabilidad Ambiental y VE Vulnerabilidad educativa.

En la matriz se busca evaluar e identificar aquellas variables e indicadores que están detrás de las amenazas y vulnerabilidades, en donde se clasificaran en vulnerabilidades o amenazas de tipo muy bajas hasta muy altas dándole un puntaje de 1 a 5. Cada clase de vulnerabilidad o amenaza se refleja con un color de alerta.

Tabla 3. Grado de Amenazas y Vulnerabilidades

Grado	Puntaje
Muy Bajo	1
Bajo	2
Moderado	3
Alto	4
Muy alta	5

El Índice de riesgo y vulnerabilidad se obtendrá a partir de la evaluación de los factores socioeconómicos y el índice la calidad de agua marina en la zona de estudio ubicada en la zona costera de la ciudad de Portobelo, Provincia de Colón y por último se aplicó la ecuación (4) y para determinar el grado de riesgo se utilizó la tabla 4.

$$IRV = \frac{a \times b}{2} \quad (4)$$

En la ecuación (4), IRV es el índice de riesgo y vulnerabilidad, “a” es el valor de amenaza total y “b” es el valor de vulnerabilidad total.

Tabla 4. Ponderación para el grado de riesgo

Ponderación	Grado de riesgo
< 1.5	Muy Bajo
1.6 – 2.5	Bajo
2.6 – 3.5	Moderado
3.6 – 4.5	Alto
> 4.6	Muy alta

3. Resultados y discusión

Se realizaron 5 muestreos en Portobelo desde julio 2017 hasta marzo 2019. Los resultados presentados se muestran por estaciones que corresponden al promedio de los 5 muestreos. Los parámetros que fueron evaluados

son: Potencial de Hidrogeno (pH), Fosfato (PO₄), Nitratos (NO₃), Oxígeno Disuelto (O.D.), Demanda Bioquímica de Oxígeno (BDO₅), Turbiedad (Turb.), Coliformes Totales (C.T), Temperatura (Temp.), Sólidos Totales (S.T.).

Para la evaluar el índice se determinó el valor del subíndice del ICA para cada parámetro por estación, en la tabla 5, se resumen los resultados obtenidos. Con respecto a los sólidos disueltos totales se asumió el valor mínimo que se puede registrar en los subíndices, cuyo valor es de 29 que corresponde a valores de sólidos disueltos totales mayores a 500mg/L.

Los indicadores de contaminación fecal más utilizados en los diferentes países son los Coliformes totales (CT) y los Coliformes fecales (CF). Sin embargo, numerosos estudios revelan que no existe relación significativa entre estos indicadores, sus cuantificaciones y las enfermedades relacionadas con el baño en agua de mar [14].

Algunos autores, [15], observaron que los Coliformes fecales y los Enterococos son los indicadores más apropiados para determinar la presencia de contaminación de origen fecal en el cuerpo de agua. Fujioka et al. [16], sostienen que E. coli y Enterococos son ubicuos y pueden persistir por largos periodos de tiempo en agua y suelos tropicales y subtropicales.

En el ecosistema marino los vibrios juegan funciones importantes como biodegradación de la materia orgánica y regeneración de nutrientes [17], además pueden actuar como patógenos de organismos acuáticos de importancia comercial, o bien afectar al hombre [18].

Es importante estudiar a los vibrios que actúan de forma deletérea sobre organismos de importancia comercial, debido a las consecuencias económicas que este produce y descubrir los factores que ocasionan este accionar es aún una tarea pendiente.

Por estas razones, hemos incluidos estos elementos como factores claves en la determinación de la vulnerabilidad de la población en la ciudad de Portobelo.

En el caso de la presencia de *Vibrio* fue determinado en la Bahía de Portobelo y se encontró en el agua de mar dos tipos: *Vibrio Cholerae* y *Vibrio Parahaemolyticus*.

Tabla 5. Valores Promedios para cada estación de muestreo obtenidos en el periodo de 2017 – 2019 en Portobelo.

Parámetros	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
pH	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.5	7.6	7.5	7.6
PO ₄ (mg/l)	0.0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0

S.T. (mg/l)	2.8 3E 4	3.2 8E 4	3.0 0E 4	2.98 E4	2.6 9E 4	2.7 1E 4	2.9 6E 4	2.8 7E4	2.6 9E4
NO ₃ (mg/l)	1.3	1.5	1.3	1.2	1.4	1.2	0.9	1.1	0.9
O.D. (mg/l)	6.1	6.0	6.1	6.1	5.8	5.8	5.8	6.1	6.2
Turb. (UTM)	19. 7	31. 8	37. 4	24.6	25. 2	18. 6	34. 7	30. 2	24. 7
Temp. (°C)	25. 58	25. 75	25. 75	25.7 5	25. 75	25. 92	25. 92	25. 92	25. 92
DBO ₅ (mg/l)	0.4	0.7	1.1	0.9	0.8	0.7	1.4	0.5	0.8
C. T. (UFC)	1.1 5E 4	2.0 9E 4	7.1 4E 3	4.02 E4	5.1 1E 4	5.3 4E 4	3.8 2E 4	3.8 8E4	3.4 0E4

Luego de obtener el subíndice de cada parámetro, según la ecuación (1), estos valores se deben multiplicar por el peso relativo correspondiente a cada parámetro, para luego realizar la sumatoria y así obtener el Índice de Calidad de Agua. Los resultados se resumen la tabla 6.

Tabla 6. Subíndice de cada parámetro por estación de muestreo

Parámetros	Estaciones								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
pH	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5	87.5
Fosfato	98	95	95	96	96	96	97	99	99
Nitrato	93.3	91.7	93.3	93.8	92.1	93.8	95.0	94.2	95.0
Oxígeno Disuelto	61.3	60.0	61.3	61.3	56.3	56.3	56.3	61.3	62.5
DBO ₅	96.5	92.2	90.0	90.9	92.2	92.2	85.2	95.2	92.2
Turbiedad	62.5	50.8	45	57.5	56.7	64.2	47.5	51.7	57.5
Coliformes Totales	50	45.2	53.6	39	37	36.4	40	40	40.9
Temperatura	76.7	80.0	80.0	80.0	80.0	81.1	81.1	81.1	81.1
Sólidos Disueltos	29	29	29	29	29	29	29	29	29

El promedio del índice de calidad de agua de todas las estaciones corresponde a 71.71 el cual se encuentran en una calidad de agua buena que corresponde al intervalo entre 71 – 90. La mejor condicione de calidad del agua se presentó a la estación uno (1) con un índice de 74 y la menor calidad se presenta en la estación siete (7) con un índice de 69 de calidad.

Tabla 7. Resultados del índice de calidad de agua para cada muestreo

Parámetros	Estaciones								
	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
pH	11. 4	11. 4	11. 4	11. 4	11. 4	11. 4	11. 4	11. 4	11. 4
Fosfato	7.8	7.6	7.6	7.7	7.7	7.7	7.8	7.9	7.9
Nitrato	9.3	9.2	9.3	9.4	9.2	9.4	9.5	9.4	9.5

Oxígeno Disuelto	10. 4	10. 2	10. 4	10. 4	9.6	9.6	9.6	10. 4	10. 6
DBO ₅	13. 5	12. 9	12. 6	12. 7	12. 9	12. 9	11. 9	13. 3	12. 9
Turbiedad	6.3	5.1	4.5	5.8	5.7	6.4	4.8	5.2	5.8
Coliformes Totales	5.5	5.0	5.9	4.3	4.1	4.0	4.4	4.4	4.5
Temperatura	7.7	8.0	8.0	8.0	8.0	8.1	8.1	8.1	8.1
Sólidos Disueltos	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Σ	74	71	72	72	71	71	69	72	73

Para conocer un poco sobre las amenazas y vulnerabilidad que enfrenta la comunidad se realizaron encuestas a los pobladores de la ciudad de Portobelo, dicha encuesta fue realizada en marzo 2019 a un total de 74 viviendas.

Para las amenazas socio naturales, las encuestas revelaron que el 69% de la población ha sufrido de inundaciones y deslizamientos de tierra, lo que se clasifica como un grado de amenaza alta con un puntaje de 4; para las amenazas antropogénicas se analizó el ICA, en donde se obtuvo como resultado 71.71 lo que indica una calidad de agua buena a regular y se clasifica como un grado de amenaza de moderado a bajo.

Para definir la amenaza total presente en la comunidad de Portobelo se calculó el promedio de los indicadores evaluados, en donde se obtiene que la amenaza total es de 2.

Para las vulnerabilidades físicas los indicadores que se evaluaron fueron: el tipo de material de las viviendas y la densidad de población de la zona de estudio. Las encuestas revelaron que el 100% de la población encuestadas habitan en viviendas adecuadas, lo que indica un grado de vulnerabilidad bajo con un puntaje de 1. Con respecto a la densidad se obtuvo que el número de personas por viviendas es de aproximadamente 4 y para un total de 74 viviendas encuestadas da como resultado una densidad de 181 personas, lo que entre en un grado de vulnerabilidad moderado con un puntaje de 3.

Para las vulnerabilidades socioeconómicas se obtuvo que el 50% de los habitantes están desempleados lo que genera un grado de vulnerabilidad moderado. Otro indicador evaluado es el rango de salario en donde el 46% de la población encuestada recibe un salario menor de 500.00\$, lo que indica un grado de vulnerabilidad moderado. También se evaluó la población que no cuenta con casa propia, que en total es un 12% del total, lo que indica un grado de vulnerabilidad bajo. Toda comunidad debe brindar los servicios básicos necesarios a sus

habitantes como lo es el sistema de acueducto, según la encuesta realizada el 100% de la población no cuenta con el servicio de agua potable, lo que da como resultado un grado de vulnerabilidad muy alta. Otros de los servicios básicos que debe tener una comunidad es Energía eléctrica, todas las viviendas encuestadas cuentan con energía eléctrica lo que se clasifica como un grado de vulnerabilidad muy bajo. También se evaluó si la población cuenta con servicios de internet, radio y teléfono, en donde ambos se encuentran en un grado de vulnerabilidad bajo.

Para las vulnerabilidades ambientales se evaluaron indicadores que permiten saber si la comunidad de Portobelo genera impactos negativos en el ambiente.

Uno de estos indicadores estudiados fue la el contar con un sistema de alcantarillado, en donde el 40% de las viviendas encuestadas cuentan con una red de desagüe lo que dan un grado de vulnerabilidad moderado. Otro indicador es si cuenta con un tratamiento de aguas residuales ya que es un factor importante para reducir los impactos al ecosistema, sin embargo, Portobelo no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales lo que es un grado de vulnerabilidad muy alto. Otro factor de influencia en el ambiente es la frecuencia con que se eliminan los desechos sólidos, en donde el 13% de la población encuestada indico que la recolección se realiza una vez por semana, esto genera un grado de vulnerabilidad bajo. Sin embargo, no concuerda con lo observado, la gran perturbación con presencia de desechos en el mar, quebradas, zonas de manglares y zanjas.

La vulnerabilidad educativa, indica si la población esta adecuadamente preparada para cualquier tipo de amenazas, para esto se evaluó indicador como si la población cuenta con estudios académico, en donde el 19% de los encuestados no poseen estudios lo que indica un grado de vulnerabilidad bajo. Sin embargo, el 58% llegaron hasta primaria o secundaria. Lo que hace a la población más vulnerable. Otro factor de importancia es si la ciudadanía conoce sobre las medidas preventivas ante amenazas como inundaciones y deslizamiento de tierra y que estos son fenómenos que se agravan debido a las actividades humanas, en los últimos años el cambio climático tiene gran influencia sobre estos fenómenos lo que provoca que las comunidades se vean cada vez más afectadas; según las encuestas realizadas el 81% de las personas no conocen medidas preventivas antes

inundaciones y deslizamientos lo que genera un grado de vulnerabilidad alto, con respecto al conocimiento del cambio climático el 58% de los encuestados no conocen sobre el tema, lo que genera un grado de vulnerabilidad moderado.

Adicional a estos elementos analizados, otro factor de impacto, las viviendas se encuentran muy cerca del manglar lo que se considera un grado de amenaza muy alto.

Presenta un grado de amenaza alto ya que el 84% de la población utiliza el agua para beber, y como ya mencionamos anteriormente, Portobelo no cuenta con agua potable, lo que se considera una ponderación de 4.

Tabla 8. Resultados de Vulnerabilidades

Vulnerabilidad	Indicador	Resultado	Puntaje
Física	Porcentaje de las viviendas con material inadecuado	0%	1
	Habitantes en Ciudad de Portobelo área de estudio	181	3
Socioeconómica	Porcentaje de la población desempleada	52%	3
	Porcentaje de la población que gana menos de 500.00 \$	46%	3
	Porcentaje de población sin casa propia	12%	1
	Porcentaje de viviendas que no cuentan con sistemas de acueducto	100%	5
	Porcentaje de viviendas que no cuentan con energía eléctrica	0%	1
	Porcentaje de viviendas sin Internet	64%	3
	Porcentaje de viviendas sin teléfonos	64%	3
	Porcentaje de viviendas sin radio	25%	2
Ambiental	Porcentaje de viviendas sin sistema de alcantarillado	100%	5
	No cuenta con sistema de tratamiento de aguas residuales	100%	5
	Porcentaje de viviendas sin sistemas de recolección de los desechos	13%	1
Educativa	Porcentaje de la población que no poseen estudios	19%	2
	Porcentaje de población que no conocen medidas preventivas	81%	4
	Porcentaje que no conocen sobre el cambio climático	58%	3

Con los indicadores ya evaluados para los distintos tipos de vulnerabilidades se puede obtener que las vulnerabilidades física en la ciudad de Portobelo es de 2.0 lo que se clasifica como un grado de vulnerabilidad moderado a bajo, las vulnerabilidades socioeconómicas es de 3.6 con un grado de vulnerabilidad moderada a alta, para las vulnerabilidades ambientales da como resultado 3.7 con un grado de vulnerabilidad moderado a alto, y con respecto a las vulnerabilidades educativas da como resultado 2.7 lo que es un grado de vulnerabilidad bajo moderado.

Con los resultados obtenidos en los cálculos de amenaza y vulnerabilidad en la ciudad de Portobelo, y aplicando la ecuación (4) se obtiene que el IRV es de 3.0, lo que se clasifica en un grado moderado, a pesar de que presento grados de vulnerabilidades muy alto estos factores no tienen un impacto sobre el resultado final, pero aun así se debe prestar atención a los factores en donde se presentaron puntajes muy alto de alerta. Tales factores los podemos resumir, la contaminación de los manglares por desechos, las descargas de aguas residuales directo al mar, la ausencia de un sistema de potabilización del agua y el turismo informal no sostenible. Se debe implementar medidas de mitigación y concientización de la población para evitar que las amenazas sea de un impacto mayor provocando desastres.

4. Conclusiones y recomendaciones

El Objetivo de la investigación era lograr determinar un índice de riesgo y vulnerabilidad en función al análisis de la calidad de las aguas superficiales marino-costeras a partir de evaluaciones de factores socioeconómicos en Portobelo, provincia de Colon. Se logra comprobar que, a través de estos factores, se pudo determinar el índice de riesgo y vulnerabilidad, aplicado a poblaciones costeras.

El aporte principal de este trabajo consiste en el diseño de una metodología clara y fácil de usar para poder determinar de un Índice de Riesgo y vulnerabilidad a partir de análisis de la calidad de agua y factores socioeconómicos.

La comunidad de Portobelo presenta una amenaza alta para Inundaciones, deslizamiento de tierra y contaminación del agua en la zona costera de la ciudad.

En cuanto a las vulnerabilidades se presentó un grado de vulnerabilidad moderada a alta, un resultado alarmante, donde las vulnerabilidades socioeconómicas y

ambientales presentaron resultados preocupantes debido a su alto potencial turística y alto valor histórico, por lo que se considera que se le deben prestar suma atención a diversas condiciones; no cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, lo que afecta a la zona costera debido a que todos las aguas residuales son descargas directamente al mar, afectando al ecosistema marino y de una manera indirecta al ser humano.

Fundamental, es la construcción de una planta de tratamiento de aguas residuales, la conexión de las casas a un sistema de alcantarillado y la urgente necesidad de un sistema de potabilización del agua para consumo humano. Un manejo eficiente de los desechos sólidos, para evitar la presión ambiental sobre los manglares adyacente a la zona costera. En cuanto a la calidad del agua, esta presenta una alta condición, lo cual debería existir una prohibición para el uso de la zona costera, para actividades de contacto directo, pesca y consumo de especies de la zona, por los altos niveles de Coliformes, enterococos y vibrio presente en el cuerpo de agua.

Se recomienda seguir haciendo este tipo de estudios en las diversas zonas costeras del país, para poder así presentar datos de riesgos que ayuden a las comunidades a disminuir sus vulnerabilidades y así poder prepararse ante cualquier tipo de amenazas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Servicio Aéreo Naval de Panamá, Autoridad Portuaria de Panamá, al Laboratorio de Ingeniería Sanitaria de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Tecnológica de Panamá, por su valiosa colaboración y participación en las diversas campañas de muestreos y análisis de muestras de algunos parámetros ambientales y a la Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) por el financiamiento para realizar esta investigación, a través del Proyecto FID-16-011.

REFERENCIAS

- [1] INVEMAR, 2014. Vulnerabilidad de la población costera frente a la contaminación orgánica y microbiológica en la bahía de buenaventura.
- [2] Grey, A. (2007). "Estudio Comparativo de la Calidad de las Aguas Costera Durante el Periodo Seco y Lluvioso en la Bahía de Manzanillo de la Ciudad de Colón". Tesis de Maestría.
- [3] D'Croz, L., Martines, V. y Arosemena, G. (1994). "Inventario Biológico del Canal de Panamá. El Estudio

- Marino". SCIENTIA. Revista de Investigación de la Universidad de Panamá.
- [4] Alonso, David; Sierra, Paula; Fontalvo, Martha & Arias, Francisco. (2003). "Conceptos y Guía Metodológica para el Manejo Integrado de Zonas Costeras en Colombia, manual 1: Preparación, caracterización y diagnóstico". INVEMAR. Serie documentos Generales No. 12. 94 p. Santa Marta.
- [5] Garay, J. y A. Vélez. (2004). "Programa Nacional de Investigación, Evaluación, Prevención, Reducción y Control de Fuentes Terrestres y Marinas de Contaminación al Mar-PNICM". Santa Marta: Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés"-INVEMAR. Santa Marta. 134 p.
- [6] Tejada, C., Castro, L., Navarrete, A., Cardona, T., Otero, L., Afanador, F., y otros (2003). "Panorama de la Contaminación Marina del Pacífico Colombiano". San Andrés de Tumaco: Centro Control Contaminación del Pacífico Colombiano. Ed. DIMAR. Serie de Publicaciones Espaciales Vol., 3. 120 p. San Andrés de Tumaco.
- [7] Rojas, X., P. Sierra-Correa., P. Lozano-Rivera y A. López. (2010). "Guía metodológica para el manejo integrado de las zonas costeras en Colombia, Manual 2: planificación de la zona costera". Serie de Documentos Generales INVEMAR No.44, Santa Marta. 74p.
- [8] M. Castro, J. Almadia, J. Ferrer y D. Díaz (2014). "Indicadores de la calidad del agua: evolución y tendencias a nivel global". Ingeniería Solidaria, vol. 10, n.º 17, pp. 111-124.
- [9] Samboni Ruiz, N. E., Carvajal Escobar, Y., & Escobar, J. C. (2007). "Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua". Ingeniería e investigación, Universidad Nacional de Colombia Bogotá, Colombia, vol. 27, núm. 3, pp. 172-181.
- [10] Ott, W. (1978). "Environmental Indices., Theory and Practice, Aa Science, Ann Arbor, Michigan".
- [11] V. Guillén, H. Teck, B. Kohlmann y J. Yeomans (2012). "Microorganismos como bioindicadores de la Calidad del Agua, Tierra tropical: sostenibilidad, ambiente y sociedad", vol. 8, n.º 1, pp. 65-93
- [12] M. Wills y K. N. Irvine (1996). "Application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index in Cazenovia Creek, NY, Pilot Watershed Management Project". Middle States Geographer, pp. 95-10.
- [13] Wilches Chaux, G. (1998). "Auge, caída y levantada de Felipe Pinillo, mecánico y soldador o yo voy a correr el riesgo" (No. 658.155 W5).
- [14] U.S.EPA (United States Environmental Protection Agency) (1986). Quality Criteria for Water EPA 440/5-86-001. 1 May 1986. Office of Water Regulations and Standards, Washington D.C., USA.
- [15] Herrera A, Suárez P. Indicadores bacterianos como herramientas para medir la calidad ambiental del agua costera. INCI. 2005; 30(3):171- 176
- [16] Fujioka, R.; C. Sian-Denton; M. Borja; J. Castro and K. Morphew (1999). Soil: the environmental source of Escherichia coli and enterococci in Guam's streams. J. Appl. Microbiol. Symp. Suppl. 85: 83S- 89S.
- [17] Cavallo, R.A., & Stabili, L. (2002). Presence of vibrios in seawater and *Mytilus galloprovincialis* (Lam.) from the Mar Piccolo of Taranto (Ionian Sea). Water Research, 36, 3719-3726.
- [16] Thompson JR, MA Randa, LA Marcelino, A Tomita-Mitchell, E Lim & MF Polz. 2004. Diversity and dynamics of a North Atlantic coastal *Vibrio* community. Applied and Environmental Microbiology 70: 4103-4110.

Efecto de las islas de calor urbano en las principales vías de la Ciudad de Panamá

Urban heat island effect on the main roads of Panama City

Martín Candanedo¹, Danna Villarreal^{1*}

¹ Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: danna.villarreal@utp.ac.pa

RESUMEN— Las islas de calor urbano se definen como la diferencia de temperatura en un área urbana en comparación de sus alrededores. Estas pueden ser causadas por un alto consumo eléctrico, uso excesivo de automóviles, diseño y planificación de infraestructuras y los materiales utilizados, y la disminución del área verde. Debido a su presencia en distintas ciudades del mundo y analizadas con estudios pertinentes, se decide realizar un estudio en las principales vías de la Ciudad de Panamá. Se plantea investigar la existencia de islas de calor y sus posibles causas, debido a su desarrollo urbano no planificado. Se delimitan cuatro zonas de estudio para recolectar datos de temperatura con un termo higrómetro en un horario de 8:00 am, 2:00 pm y 8:00 pm en temporada de transición, lluviosa y seca. Consiguientemente, se elaboraron mapas de isoterma utilizando el método de EBK. Como resultado se obtuvieron diferencias de temperaturas máximas y mínimas de 9°C para el período matutino, 8.1°C para la tarde y 2.4°C para la noche para la temporada de transición; los valores de 10.5°C para la mañana, 8.1°C para la tarde y 3.3°C para la noche en temporada lluviosa; y por último la temporada seca con 7.8°C para el horario matutino, 9°C para el vespertino y 2.6°C para el nocturno. Se comprueban las islas de calor y su relación con edificios altos, uso de automóviles, el uso de asfalto como material para las calles y factores ambientales como la lluvia, nubes y vientos promueven la generación de ellas.

Palabras clave— *Islas de calor urbana, temperatura, Ciudad de Panamá, Empirical Bayesian Kriging.*

ABSTRACT— Urban heat island effect is defined as the temperature difference in an urban area compared to its surroundings. These can be caused by high electrical consumption, excessive use of cars, infrastructures design and planning and type of materials used, and the decrease of the green area. Due to its presence in different cities of the world and analyzed with relevant studies, it is decided to conduct a study on the main roads of Panama City. It is proposed to investigate the existence of heat islands and their possible causes, due to their unplanned urban development. Four study areas are delimited to collect temperature data with a thermo hygrometer at a time of 8:00 am, 2:00 pm and 8:00 pm in the transition season, rainy and dry. Consequently, isothermal maps were prepared using the EBK method. As a result, differences in maximum and minimum temperatures of 9° C for the morning period, 8.1° C for the afternoon and 2.4° C for the night for the transition season were obtained; values of 10.5° C for the morning, 8.1° C for the afternoon and 3.3 ° C for the night in the rainy season; and finally the dry season with 7.8° C for the morning, 9° C for the evening and 2.6° C for the night. Heat islands are confirmed and their relationship with tall buildings, car use, the use of asphalt as material for the streets, and environmental factors such as rain, clouds and winds promote the generation of them.

Keywords— *Urban heat island, temperature, Panama City, Empirical Bayesian Kriging.*

1. Introducción

El incremento de la población se ha dado de manera acelerada en los últimos años, promoviendo el nacimiento y sobrepoblación en grandes ciudades a nivel mundial [1]. El desarrollo de las ciudades conlleva la generación de nuevas edificaciones, sean por el ámbito

civil, institucional e industrial, carreteras y el uso de medios de transporte. Varios autores han estudiado, desde 1958 la existencia del fenómeno islas de calor urbanas. Se han desarrollado una gran cantidad de observaciones y estudios afirmando su existencia a nivel mundial, sin tener la excepción del tamaño, ubicación sea

Citación: M. Candanedo y D. Villarreal, "Efecto de las islas de calor urbano en las principales vías de la Ciudad de Panamá", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 23 de agosto de 2019. **Recibido con correcciones:** 28 de agosto de 2019. **Aceptado:** 7 de julio de 2020.

DOI:

Copyright: 2020 M. Candanedo y D. Villarreal. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

costera o en tierra y posición geográfica de las ciudades [2]. El fenómeno de islas de calor urbano se define como la diferencia de temperatura entre la zona urbana a comparación de sus alrededores, encontrándose en las áreas más pobladas de la ciudad [3]. El aumento de temperatura provoca una mayor retención de gases de efecto invernadero en las zonas urbana, puesto que la concentración de estos gases ha aumentado de manera alarmante en los últimos años y así, el efecto de islas de calor urbanas contribuye al cambio climático.

1.1 Principales causas y consecuencias del efecto islas de calor urbanas

La generación de las islas de calor urbanas proviene del calor antropogénico, geometría urbana y la selección de tipos de materiales de construcción. Estas actividades pueden llegar a tener impactos en el aumento de consumo de energía, aumentar la contaminación del aire y gases de efecto invernadero, comprometer el confort y salud humana y la calidad del agua [4].

1.1.1 Calor antropogénico

El consumo de energía eléctrica y el uso de automóviles son elevados por la cantidad de actividades realizadas en la ciudad [5]. Estas actividades utilizan como materia prima los combustibles fósiles que, al ser quemados, en su determinado proceso, liberan cierta cantidad de gases de efecto invernadero, mismos que se quedan atrapados en las zonas urbanas.

1.1.2 Geometría urbana

El diseño y planificación para el desarrollo de las ciudades incluye la geometría del diseño de calles, orientación, ejes de calles y altura de los edificios, factor de vista y escala de barriadas locales. Todos estos factores afectan variables ambientales como el flujo de radiación solar y dirección y velocidad de vientos[6]. Los patrones de sombras e intercambio de flujos de calor de las edificaciones son alterados por la geometría urbana modificando las variables ambientales mencionadas.

1.1.3 Tipos de materiales de construcción

Los materiales suelen clasificarse por características termal como lo son: calor específico, color, textura y porcentaje de albedo [7]. Al seleccionar materiales que presenten colores oscuros y un albedo bajo conjunto una reducción de área verde, colaboran a la retención de temperatura en el área. Esto se debe a que estos materiales absorben y retienen mayor calor y las zonas

verdes (zona de vegetación) absorben y transforman la luz solar en su proceso de fotosíntesis.

1.2 Problemática en la Ciudad de Panamá

La Ciudad de Panamá es la capital de la provincia y República de Panamá, fundada el 15 de agosto de 1519. Según el censo del 2010, consta de unos 430,299 habitantes en el distrito [8]. Localizada en la zona costera del océano Pacífico y cerca del Canal de Panamá. Siendo esta el área de mayor desarrollo urbano a nivel nacional por poseer un gran porcentaje de actividad económica e industrial, y de movilidad urbana. Se demuestra por el plan distrital de la Ciudad de Panamá, la cantidad de empleos es indirectamente proporcional a la cantidad de personas que residen en el área con valores aproximados de 395 mil personas a 135 mil viviendas. Hecho este que sustenta la gran movilidad desde las áreas este y oeste afuera de la ciudad hacia los sitios de empleo. La movilidad urbana puede llegar a ser una posible consecuencia de la generación de islas de calor en la ciudad, ya que los ciudadanos, al vivir en lugares distantes deben movilizarse utilizando vehículos, propios o de transporte público, que generan un 78% de hidrocarburos y 98% de monóxido de carbono [9], siendo estos gases de efecto invernadero los que permanecen en el área y aumentan la temperatura del sector. De igual forma, esta consecuencia se da gracias al desarrollo del área y se posiblemente se puede atribuir el modo de planificación de un área urbana es la base de generación del fenómeno descrito.

1.2.1 Planificación de la Ciudad de Panamá

El desarrollo de la Ciudad de Panamá se ha dado gracias al impulso del comercio exterior, desde los inicios del descubrimiento del país se promovió una ruta necesaria de transporte y riquezas al nuevo continente. Esto desencadenó a través de los años la expansión de la zona donde los extranjeros definían espacios por sectores de altos y bajos recursos. En los años 60, se presenta un aumento masivo de migración de personas del interior hacia la ciudad por motivos de industrialización y la incursión en el campo generando la búsqueda de nuevos empleos. Trajo como consecuencia a la capital del país un crecimiento espontaneo y toma de tierras no vigilada para la construcción[10].

1.2.2 Legislación Panameña

La creación de leyes sobre planificación urbana inició en los años 90. Se incluye tema de ordenamiento

territorial para el desarrollo urbano, normas de diseño relativas al régimen de propiedad horizontal y reglamento nacional de urbanización del territorio de la República de Panamá, sin embargo, no cuenta con límites permisibles de cambios de zonificación o para disposición de uso de suelos y ausencia de una normativa ambiental obligatoria sobre materiales de construcción. Los materiales cumplen con normas DGNTI-COPANIT basados por resistencias y análisis estructural.

1.2.3 Planes de Desarrollo Urbano

De acuerdo con el Tratado Torrijos-Carter, se creó el Plan de Desarrollo Urbano de las Áreas Metropolitanas de Panamá Atlántico – Pacífico elaborado en 1997 con un diagnóstico de cómo se encuentra la ciudad en parte de infraestructuras, viviendas, población, uso de suelos, entre otros. Además de las estrategias para mitigar los problemas de esa época y su debida actualización realizada en el año 2016. No obstante, este plan no tiene un carácter legalmente vinculante y está dirigido de manera general necesitando el apoyo de entidades municipales, la comunidad y los sectores interesados en la parte de planificación para la realización de las ideas propuestas.

Actualmente, la dirección de planificación urbana ha elaborado los planes parciales de ordenamiento territorial (PPOT) para el corregimiento de San Francisco, el plan distrital de Panamá (PDP) incluye un plan estratégico participativo, políticas territoriales, pacto local y un plan local de ordenamiento territorial. Con ello se especifica un pre diagnóstico enfocado en las áreas de:

- Ambiente
- Medio rural
- Vulnerabilidad y riesgo
- Patrimonio cultural y arqueológico
- Socioeconómico
- Movilidad
- Transporte y logística
- Suelo urbano y dinámica espacial
- Infraestructura urbana
- Eje transversal, marco legal, políticas, estrategias y normas vigentes

Al desarrollar cada una de las variables, se elaboran ciertas soluciones de mayor importancia a los temas de fomento y repartición equitativa de áreas verdes, reforestación, unión de parques naturales, descentralización y creación de un área compacta de alta densidad y construcción de viviendas asequible. Sin embargo, los planes no cuentan con la idea de regulación

de materiales de construcción o iniciativas para realizar una vida sostenible para las personas.

Para el ámbito ambiental se cuenta con la elaboración en conjunto del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) y el Municipio de Panamá en 2019 de un Plan de Acción sobre Iniciativa de Ciudades emergentes y sostenibles. Luego de realizar un estudio pertinente a distintos factores dio como resultado los siguientes temas prioritarios: movilidad y transporte, gestión de residuos sólidos, agua, desigualdad urbana y vulnerabilidad ante desastres naturales. Estos son agrupados en tres líneas estratégicas, siendo planificación urbana sostenible, servicios urbanos de calidad, y gestión moderna y eficaz. La parte de mayor importancia en la mitigación de islas de calor, si se presentan en la Ciudad de Panamá, se establece en la clasificación de la primera línea estratégica. Esta habla de establecer transporte de calidad provocando la mitigación de la principal causa de generación de gases de efecto invernadero que es ocasionado por los automóviles. Adicionalmente, la confección de planes estratégicos distritales y locales de ordenamiento territorial ayudan a la mitigación de ellos (cabe mencionar la elaboración de estos en el municipio de Panamá).

Al analizar estas iniciativas, la mejoría en el ámbito de planificación urbana está iniciando y requiere plasmar estas acciones de manera concreta de la mano de la sociedad y los gobernantes.

2. Metodología

Para determinar el fenómeno de islas de calor en la Ciudad de Panamá se recolectan datos in situ para confeccionar mapas de isoterma y analizar el su comportamiento. Para ello se debe seleccionar un área de estudio, recolectar datos de temperatura y generar los mapas con el uso del programa ArcGIS.

2.1 Área de Estudio

Se selecciona la Ciudad de Panamá para realizar el estudio de islas de calor urbanas por ser el área más desarrollada de la República de Panamá. Para cada zona se establecerá puntos a cada 500 metros para realizar la medición de temperatura se puede apreciar en la figura 1.

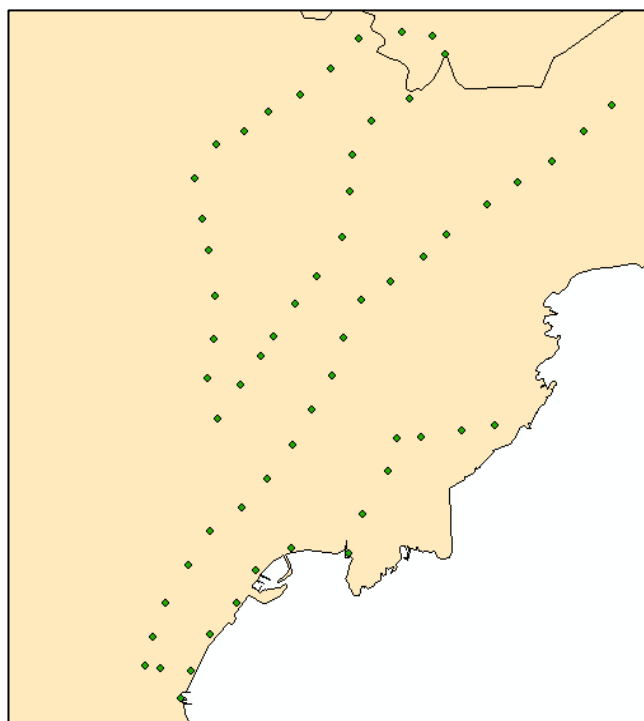


Figura 1. Área de Estudio.

En la tabla 1 se mencionan cada zona, su longitud, y una descripción de los puntos iniciales y finales de cada tramo.

Tabla 1. Zonas de Estudio

Zona	Vías	Longitud (km)	Inicio de Tramo	Final del Tramo
Zona 1	Vía Ricardo J. Alfaro / Tumba Muerto	6,97	Hospital San Miguel Arcángel	Cervecería Nacional
Zona 2	Vía Simón Bolívar/ Transistmica	5,69	Puente frente a Cervecería Nacional	Estación San Miguelito
Zona 3	Vía España - Calidonia	9,33	McDonald's de Balboa	Plaza 5 de mayo
Zona 4	Cinta Costera – Vía Israel	6,6	Rotonda del Mercado de Mariscos	Hotel Sheraton

Al ubicar los tipos de zonificaciones de las zonas a evaluar, se determina que las zonas 1, 2, 3 y parcialmente la 4 tienen en su mayoría la clasificación de residencial de alta densidad y comercial de intensidad alta (RM3C2), puede ser oficinas, locales, instituciones, multifamiliares,

entre otros. La parte final de la zona 4 está contemplada por comercios de alta intensidad (C2) [11].

Otro punto para destacar es el material utilizado para la confección de carreteras en la Ciudad de Panamá, en su mayoría está constituida por asfalto y otra por concreto. Además de la construcción de carreteras, se realizan rellenos con asfalto tipo carter por grietas que suelen salir en la carretera. Se debe mencionar como el asfalto es un contaminante debido a su alta absorción de calor debido a su bajo albedo [12].

2.2 Recolección de Datos

El estudio se desarrolla mediante la medición de temperatura en las principales vías de la Ciudad de Panamá. Para las vías delimitadas se establecerá puntos específicos a cada 500 metros medidos, la longitud y posición geográfica de cada vía fue determinada por el programa Google Earth. El recorrido se realizará en automóvil y se utilizará un termo-higrómetro calibrado $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para medir temperatura. Los instrumentos de medición se deben colocar sin manipulación alguna y debe esperar un mínimo de dos minutos para tener un valor estable.

Panamá consta de dos estaciones: seca y lluviosa, donde la seca se establece por cuatro meses y la lluviosa por ocho meses del año. El intervalo de tiempo puede ser relativo, puesto puede surgir fenómenos del niño o la niña en el país. Por ello, las fechas de mediciones se basaron en las estaciones climatológicas del país, donde se efectuará tres mediciones en los 12 meses. Su división será en temporada seca en el mes de enero del 2019, transición de temporada seca a lluviosa en mayo del 2018 y la temporada lluviosa con fecha de agosto del 2018. Los datos térmicos se recolectarán en tres intervalos del día: matutino, vespertino y nocturno. Las horas de inicio de cada medición son 8:00 am, 2:00 pm y 8:00 pm.

2.3 Creación de Mapas de Isotermas

Las isotermas serán confeccionadas por el software *ArcGIS*, específicamente con los programas *Arcmap*. Los pasos para la manipulación de los datos, observación de comportamiento de temperatura y elaboración de mapas de isotermas mediante un modelo no lineal.

Es importante resaltar que los datos seleccionados para realizar el estudio de las islas de calor es la temperatura. Esta variable tiene un comportamiento no lineal, puesto que depende de distintos parámetros climáticos [13] que no son el objetivo del presente

estudio. Esto concede que la creación de Isotermas, los *triangulated irregular network* (TIN) y *Rasters* no demuestran un comportamiento real, debido a que estas formas de representaciones digitales son adecuadas para un comportamiento lineal. Las exhibiciones de las representaciones se utilizan para ver un comportamiento en general. Para una representación más conveniente, se debe utilizar un método de interpolación no lineal que cumpla con las especificaciones descritas para este estudio. Esto será explicado en el a continuación.

Para determinar un comportamiento y la existencia de Islas de Calor se procede a escoger un método de interpolación con los datos de temperatura, es decir, los puntos transformados en *ArcGIS*. Su selección está basada en la lección de Eric Krause, “Analizar el calentamiento urbano mediante *kriging*. Encuentre islas de calor y poblaciones en riesgo en Madison, Wisconsin.”. El programa cuenta con una las herramientas de análisis geo-estadístico donde presenta varios métodos de interpolación. Uno de ellos es el *Empirical Bayesian Kriging* que fue seleccionado para este estudio.

Empirical Bayesian Kriging (EBK) es un modelo actualizado del *Kriging* simple, siendo más fácil y preciso de usar. Una de las principales características del método de interpolación *Kriging* simple es que utiliza un solo semivariograma donde infiere que este fue diseñado a la perfección y cualquier valor que no siga la tendencia será excluido del mismo, mientras el EBK crea semivariogramas por cada subconjunto de datos para realizar distintas simulaciones que son utilizadas para crear nuevos subconjuntos y combinarse entre sí para obtener un mapa de predicción. Siendo así una forma más precisa y real de la interpolación [14].

3. Análisis de Resultados

La recolección de datos de temperatura en las cuatro distintas zonas, que incluyen la Vía Ricardo J. Alfaro/Tumba Muerto, Vía Simón Bolívar/Transistmica, Vía España y Cinta Costera, de la Ciudad de Panamá mostrada en la figura 2 han dado como resultado una diferencia de valores máximos y mínimos por cada temporada y horario que se muestra en la tabla 2.

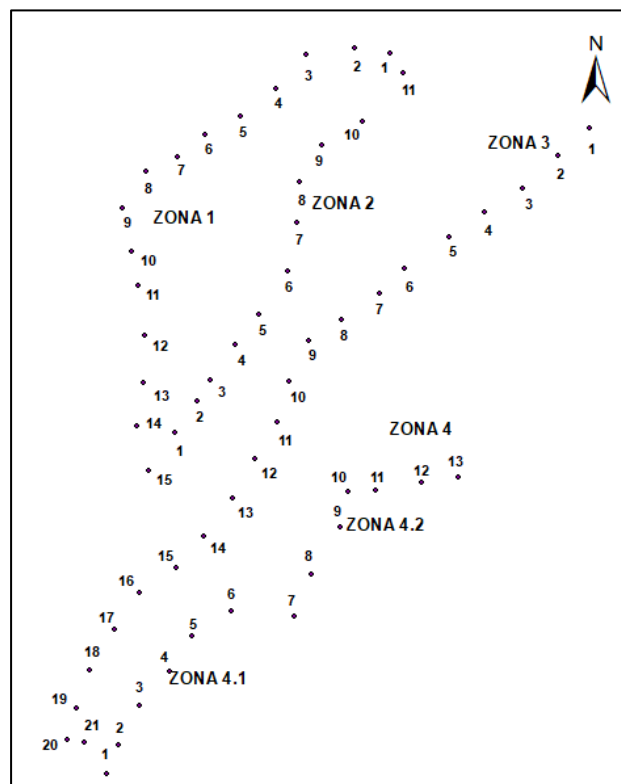


Figura 2. Zonas de Estudio.

Tabla 2. Diferencia de Temperaturas

Temporada	Matutino	Vespertino	Nocturno
Transición: Seca a Lluviosa	9°C	8.1°C	2.4°C
Lluviosa	10.5°C	8.1°C	3.3°C
Seca	7.8°C	9°C	2.6°C

La tabla 2 demuestra como la temporada lluviosa mantiene la mayor dispersión de temperatura para el horario matutino con 10.5°C mientras que la temporada seca tiene la menor de 7.8°C. Por otro lado, para el horario vespertino se permanece la misma diferencia para la temporada de transición y lluviosa de 8.1°C mientras que la seca mantiene la m mayor diferencia con 9°C. Por último, el horario nocturno tiene 3.3°C de mayor diferencia para la temporada lluviosa, un 2.6°C para la seca y 2.4°C para transición de seca a lluviosa. Estos datos indican la presencia del fenómeno de islas de calor urbano, puestos manifiestan gratas diferencias de temperaturas en el área.

En segunda instancia, se observa la interpretación de los mapas de isotermas elaborados con el método de interpolación *Empirical Bayesian Kriging* (EBK). El análisis de los mapas de isotermas mostrará el

desplazamiento de las islas de calor y una breve caracterización sobre posibles causas de estas.

Se debe recordar que el análisis específicamente del método EBK se debe al comportamiento de la temperatura, descrita como no lineal. Siendo establecido por Eric Krause, el método más apropiado para realizar esta interpolación utilizando el programa ArcGIS.

Se resalta que los datos de temperatura obtenidos pueden variar con los datos resultantes de interpolación. Se debe a que, al momento de efectuar la interpolación, este interpola con todos los valores cercanos a la superficie a estudiar dando como resultado un rango de error desde el valor que se utilizó como control al resultado obtenido.

El resultado de la interpolación consta de nueve distintos mapas de isotermas:

- Horario Matutino: temporada seca, transición y lluviosa
- Horario Vespertino: temporada seca, transición y lluviosa
- Horario Nocturno: temporada seca, transición y lluviosa

3.1 Descripción de mapas de isotermas

Se procederá a realizar la descripción de cada mapa dividido por temporada y medición diaria. Se procede a realizar una comparación descriptiva sobre el período de medición diaria, esto será de la siguiente forma: matutino, vespertino y nocturno.

3.1.1 Horario Matutino

Al visualizar las figuras 3, 4 y 5 de los mapas sobre temporada de transición: seca a lluviosa, lluviosa y seca en horario de la mañana con inicio a las 8:00 a.m. han prevalecido las siguientes características notorias tales como:

Los cuatro primeros puntos localizados desde la entrada a la vía transistmica hasta los estacionamientos del Banco Nacional de Panamá ubicados en la zona 2, muestran un comportamiento de mantener una temperatura más baja en las tres temporadas. Los promedios de las temperaturas son de 29°C para la temporada seca, 27.8°C para la temporada de transición y 27.5°C para la temporada lluviosa.

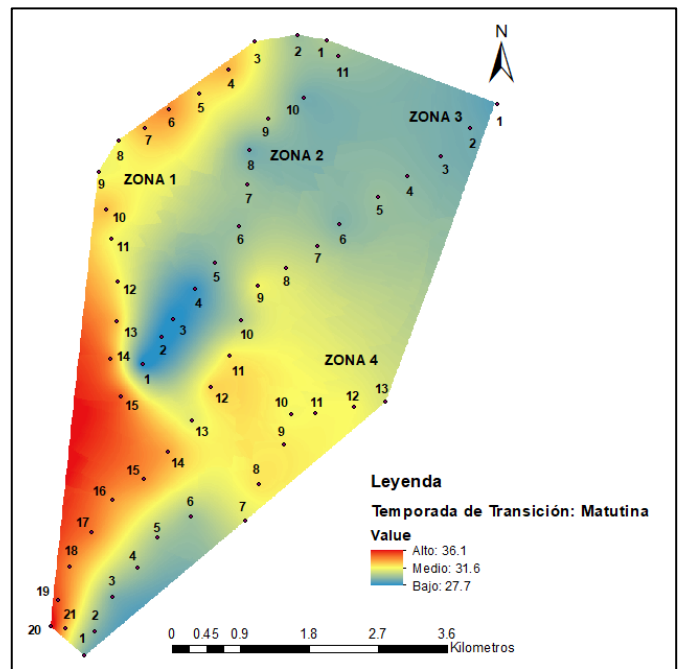


Figura 3. Mapa de Isotermas modelo EBK – Temporada de Transición: Matutina.

La primera zona ubicada en la vía Ricardo J. Alfaro se mantiene como la zona de mayor concentración de temperatura para las temporadas de transición seca a lluviosa y lluviosa. Un punto a destacar es el encontrado en los estacionamientos del supermercado Xtra (punto 5) de 36.4 °C, siendo el valor más alto del mapa de Isoterma y de la Temporada Lluviosa. Otra característica para mostrar, son sus variaciones de temperatura en las tres distintas temporadas como lo son: para temporada seca se tiene una distribución variada de temperatura a lo largo de toda la vía desde la parada de bus del Hospital San Miguel Arcángel (punto 1) hasta la estación de gasolinera Delta en frente de la Cervecería Nacional (punto 15) y una diferencia de valor máximo y mínimo de 4°C, en la temporada de transición sus valores máximos se encuentran a final de la vía y un rango de temperatura de 4.8°C y en la temporada lluviosa la concentración de temperatura altas esta al inicio del tramo y su rango de temperaturas es de 5.8°C.

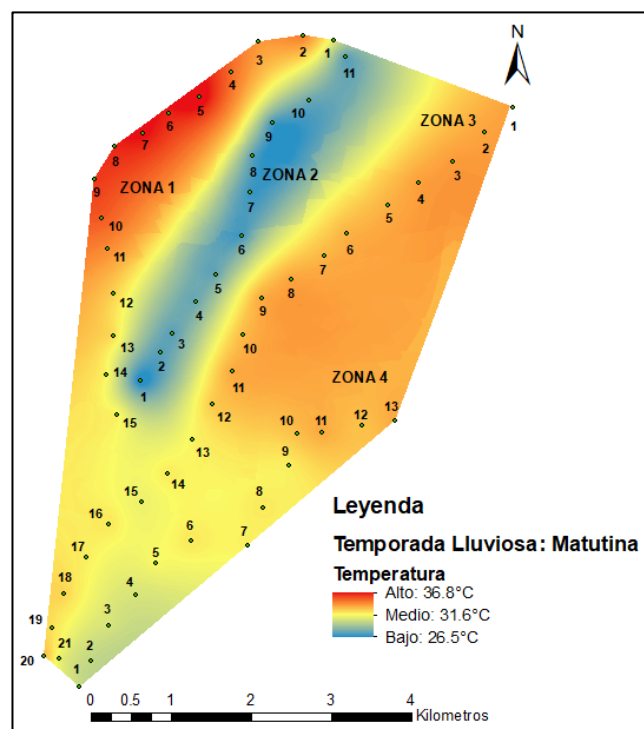


Figura 4 Mapa de Isotermas modelo EBK – Temporada Lluviosa: Matutina.

La zona 3 muestra un comportamiento distinto en las tres mediciones de temporadas. Se muestra un aumento de temperatura de 28.5°C hasta 36.5°C dando una diferencia de 8°C en la temporada de transición. Se tiene excepciones como la isleta frente a los bomberos de Vía España (punto 10) y Bellini en Vía España (punto 13) que no siguen el patrón. Igualmente, al finalizar la Vía España, el aumento de temperatura es extremo puesto que llega a 36.5°C en la plaza 5 de mayo. Para la temporada lluviosa, se ve una disminución de temperatura desde inicio hasta el final, por motivo que se encontraba nublado la vía y su diferencia de valores consiste en 2.4°C. Mientras que el comportamiento de la vía España en la temporada seca, manifiesta una concentración de temperatura en los extremos, el punto 4 ubicado en el comercio Tasco Battery cuenta con la temperatura de 35.8°C como el valor más alto, no obstante, al complementar con las observaciones tomadas en campo al momento de realizar la medición se estableció una gran cantidad de vehículos pasando por este punto. Igualmente, el punto localizado en la estación 5 de mayo cuenta con la misma temperatura. El rango estipulado por toda la vía es de 32.6 a 33.8°C donde cinco puntos salen de estos valores, ellos son los dos de mayor concentración de temperatura y los otros tres son por

factores de sombra de edificios (punto 7 – especificado como los estacionamientos del comercio Friolín), mientras que los puntos restantes son influenciados por brisas fuertes y cierta nubosidad que son mostrados en el mapa. Se debe mencionar que los puntos afectados son los que tienen un rango de temperatura de 30°C a 32.6°C.

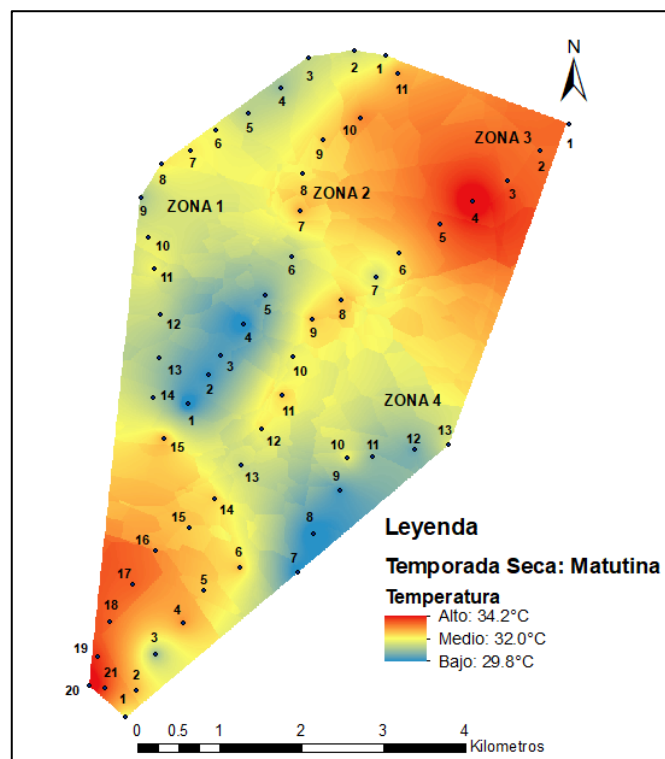


Figura 5. Mapa de Isotermas modelo EBK – Temporada Seca: Matutina.

Para la última zona, se observa la división de temperaturas desde el inicio al final de la cinta costera (punto 1 al punto 6) y desde el parque de cercano a la cinta costera hasta el hotel Sheraton (punto 7 al punto 13). Estas serán clasificadas para mejor comprensión como zona 4.1 y zona 4.2 como se muestra en la ilustración 29. Para las temporadas de transición y lluviosa se muestra una zona 4.1 con menores valores de temperatura (diferencia de valores máximos y mínimos fueron de 29.5°C < 31.5°C y 31°C < 32.5°C respectivamente) a diferencia de la temporada seca que muestra los menores valores en la zona 4.2 rango de valores de 31,8°C > 30,5°C. Se debe mencionar que los datos adquiridos en la temporada seca de la zona 4.2 son influenciados por las sombras de los edificios a excepción en la parada de bus del centro comercial Multiplaza y la esquina del Hotel Sheraton.

3.1.2 Horario Vespertino

La primera zona cuenta con datos solamente para la temporada seca y transición, puesto que para la lluviosa no se pudo recolectar datos a causa de lluvia, referirse a la figura 6, 7 y 8 para observar su comportamiento en los mapas de isotermas. Al realizar un análisis general se muestra en transición un rango de temperatura de 2.9°C, siendo la parte superior a excepción de los dos primeros puntos (parada de bus en el Hospital San Miguel Arcángel y los estacionamientos de Artec) los valores más bajos. Para la temporada seca la diferencia de temperatura es de 4.7°C, donde sus valores máximos están distribuidos de manera aleatoria por la vía.

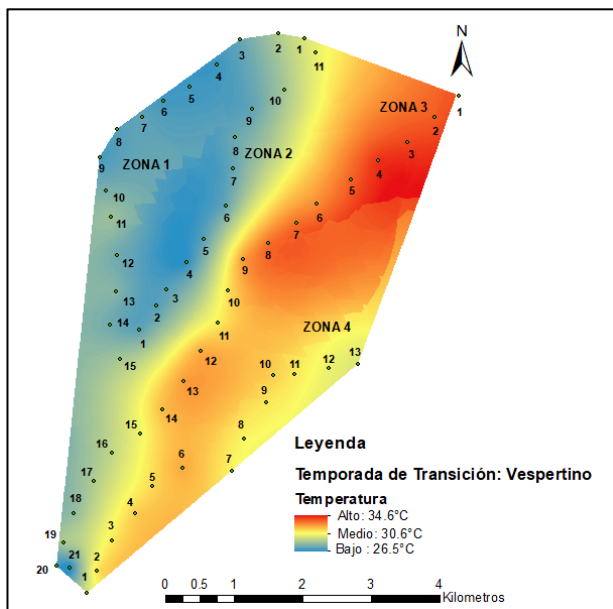


Figura 6. Mapa de Isotermas modelo EBK – Temporada de Transición: Vespertino.

La zona 2 cuenta con un comportamiento muy peculiar en esta clasificación. Debido a que en la temporada seca se muestran los valores más elevados no solo en las otras temperaturas sino en su mapa producto del EBK. Su rango de valores va desde 35.2°C en la isleta frente a la estación del metro de San Miguelito (punto 11) hasta 39.9°C en la entrada a la vía Simón Bolívar (punto 1). De manera peculiar la temperatura va incrementando desde el punto 2 la entrada al supermercado Xtra hasta la entrada a la casa de encuentro El Puente como punto 10. Se percibe que el día de su medición contaba con un factor climático puesto que se realizó otra medición en la zona 1 y presentó valores elevados a los de la transistmica. Para la temporada de transición, se muestra

un rango de diferencia de 3.5°C, tomando una tendencia de valores mínimos al inicio de la vía con promedio de 27.2°C y van en aumento, se debe mencionar la presencia de lluvia a la mitad del recorrido. Para la temporada faltante, se ve un rango de 3.2°C una tendencia distinta al colocarse los valores máximos al inicio de la de vía y disminuir hasta finalizar.

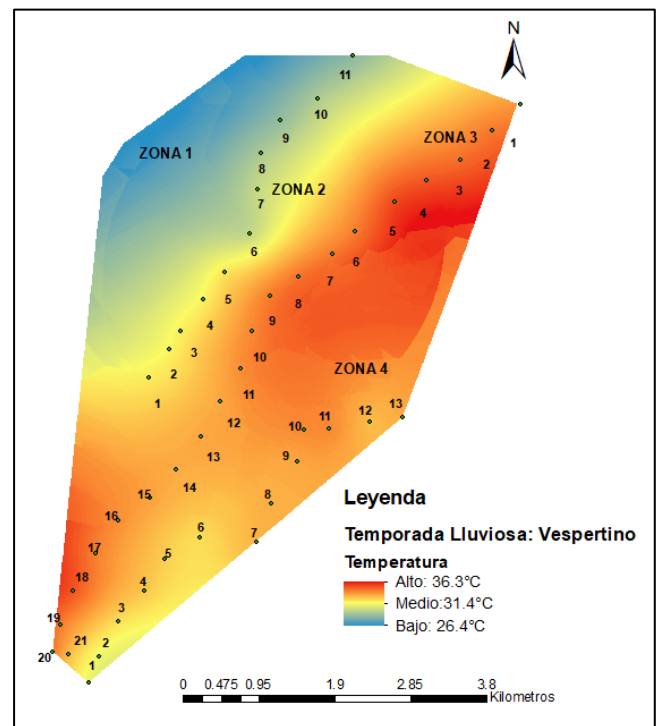


Figura 7. Mapa de Isotermas modelo EBK – Temporada Lluviosa: Vespertino.

La tercera zona muestra en sus tres temporadas un descenso de temperatura desde su inicio de 33.5°C a 31.5°C en temporada seca, 33.6°C a 25.9°C en temporada de transición y 33.4°C a 34.5°C en temporada lluviosa (aunque se ve un aumento en los valores del medio existe variación). Para lluviosa y transición se muestran datos una pequeña variación aleatoria de datos, pero con la tendencia de los valores de mayor temperatura al inicio. Por otra parte, se tienen los rangos de temperatura de lluviosa de 2.9°C y transición de 8.9°C. La temporada seca muestra además su disminución de temperatura a través del mapa que sus datos de menor temperatura tienen la observación del paso de la brisa por el punto al realizar su medición y un rango de temperatura de 3.9°C.

La cuarta zona dividida por zona 4.1 y 4.2 demuestra en la temporada lluviosa donde se muestra un rango de valores de 3°C, donde la zona 4.1 tiene una menor temperatura promedio de 31°C a la zona 4.2 con un valor de 33.1°C. Se destaca la presencia de nubes parciales por todo el recorrido y en su valor máximo de 33.9°C localizado en la salida del centro comercial Multiplaza la presencia de tráfico. Mientras que la tendencia en la temporada de transición y seca muestran una variación de datos por toda la vía. Tanto así que sus promedios por vías son los siguientes: para transición zona 4.1 es de 31.1°C y zona 4.2 de 30.6°C y para temporada seca zona 4.1 con 34.94°C y zona 4.2 con 34.99°C.

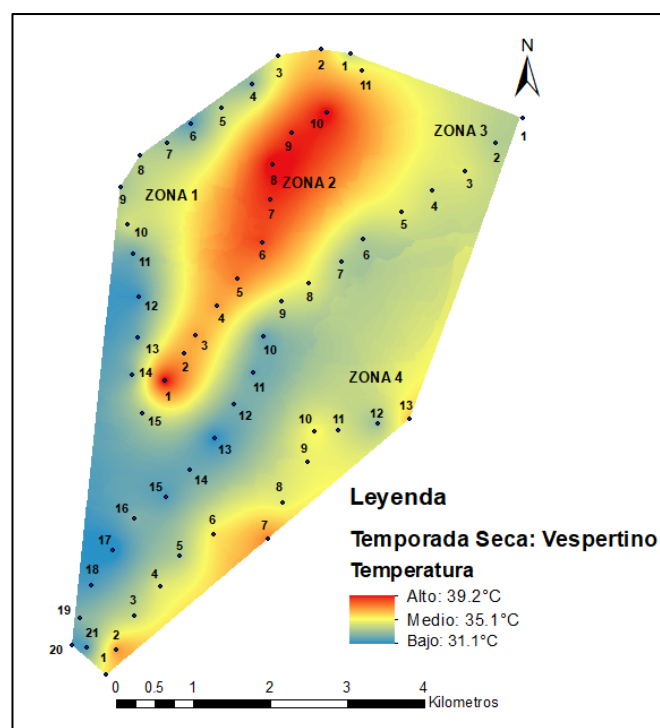


Figura 8. Mapa de Isothermas modelo EBK – Temporada Seca: Vespertino.

3.1.3 Horario Nocturno

Para la temporada lluviosa se ve en la primera zona una diferencia de temperatura de 0.7°C, su comportamiento se ve de esta manera por la lluvia generada en la tarde y un poco llovizna en la noche, como lo muestran las lecturas en los estacionamientos del supermercado Xtra (punto 5). No obstante, este punto adquiere un valor de 27.6°C mientras está el evento climático de la llovizna. Su punto de mínimo valor es la isleta frente al puente del trébol cercano a la casa de los materiales (punto 7) con 27.1°C y el más alto en la parada

de bus de la USMA (punto 4) con 27.8°C. Para la temporada seca, aunque se ve una alta concentración de temperaturas al inicio de la vía, se contempla una variación de datos en los puntos consiguientes. Se observan los valores máximos es de 28.1°C en los estacionamientos de la Clínica Yee frente a la UIP y su valor mínimo de 26.4°C en la esquina del puente elevado que une la parada de bus La Locería con Plaza Edison. Por último, la temporada de transición muestra dispersiones en los puntos con un rango de temperatura de 1.2°C.

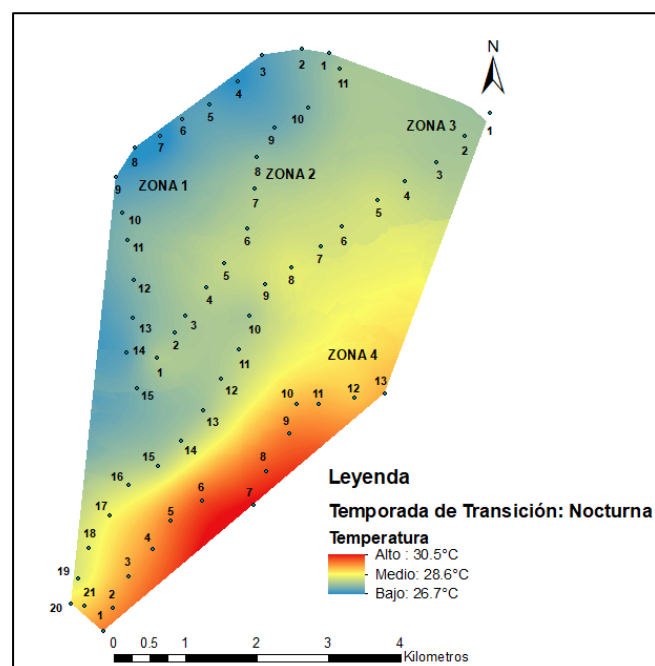


Figura 9. Mapa de Isothermas modelo EBK – Temporada de Transición: Nocturna.

La zona 2 contempla distintas variaciones en las tres temporadas del año descritas en el estudio, ver figura 9, 10 y 11. Al tener un comportamiento disperso de valores en la temporada de transición, su diferencia de valores está en 1.3°C con su valor máximo en el punto 1, en la entrada a la vía transistmica y su valor mínimo en la parada de la estación del metro Pueblo Nuevo. Para la temporada seca se observa una disminución de temperatura desde su inicio al final de la vía, sin embargo, los valores mínimos tomados en los puntos finales de la vía se ven afectados por la brisa que se ve en las observaciones. Las diferencias de temperaturas se ven reflejado un valor de 0.5°C con valores de 27.5°C que se repite en cuatro puntos de la zona (entrada al

supermercado Xtra, frente al local comercial de Terry Llantas, estación del metro Pueblo Nuevo e isleta frente a la estación del metro San Miguelito). Para la temporada lluviosa se ve un incremento de temperatura desde su inicio al final, los valores tienen una diferencia de 1.3°C con su valor mínimo en la entrada a la vía transistmica con 27.4°C y el final en la estación de San Miguelito con 28.8°C.

fueron de 27.9°C y 28.5°C y para la temporada seca de 26.9°C y 27.7°C. Como puntos de interés tenemos los más altos de la zona identificados como la rotonda de la cinta costera 3 frente al mercado de marisco (punto 1), los estacionamientos del McDonald's de Paitilla y la parada de bus de la Escuela Secundaria Profesional Isabel Herrera de Obaldía con valores de 29.1, 29.3 y 29.4 grados Celsius.

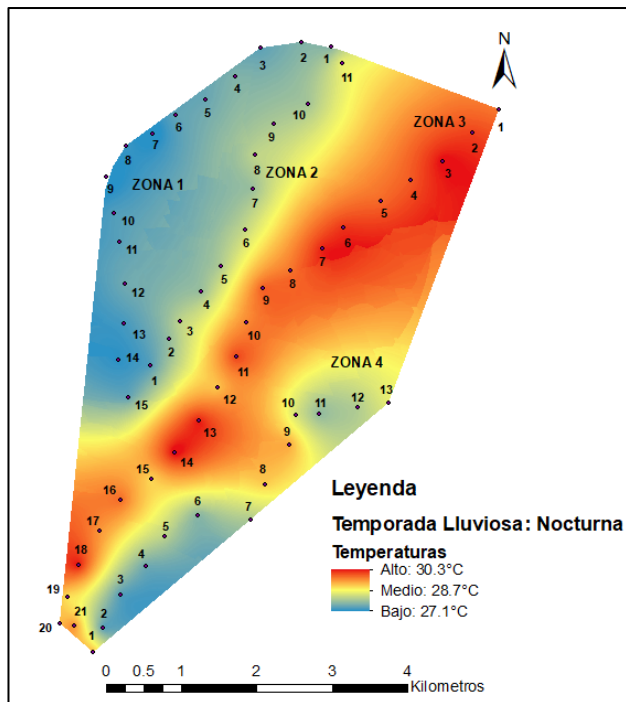


Figura 10. Mapa de Isothermas modelo EBK – Temporada Lluviosa: Nocturna.

La zona 3 comprende datos dispersos en su temporada de transición con una diferencia de valores de temperatura de 1.7°C y un promedio de 28.1°C. La temporada lluviosa muestra datos más dispersos sin embargo en el mapa se nota una distribución de temperaturas altas cercanas al valor máximo del mapa de isothermas. Las diferencias de temperaturas son de 1.7°C y un promedio de 29.7°C. Por último, la temporada seca tiene una diferencia de temperatura en su vía de 2.2°C, al observar el comportamiento de temperaturas se visualiza una disminución de alternados hasta finalizar la vía.

Por último, la zona 4 demuestra para la temporada de transición los valores más altos de su mapa, esto dividido por valores promedios por zona 4.1 y 4.2 de 29.7°C y 29.6°C, respectivamente. Para la temporada de invierno, las temperaturas promedias por zonas 4.1 y 4.2

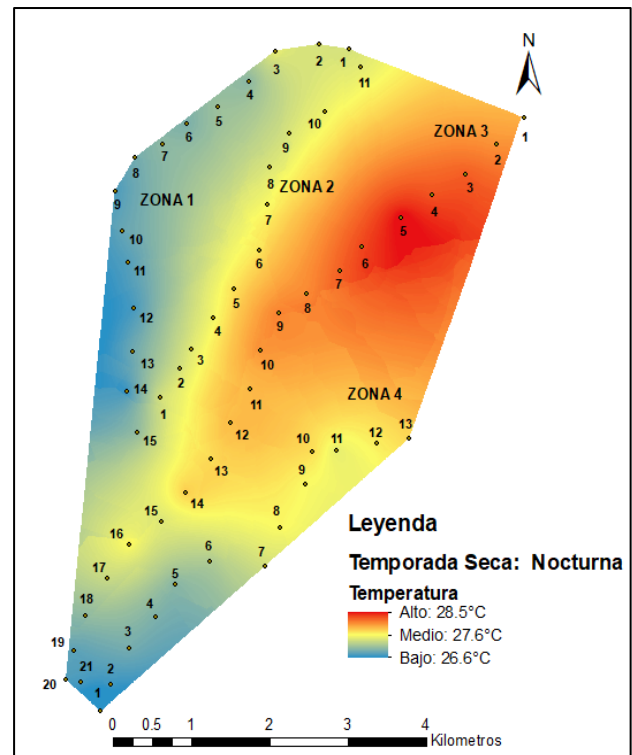


Figura 11. Mapa de Isothermas modelo EBK – Temporada Seca: Nocturna.

4. Conclusiones

- Las Islas de Calor se definen por la diferencia de temperatura respecto a un área urbana con sus alrededores, al realizar el análisis correspondiente para evaluar la existencia de estas se determina la presencia de Islas de Calor en las principales vías de la Ciudad de Panamá debido a las distintas concentraciones de temperaturas a lo largo de las vías demostrados no solamente en su horario de recolección sino por su temporada. Aunque se conoce que las temperaturas varían de manera climatológica en distintas horas, días y temporadas del año, las diferencias de valores presentados muestran una dispersión muy elevada en relación a su área estipulada. Para ello se aprecia este comportamiento

por las diferencias de valores mínimos y máximos encontrados en cada división, por ejemplo: para la temporada de transición seca a lluviosa se muestra los valores de 9°C para el período matutino, 8.1°C para la tarde y 2.4°C para la noche; para la temporada lluviosa los valores de 10.5°C para la mañana, 8.1°C para la tarde y 3.3°C para la noche; y por último la temporada seca con 7.8°C para el horario matutino, 9°C para el vespertino y 2.6°C para el nocturno.

- Al evaluar las diferencias de temperatura de cada punto en cada estación se observa que la temporada lluviosa proporciona los datos más dispersos, por consiguiente, la temporada de transición seca a lluviosa y, por último, la temporada seca. Esto promueve la idea del factor de la lluvia/ciclo del agua puede haber creado las grandes diferencias de temperaturas en las temporadas de transición y mayormente en la lluviosa, y los valores máximos y mínimos para el horario matutino en la temporada lluviosa, puesto una de las principales propiedades físicas del agua es su capacidad de absorción de calor. Por otra parte, en la tarde los datos de valores máximos proponen la premisa anterior y por la noche se ve pequeñas variaciones en la tendencia puesto no se obtiene las radiaciones del sol sino otras características climáticas nocturnas. Las contribuciones del trabajo y su grado de relevancia.

- El tráfico vehicular y materiales de construcción se conoce que las carreteras son construidas con la finalidad de proporcionar una vía adecuada para el paso de automóviles, no obstante, ciertos puntos de estudio como Tasco Battery en Río Abajo (punto 4 – zona 3) muestra altas temperatura en la temporada seca horario matutino causado posiblemente por el congestionamiento vehicular que se presentó en la recolección de dato en este punto.

Por otra parte, la visualización de los mapas de isotermas del área inicial de la zona 3 ubicada en Río Abajo demuestra los valores más altos de temperaturas, una posible explicación se da por la gran concentración de vehículos siendo una zona de confluencia de arterias vehiculares importantes. Sumado a esta característica, se distingue la presencia extensiva de planchas de asfalto y concreto, y una zona de gran actividad comercial que genera un incremento de número vehículos dentro de la zona.

Los edificios de alta densidad promueven cierto efecto a este fenómeno, se ve demostrado en los puntos de estacionamientos de Friolín (punto 7 –

zona), el área de infraestructuras de la cinta costera (zona 4.2) y la entrada de la vía Transistmica (punto 1 – zona 2) desde el puente hasta los estacionamientos del Banco Nacional (punto 4 - zona 2) donde se perciben las características de sombras en ciertas partes de las vías. Esto puede causar el descenso de temperaturas, sin embargo, al ser edificios pueden absorber o reflejar la luz de sol, que puede incrementar su consumo energético, la calidad ambiental interna o elevar las temperaturas a sus alrededores donde no está reflejado la sombra que contribuye a la generación de islas de calor.

- Los factores de nubosidad, viento, lluvia y características climáticas pueden establecer un descenso o aumento de temperatura en las áreas. Como muestras el viento, la lluvia y las nubes ocasionan una disminución de temperatura como se observó en distintos puntos de las tres distintas temporadas, por ejemplo, en la temporada seca horario nocturno el último punto ubicado en la en frente de la estación del metro de San Miguelito punto 11) influenciado por brisa o Bellini en la Vía España (punto 13 – zona 3) horario matutino tiene su descenso de temperatura por nubosidad. El factor de lluvia no facilitó la recolección de datos para la temporada lluviosa en horario vespertino para la Vía Ricardo J. Alfaro – zona 1, no obstante, los valores nocturnos no sólo de su zona sino del mapa de isotermas muestra los valores más bajo y se presume este comportamiento por la lluvia dada en horas anteriores. Por otro lado, la zona 2 – Vía Simón Bolívar muestra las temperaturas más elevadas en la temporada seca horario vespertino, esto es uno de los puntos de mayor consideración puesto que esta zona permanece valores menores en las otras mediciones, sin embargo, una posible causa de estas elevaciones de temperaturas puede ser una condición climática de ese día en particular puesto que no se realizaron las mediciones simultáneas en esta temporada. Estas características climáticas, que pueden ser de generaciones naturales, posiblemente pueden ayudar o disminuir las generaciones de las islas de calor.

- Se recomienda seguir una línea de investigación sobre las islas de calor, ya sea implementando la temperatura con calidad ambiental (por ejemplo: mediciones de concentraciones de CO₂ u otro gas), recolectar temperaturas de las superficies (carretera,

aceras, edificaciones, entre otras) y temperatura ambiental para realizar comparaciones, realizar el estudio de calles perpendiculares a las vías principales.

- Como medidas de mitigación a nivel estatal se propone la inclusión de normativas ambientales estatales sobre diseños de construcción y uso de materiales de construcción. Seguimiento de los planes de ordenamiento territorial de la Ciudad de Panamá y la inclusión a nivel distrital en toda la República de Panamá. Todo esto ayuda a la disminución del fenómeno de islas de calor no solo en el área descrita, sino en otras zonas urbanas y la prevención de estas en áreas en desarrollo.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Jean Guevara y Oscar Vega por su asistencia en el uso del programa *ArcGIS*. De igual forma al Dr. Cecilio Hernández del Centro Experimental de Ingeniería de la UTP, por facilitar los termohigrómetros, equipos utilizados para la medición de temperatura y a la Facultad de Ingeniería Civil por el apoyo en la calibración de los mismos.

REFERENCIAS

- [1] P. A. Mirzaei, "Recent challenges in modeling of urban heat island," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 19, pp. 200–206, Dec. 2015.
- [2] F. Ding, H. Pang, and W. Guo, "Impact of the urban heat island on residents' energy consumption: a case study of Qingdao," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 121, no. 3, p. 032026, Feb. 2018.
- [3] C. O'Malley, P. A. E. Piroozfarb, E. R. P. Farr, and J. Gates, "An Investigation into Minimizing Urban Heat Island (UHI) Effects: A UK Perspective," *Energy Procedia*, vol. 62, pp. 72–80, Jan. 2014.
- [4] United States Environmental Protection Agency, "Heat Island Impacts." [Online]. Available: <https://www.epa.gov/heat-islands/heat-island-impacts#main-content>. [Accessed: 08-Sep-2019].
- [5] M. Palme, A. Lobato, and C. Carrasco, "Quantitative Analysis of Factors Contributing to Urban Heat Island Effect in Cities of Latin-American Pacific Coast," *Procedia Eng.*, vol. 169, pp. 199–206, Jan. 2016.
- [6] W. Triyuly, S. Triyadi, and S. Wonorahardjo, "A Review of Thermal Environmental Quality in Residential Areas in Tropical Cities," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 152, p. 012034, May 2018.
- [7] A. Soltani and E. Sharifi, "Daily variation of urban heat island effect and its correlations to urban greenery: A case study of Adelaide," *Front. Archit. Res.*, vol. 6, no. 4, pp. 529–538, Dec. 2017.
- [8] H. Martinez, A. Quintero, and C. De la Cruz, "Resultados Finales Ampliados: Distrito de Panamá," *Contraloría General de la República de Panamá. Instituto Nacional de Estadística y Censo*, 2012. [Online]. Available: https://www.contraloria.gob.pa/inec/Publicaciones/subcategoria.aspx?ID_CATEGORIA=13&ID_SUBCATEGORIA=59&ID_IDIOMA=1. [Accessed: 08-Sep-2019].
- [9] B. Alcaldía de la Ciudad de Panamá, "Estudio de Mitigación de Cambio Climático - Iniciativa de Ciudades Emergentes y Sostenibles," Panamá, 2016.
- [10] MIVIOT, "Plan de Desarrollo Urbano de las Areas Metropolitanas del Pacífico y del Atlántico/ Volumen II Parte 2," Panamá, 1997.
- [11] M. de V. y O. T. (MIVI), "Documento Gráfico de Zonificación de la Ciudad de Panamá."
- [12] M. Abbas, B. Jason, and J.-B. Tristan, "The urban heat island effect, its causes, and mitigation, with reference to the thermal properties of asphalt concrete," *J. Environ. Manage.*, vol. 197, pp. 522–538, 2017.
- [13] C. M. Kauffman and J. M. Moran, *Our Changing Climate: Introduction to climate science*. Boston: American Meteorological Society, 2014.
- [14] E. Krause, "Analizar el calentamiento urbano mediante kriging," *Learn ArcGIS*, 2019. [Online]. Available: <https://learn.arcgis.com/es/projects/analyze-urban-heat-using-kriging/>.

Plan de desarrollo de una aplicación Web para el control y gestión de deforestación en el Ecuador – “Web-CONGESDEFO”

Development plan of a web application for the control and management of deforestation in Ecuador - “Web-CONGESDEFO”

Paola Segovia Toscano¹, Aránzazu Berbey-Álvarez^{2*}

¹ Universidad Internacional de La Rioja, programa de Máster de Diseño de Gestión de Proyectos Tecnológicos, Logroño, España

² Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: aranzazu.berbey@utp.ac.pa

RESUMEN— Este artículo presenta una propuesta de diseño de un plan de trabajo para el desarrollo de una aplicación Web para el control y gestión de deforestación en el Ecuador – “Web-CONGESDEFO”. La metodología utilizada corresponde a las buenas prácticas del PMBOK 5, las que permiten la dirección y la gestión de un proyecto como la implementación de una aplicación WEB apoyado en las Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) permitiendo tener una interacción entre los ciudadanos y el Ministerio del Ambiente (MAE) como ente regulador y controlador. Ofertando servicios en una oficina en línea en la cual se podrá realizar la gestión documental, incluyendo un módulo de denuncias.

Palabras clave— Aplicación web, deforestación, plan de desarrollo, PMBOK 5.

ABSTRACT— The main objective of this proposal consists in the design of a work plan for the development of a Web application for the control and management of deforestation in Ecuador - “Web-CONGESDEFO”. This proposal will apply the good practices of PMBOK 5, which allow the direction and management of a project such as the implementation of a WEB application supported by Information and Communication Technologies (ICT) allowing interaction between citizens and the public. Ministry of Environment (MAE) as regulator and controller. Offering services into online office where we can be carried document management out, including a complaint module.

Keywords— Web application, deforestation, development plan, PMBOK 5.

1. Introducción

Los proyectos, con código N° 00103570, del “Programa Integral Amazónico de Conservación de Bosques y Producción Sostenible” describen en su accionar sobre los cambios climáticos y persiguen disminuir la deforestación con la finalidad de reducir la pobreza y tener un desarrollo humano sostenible, mediante el buen uso del medio ambiente, específicamente de los bosques [1].

La principal amenaza en el cambio climático es el cambio del uso del suelo y seguidamente la ganadería y las actividades extractivas, como lo son la extracción del petróleo y la minería. La Dirección Ejecutiva de la Corporación de Manejo Forestal Sustentable (COMAFORS), considera que los aserraderos acopian

tablas y tablones, y se lo venden a los minoristas, por lo que considera que es más accesible el control de 10 empresas grandes que el control de 50,000 carpinterías del uso de madera ilegal para sus trabajos [2].

Ecuador ha planteado diferentes programas de control de deforestación tanto en la región andina como en la amazónica y en el resto del país, mediante el Ministerio del Medio Ambiente (MAE) buscando atenuar los efectos adversos que genera la deforestación. [1] [2].

La Dirección Ejecutiva de la Corporación de Manejo Forestal Sustentable (COMAFORS), contempla que los aserraderos acopian tablas y tablones, y se lo venden a los minoristas, por lo que considera que es más accesible el control de 10 empresas grandes que el control de 50,000 carpinterías del uso de madera ilegal para sus

Citación: P. Segovia y A. Berbey, “Plan de desarrollo de una aplicación Web para el control y gestión de deforestación en el Ecuador – “Web-CONGESDEFO””, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 29 de agosto de 2019. **Recibido con correcciones:** 29 de agosto de 2019. **Aceptado:** 7 de julio de 2020..

DOI.

Copyright: 2020 P. Segovia y A. Berbey. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

trabajos. En este sentido, se indica que existe un problema de informalidad de la industria de la madera de Ecuador. [3]

Esta realidad no es exclusiva de Ecuador, sino que la producción de madera es una actividad de importancia fundamental para la economía brasileña. De acuerdo con Lins da Silva [4], la ilegalidad en la producción de madera es de alrededor del 80% de la producción total. Esta madera ilegal "*se legaliza*" debido a las fallas en los sistemas de control y monitoreo de la cadena de suministro. Lins da Silva [4], analiza algunos problemas computacionales existentes en la gestión y el seguimiento del proceso de producción en Amazon Forest e identifica nuevos requisitos para crear un sistema de trazabilidad más eficiente y adecuado a las características de la región. La elaboración de una aplicación Web para la simulación, procesamiento y toma de decisiones para el aprovechamiento de la madera en plantaciones requiere del diseño de un plan de trabajo para su posterior desarrollo. FOREST [5], es una aplicación que esta soportada sobre Microsoft Visual Studio 2008, utiliza C# como lenguaje, y Microsoft Access para la gestión de bases de datos. FOREST está compuesta por 3 módulos de trabajo. El primero se encarga de la evaluación del potencial de madera, el segundo módulo estima los costos del sistema de aprovechamiento y el tercer módulo realiza el análisis financiero. La evaluación del potencial de madera en pie permite conocer el valor de la plantación, mediante el análisis del inventario de un área seleccionada, la aplicación de sistema de precios y los volúmenes de los lotes de madera en el mercado [5].

Cantergiani [6] plantea un programa llamado EuroGEOS del proyecto del 7º Programa Marco de la Comisión Europea con la finalidad de crear un Sistema de observación ambiental de la tierra que se desarrollará en las áreas temáticas de: Cubierta Forestal, Sequía y Biodiversidad [6].

El Sistema de Información Geográfico para la Universidad Nacional del Este de Paraguay propone facilitar la gestión de los recursos de construcción y viales, mediante la utilización de software libre brindando la información necesaria para toda la comunidad. El funcionamiento del mismo es mediante la utilización de un dron autónomo para registrar el estado de la situación geográfica y una máquina virtual que simula el esquema. [7], es decir, se presenta un proyecto sobre "un geoportal funcional, para obtener bases para la

proyección de futuros proyectos que involucren datos espaciales en diversos ámbitos, además de lograr la difusión del software libre como una alternativa válida en el desarrollo de un Sistema de Información Geográfico (SIG)" [7].

Casco [8] expone un proyecto que tiene la finalidad de geolocalizar rápidamente los árboles endémicos de la Reserva Biológica Pindo Mirador (Ecuador), basándose en la plataforma Android y gestionando su base de datos con SQLite apoyada en Google Maps, generando la ayuda apropiada para los turistas [8].

Cordero [9], plantea una aplicación web para representar los indicadores desempeño ambiental en Costa Rica facilitando la toma de decisiones con respecto a la sostenibilidad. Como conclusión destacada se considera que la elaboración de una herramienta tecnológica y la elaboración de un manual facilitarían la aplicación de la matriz de indicadores" [9].

Simanfor [10] es una aplicación web desarrollada gracias al financiamiento del Ministerio del Ambiente y del Ministerio de ciencia y tecnología de España utilizando la dirección electrónica www.simanfor.es, gratuita que tiene la finalidad de simular alternativas selvícolas, brindando servicios de carga, consulta de inventario, creación de modelos y generación de escenarios o gestión de usuario. El sistema está desarrollado en el lenguaje Visual. NET [10].

Ochoa [9] presenta una página web con un índice para la evaluación de la condición ecológica de los bosques tropicales en México de acuerdo con 5 categorías para el análisis de 44 parcelas forestales normalizando con valores entre 0 y 1, todos estos resultados son almacenados y presentados al usuario de forma fácil y transparente en internet. En Valenzuela [11] se presenta la utilización del Modelo de Simulación Hidrológica SWAT (Herramienta para la evaluación de suelo y agua).

Andrade [12] manifiesta que el desarrollo de una aplicación web para la gestión de inventario de la estación biológica Pindo Mirador (Ecuador) se apoyó en herramientas de software y multiplataforma con migración de hosting trabajando con PHP 7, manteniendo una interfaz muy amigable con finalidades específicas, pero conservando la característica de escalable gracias al proceso ágil de desarrollo SCRUM [12].

Vega [13], plantea un sistema multiplataforma para el Ministerio del Ambiente Ecuatoriano (MAE),

desarrollado en la aplicación web con un servidor Apache, lenguaje de programación basado en PHP, JavaScript y HTML y una base de datos PostgreSQL; en la aplicación móvil utiliza un lenguaje de programación SDK java y como base de datos utiliza SQLite, lo que permite la interacción adecuada con el usuario con la finalidad almacenar y procesar la información del Inventario Forestal [13].

RECUPERAR [14] es un proyecto bajo el financiamiento por el 7º Programa Marco en la Unión europea, que tiene como finalidad la lucha contra la deforestación y la degradación de los bosques en la región tropical del proceso REDD (Reducción de Emisores de Deforestación y Degradación de los bosques), es un sistema que, mediante imágenes satelitales para la medición, reporte y verificación con un 90% de precisión debido a que se evalúa los datos de forma independiente, tiene un mapeo de 0.5 a 1ha. Trabaja con datos de Sentinel-2 y debe ampliarse los datos SAR en las regiones nubladas para combinar con los datos VHR.

IKONOS[15] es una aplicación Web para el monitoreo forestal mediante teledetección y herramientas de análisis de imágenes a través de la Web, el demostrador llamado ForoWeb está desarrollada en lenguaje Java 5.0 interfaz de programación API y la interfaz trabajada en NetBeans 4.1., en las conclusiones de este estudio se puede observar un resultado muy importante.

La Gestión de la red de caminos forestales es un estudio que utiliza las tecnologías geoespaciales, para identificar y manipular los posibles problemas en los puntos críticos presentados en las carreteras forestales, para lo cual se desarrolló una combinando el geoprocetamiento y la tecnología geoespacial, esta permite la optimización eficiente de una manera muy fácil y útil [16].

De acuerdo con Bravo [17], SIMANFOR tiene como objetivo simular las alternativas de gestión forestal sostenible que integran módulos para gestionar inventarios forestales y de esta manera mantener la integridad de los ecosistemas. SIMAFOR es una aplicación sencilla de usar, está abierta para todo el público es una aplicación compatible con Microsoft y este tiene su propio software los nuevos desarrollos de esta aplicación están basados en la filosofía web 2.0 para

aprovechar la información de los usuarios así manejar de una manera óptima la aplicación [17].

Bunjl Forest Watch [18] es un Servicio de Monitoreo Forestal, para proporcionar información sobre los disturbios forestales reciente de sus zonas, especialmente sobre la tala ilegal de bosques y el desmonte, en sus objetivos también está el desarrollo de redes entre personas ambientalistas los que van a estar conectados digitalmente, esta herramienta podrá proporcionar un enfoque específico de autoselección complementaria a las áreas de alto valor de conservación donde los grupo locales desean proteger sus bosques de las amenazas externas. Sousa [19] presenta una aplicación de los datos geográficos y estadísticos de Ecología: La red cerrada de Ontología Brasileña y razonamiento cualitativo. Este estudio se enfocó en la vinculación de los modelos de razonamiento cualitativos, proporcionada por las agencias gubernamentales brasileñas y estudios científicos, los cuales han seguido la metodología que está basada en los datos GeoLinked,

Ecoinformática [20] desarrolló una aplicación web de nombre; ForestPlots.net la misma que fue diseñada como un repositorio de inventarios de bosques tropicales intactos a largo plazo, también permite a las personas obtener información de una manera muy rápida y sencilla.

El Telecoupling GeoApp [21] es una aplicación web-SIG para analizar sistemáticamente telecouplings y el desarrollo sostenible, y explorar las interacciones socioeconómicas y ambientales entre los sistemas humanos naturales acopladas a través de distancias. También nos proporciona nuevos conocimientos sobre los desafíos globales de sostenibilidad [21].

En Sagar [22] se presenta un sistema de tiempo de datos basado en web Acquisition, el objetivo es la de monitorear las condiciones climáticas ya que esta adquiere información a través de los sensores, gracias al micro ARM 7 para comparar con los valores de umbral predefinidos y la señal procesada se comunica en serie al ordenador personal utilizando IEEE 802.4.15 (ZIGBEE), todos los datos obtenidos son representados gráficamente, utilizando el software Piton y LabVIEW los mismos que se utiliza para propósitos de simulación y análisis de datos [22].

Las plataformas tecnológicas son herramientas que con el pasar del tiempo han ido evolucionando de

acuerdo con las exigencias del mundo actual y del mercado que se desarrolla por medio de Internet [23].

Las plataformas han ido alineándose a las prioridades de la industria con la investigación que desarrolla la Unión Europea abarcando una cadena de valor económico en donde se garantiza la solidificación de los conocimientos generados gracias a la investigación y esta transformada en tecnología [24].

Las fases para el desarrollo de un proyecto o una plataforma tecnológica son:

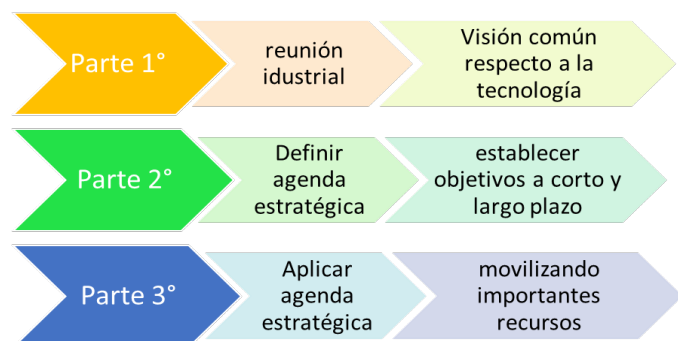


Figura 1. Fases de desarrollo del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

La importancia y el beneficio de utilizar plataformas tecnológicas es la fácil instalación y posee mucha información, la asistencia técnica es pronta y se pueden realizar actualizaciones competitivas [23].

2. Metodología

Para desarrollar el proyecto se debe definir los procesos y actividades que sean de vital importancia para tener un proyecto controlado, con la final de cumplir con las expectativas de los usuarios considerando el alcance planteado inicialmente. [25]

Para el proceso de desarrollo del proyecto se debe seguir un proceso sistematizado, que consta de los siguientes pasos:

- Acta de constitución del proyecto.
- Planificar la dirección del proyecto.
- Encaminar el trabajo del proyecto por medio de dirección y gestión de trabajo.
- Realizar el control y seguimiento del proyecto.
- Realizar el control de los cambios necesarios.
- Realizar el cierre del proyecto [25].

2.1 Gestión del alcance

El alcance debe enfocarse directamente en la definición y el control de lo que se debe incluir y lo que se debe omitir en el proyecto. En la tabla 1 se presentan los entregables que se van a desarrollar e implementar para el desarrollo de la aplicación [26].

Tabla 2. Entregables del proyecto

No.	Entregable/producto
1	Enlace de comunicación para la transferencia y recepción de datos entre el Ministerio del Ambiente y Monteverde y la documentación para llevar a cabo el diseño, la técnica y los usuarios.
2	Mejoramiento de hardware y software para el duplicado de la base de datos en el Ministerio del Ambientes y la documentación de diseño, la técnica y los usuarios.
3	Aplicativo para integrar el duplicado de la base de datos del MAE y el sistema de información de registro de los solicitantes con la documentación en diseño, la técnica y de usuario.
4	Módulos de fichas de solicitud de deforestación al portal web del Ministerio del Ambiente y su documentación de: diseño, técnica y usuarios.
5	Módulos de mejora para el aplicativo para dispositivos móviles (APP) y la documentación correspondiente de diseño, técnica y usuarios.
6	Integración de un sistema telefónico automático de respuesta interactiva (IVR) con la respectiva documentación de diseño, técnica y para los usuarios

Fuente: Elaboración propia.

Para facilitar la planificación y ejecución de los procesos se dividen las actividades en paquetes de trabajo o EDT (estructura de descomposición de trabajo) [25].

2.2 Requerimientos, entregables

A modo de ejemplo y debido a la limitación de espacio, se presenta los requerimientos y entregables resumidos del paquete del trabajo 2. Los requerimientos mínimos que debe considerarse se detallan a continuación, lo mismo que servirá como una guía para el desarrollo del proyecto y de cada uno de los entregables. [25]

Enlace de comunicación para la transferencia y recepción de datos entre el Ministerio del Ambiente y Monteverde y la documentación para llevar a cabo el diseño, técnica y usuarios.

- Enlace de comunicación por medio de fibra óptica con una topología de tipo punto a punto.

- Implementar una seguridad perimetral para los enlaces de datos.
- Compatibilidad de la red de datos en los protocolos de comunicación.
- Instalación de dispositivos de comunicación en los dos extremos.
- Ancho de banda con velocidad mínima de 50Mbps con configuración 2:1.

Mejoramiento de Hardware y software para el duplicado de la base de datos en el Ministerio del Ambiente y la documentación de diseño, técnica y usuarios.

- Solución aplicada a la infraestructura, específicamente al clúster de servidores
- Solución en el proceso de almacenamiento de datos y respaldo (Backup).
- Incremento de la base de datos de 25 Tb.
- El proceso de adquisición de la licencia de software tiene que estar a nombre de MAE.

Aplicativo integrar el duplicado del MAE y el sistema de información de registro de los solicitantes con la documentación en diseño, técnica y de usuario.

- Desarrollar aplicativos basados en .net, web y con las herramientas que posee Microsoft.

Módulos de fichas de solicitud de deforestación al portal web del Ministerio del Ambiente y su documentación de: diseño, técnica y usuarios.

- Permitir adjuntar archivo en diferentes formatos.
- Poseer formulario de solicitudes en línea.
- Incorporar el seguimiento de documentación (solicitudes).
- Permitir la consulta de la situación actual del documento (solicitud).
- Mantener activa una función de enviar informes y el contacto con la institución por medio de mensajes.

Módulos de mejora para el aplicativo para dispositivos móviles (APP) y la documentación correspondiente de diseño, técnica y usuarios.

- Permitir adjuntar archivo en diferentes formatos.
- Poseer formulario de solicitudes en línea.
- Incorporar el seguimiento de documentación (solicitudes).
- Permitir la consulta de la situación actual del documento (solicitud).
- Incorporar una opción de denuncias.
- Integración de un sistema telefónico automático de respuesta interactiva (IVR) con la respectiva documentación de diseño, técnica y usuarios.

- Incorporar el seguimiento de documentación (solicitudes).
- Incorporar una opción de denuncias.

2.3 Paquetes de trabajo

Para el desarrollo del presente proyecto se definen cinco paquetes de trabajo en los mismos que se detallan las tareas y responsabilidades (ver tabla 3). Como ejemplo debido a la limitación de espacio, se presenta el paquete de trabajo 2 (ver tabla 4).

Tabla 3. Paquetes del proyecto

No.	Paquete de trabajo	Responsable
1	Gestión de integración del proyecto	Líder del proyecto
2	Gestión de la Infraestructura TI(Técnico)	Líder infraestructura TI
3	Gestión aplicativos informáticos (Técnico)	Líder de los sistemas de información.
4	Plan de difusión	Líder de comunicaciones
5	Plan de explotación	Líder de comunicaciones

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Paquete de trabajo #2

Paquete de trabajo	PW- 02	Fecha de inicio: 26-sep-19
Responsable:	Líder Infraestructura TI	
Título del paquete	Gestión de la Infraestructura TI (Técnico)	
Objetivos	Optimizar la configuración y garantizar la disponibilidad de la infraestructura tecnológica que se empleará en el desarrollo del aplicativo que será incorporada en la plataforma virtual del MAE.	
Descripción del trabajo		
Tarea 1.1	Responsable: Líder de Infraestructura	Implementar los enlaces para la comunicación y transferencia de información entre el MAE y Monteverde
Tarea 1.2	Responsable: Líder de Infraestructura TI	Implementar los requerimientos tanto en software como en hardware y en BD del aplicativo.
Tarea 1.3	Responsable: Líder de desarrollo SW	Implementar el IVR (Respuestas de voz interactiva)
Entregables:		
Entregable 1.1	Enlace de datos implementado	
Entregable 1.2	Hardware y software implementado	
Entregable 1.3	Respuesta de voz interactiva implementado	

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Gestión del tiempo

Es indispensable gestionar el tiempo para el desarrollo del proyecto, con la finalidad de asegurar el cumplimiento de plazos establecidos con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos inicialmente dentro del tiempo estipulado. [25]

Como herramienta principal para la gestión de tiempo se tiene el cronograma de actividades, en el mismo que se detalla las actividades y su duración estimada considerando 15 meses calendario (agosto 2019-noviembre 2020). A continuación, se muestra la figura 2 con el cronograma detallando de actividades con fechas de inicio y finalización estimadas.

ACTIVIDADES	F. INICIO	F. FINAL	Días
INICIO	6-ago-19	21-ago-19	12
Acta de constitución	6-ago-19	15-ago-19	8
Identificación de interesados	16-ago-19	20-ago-19	3
Firma del acta de constitución (Kick-off)	21-ago-19	21-ago-19	1
PLANIFICACIÓN	22-ago-19	25-sep-19	25
Plan de dirección (PDP)	22-ago-19	11-sep-19	16
Desarrollo EDT	22-ago-19	7-sep-19	13
Cronograma (planificación)	10-sep-19	21-sep-19	10
Plan de riesgos	10-sep-19	14-sep-19	5
Planificación de divulgación y explotación	17-sep-19	21-sep-19	5
Presentación del PDP y cronograma	25-sep-19	25-sep-19	1
DESARROLLO	26-sep-19	1-nov-20	138
Implementar plan de divulgación	26-sep-19	1-nov-20	138
Implementar enlace de datos	26-sep-19	13-dic-19	57
Entrega de enlace	14-dic-19	14-dic-19	1
Implementar infraestructura (Hw-SW)	26-sep-19	7-nov-19	31
Entrega de infraestructura implementada	8-nov-19	8-nov-19	1
Implementación de integración BD	29-oct-19	28-mar-20	109
Entrega de integración BD	29-mar-20	29-mar-20	1
Implementar gestión documental - denuncias	26-sep-19	13-mar-20	99
Entrega gestión documental - denuncias	14-mar-20	14-mar-20	1
Implementación respuesta de voz interactiva	4-feb-20	25-abr-20	59
Entrega respuesta de voz interactiva	26-abr-20	26-abr-20	1
Implementación APP	29-abr-20	7-oct-20	116
Entrega APP	8-oct-20	8-oct-20	1
ACTIVIDADES	F. INICIO	F. FINAL	Días
Seguimiento y control	22-ago-19	14-oct-20	300
Pruebas e informes de funcionamiento 1	22-ago-19	1-oct-19	30
Pruebas e informes de funcionamiento 2	2-oct-19	12-nov-19	30

Figura 2. Paquete de trabajo. **Fuente:** Elaboración propia.

2.5 Gestión de recursos económicos

Para la gestión de recursos económicos la herramienta más fiable es la realización de un presupuesto, para lo cual se debe tener en consideración lo estipulado en las actas de constitución, plan de dirección de proyectos, políticas de contratación y tecnología actual. En la tabla a continuación, se puede observar la estimación de costes en dólares americanos (1 Dólar = 0.89 euro)¹ para el presupuesto.

El presupuesto planteado refleja el manejo del proyecto en el aspecto financiero, observando que el 74% de gasto proyectado corresponde a las actividades de recursos humanos con un valor de \$235,901.92. En un segundo lugar, se refleja los gastos en Redes de datos con un porcentaje de 22% que corresponde a \$72,000.00. La inversión que ocupa el tercer lugar es la inversión en comunicaciones con un porcentaje de 3% con una correspondencia de \$9,600.00 en cuarto lugar se observa la inversión en infraestructura de software y hardware con 1% y finalmente en porcentaje de gastos, se invierte 0.3% en el aplicativo de software.

2.6 Gestión de Calidad

La gestión de calidad es un proceso sistematizado que tiene la finalidad de garantizar el grado de confianza que proporciona un sistema, satisfaciendo las necesidades de los usuarios. [25], [27]. La gestión de calidad debe mantenerse documentada con un manual de calidad que establezca los procedimientos o técnicas que se revisara para confirmar el cumplimiento o incumplimiento con la realización de auditorías periódicas. [27]

2.6.1 Aseguramiento de la Calidad

Para garantizar la competitividad de los servicios es indispensable optimizar la calidad en el mismo, es decir hacer las cosas bien desde un principio. La competitividad de los servicios es la capacidad de producir bienes y servicios de forma eficiente, precios decrecientes y calidad creciente, de tal manera que se pueda competir y lograr mayor aceptación en el mercado tanto dentro como fuera del entorno, un factor importante para la competitividad en las empresas es la calidad en el servicio [27].

¹ De acuerdo al Banco Central del Ecuador en la fecha 7 de agosto de 2019

Tabla 5. Presupuesto

Fuente: Elaboración propia.

Actividades	Descripción	Can.	Valor / mes	Meses	V. Total	V. total	%
Recursos Humanos	Gerente del proyecto	1	\$ 2.381,00	16	\$38.096,00	\$235.901,92	74%
	Líder de comunicaciones	1	\$ 1.017,56	16	\$ 16.280,96		
	Líder en redes de datos	1	\$ 1.017,56	16	\$ 16.280,96		
	Líder de infraestructura	1	\$ 1.017,56	16	\$ 16.280,96		
	Líder servidores	1	\$ 1.017,56	16	\$ 16.280,96		
	Líder base de datos	2	\$ 1.017,56	16	\$ 16.280,96		
	Líder de Sistemas de información	1	\$ 1.017,56	16	\$ 16.280,96		
	Desarrolladores	6	\$ 1.005,27	16	\$ 16.084,32		
	Analista de requerimientos	4	\$ 1.018,32	16	\$ 16.293,12		
	Analistas de pruebas	3	\$ 1.018,32	16	\$ 16.293,12		
	Arquitecto de Software	1	\$ 1.018,32	16	\$ 16.293,12		
	Líder de documentador	4	\$ 997,28	16	\$ 15.956,48		
	Líder de calidad	1	\$ 1.200,00	16	\$19.200,00		
Comunicaciones	Publicaciones, seminarios, conferencias (periódico)	2	\$ 1.200,00	8	\$ 9.600,00	\$ 9.600,00	3%
Redes de Datos	Implementación enlaces de datos	1	\$4.500,00	16	\$72.000,00	\$ 72.000,00	22%
Infraestructura hardware y software	Implementación de servidores	2	\$ 680,00	1	\$ 680,00	\$ 1.680,00	1%
	Implementación almacenamiento y backups	1	\$ 200,00	1	\$ 200,00		
	Implementación solución duplicación en la entidad	1	\$ 800,00	1	\$ 800,00		
Aplicativo software	Aplicativo transaccional	1	\$ 500,00	1	\$ 500,00	\$ 1.600,00	0.3%
	Aplicativo APP	1	\$ 300,00	1	\$ 300,00		
	Aplicativo IVR	1	\$ 300,00	1	\$ 300,00		
	Evaluación del prototipo	1	\$ 500,00	1	\$ 500,00		
Total						320.781,92	100%

La calidad está directamente relacionada con la capacidad de satisfacer a los usuarios de forma honesta, justa, solidaria y transparente. La calidad también significa realizar correctamente cada paso del proceso ejecución, la importancia se basa en que la satisfacción de los stakeholders [28].

2.6.2 Métricas de Calidad

Análisis de beneficio:

De acuerdo con David [29] el análisis de costo-beneficio o coste-beneficio es un término que se enfoca en a la técnica que utiliza para evaluar o que facilita la evaluación en los proyectos o propuestas, que tiene la finalidad de evaluar los proyectos de manera informal para la toma de decisiones de acuerdo con la inteligencia de la acción humana.

Costo de calidad: De acuerdo con Turnero [30], se entiende por costo de calidad al factor económico que se

emplea para solventar la calidad que se requiere de un producto o servicio y se considera el gasto que generan los errores.

2.6.3. Herramientas y técnicas

Para el desarrollo del proyecto se propone el uso de herramientas y técnicas de la ingeniería industrial tales como: Diagrama Ishikawa [31], flujograma [32], lista de verificación [33], check list [33], diagrama de Pareto [34], benchmarking [34], toma de muestras estadísticas [35] y reuniones estratégicas [35].

2.6.4. Auditar la calidad

Durante el desarrollo del proyecto es indispensable realizar auditorías de acuerdo con cada hito definido anteriormente en el cronograma lo que nos permitirá determinar el cumplimiento de las políticas, de los procesos y a su vez de los procedimientos que mantiene la organización dentro del proyecto con el apoyo de prueba y análisis, las cuales mínimo debe incluir:

- Identificación de las buenas prácticas implementadas
- Identificación de inconformidades, brechas y fallas.
- Comunicar las buenas prácticas empleadas en otros proyectos con similitud en la organización o el sector
- Mejorar positiva y proactivamente la meja en la implementación de procesos que beneficien al equipo incrementado su eficiencia.
- Destacar los aportes que ha tenido cada auditoria de experiencias aprendidas de la organización

Posteriormente cualquier esfuerzo que se haga para corregir una brecha tiene que ser menor el costo de la calidad e incrementar la aceptación del producto final por parte de los usuarios finales.

El proceso de auditoria puede ser realizado por personas que cumplan con el rol de auditores, sean estos internos o externos; los mismo que cumplirán con el fin de confirmar la implementación de los cambios solicitados y aprobados en cualquier proceso sea correctivo, preventivo o arreglo de imperfecciones.

2.7 Gestión de los recursos humanos

La gestión de los recursos humanos es el proceso que nos permite reconocer y plasmar los roles de cada uno de los integrantes ejecutores del proyecto definiendo de acuerdo con sus perfiles las responsabilidades de cada uno de los integrantes.

La importancia de gestionar el talento humano es generar la calidad de vida laboral y, la identificación que ésta hace del factor humano como ventaja competitiva de la organización.

Una organización genera ventajas competitivas a través del personal, dándoles un trato de acuerdo con sus competencias más valiosas, logrando que el personal tenga competencias únicas para formar grupos de alto rendimiento [36].

Los criterios que se utilizan para medir la calidad se basan en la consideración de diferentes factores como lo son, riesgo, oportunidades del mercado, requerimientos de beneficios, presupuesto, tiempo entre otros [37].

Para el llevar a cabo el programa es necesario definir los roles que cada uno de los integrantes del proyecto van a desarrollarlo, en la tabla 6 se puede observar los roles y las responsabilidades que va a tener cada uno de los integrantes del proyecto. De acuerdo con la tabla 6 se definen las funciones de cada uno de los integrantes del proyecto de acuerdo con su experiencia y capacidades.

2.8 Matriz RACI

La matriz de asignación de responsabilidades (RACI), asegura que los integrantes del equipo de trabajo están definidos de acuerdo con el alcance y las tareas de forma óptima y eficaz. [38]. Una matriz de asignación de responsabilidad [39] también conocida como matriz RACI [40] o gráfica de responsabilidad lineal [41], describe la participación de varios roles en la realización de tareas o entregables para un proyecto o procesos de negocio. RACI es un acrónimo derivado de las cuatro responsabilidades clave más utilizadas: Responsable, Responsable, Consultado e Informado [42]. La tabla 4, matriz de RACI, se utiliza para aclarar y definir roles y responsabilidades en proyectos y procesos multifuncionales o departamentales.

Tabla 6. Definición de roles y responsabilidades

Rol	Funciones	Responsabilidad	Participantes
Junta Directiva	Aseverar la sistematización de la alta gerencia. Verificar la disponibilidad del presupuesto económico. Verificar que la sistematización tanto del control interno como el control de riesgos sean los adecuados.	-Establecer un plan estratégico para la empresa. -Verificar el desempeño de la alta dirección. -Optimizar la implementación de una estructura organizacional adecuada, con la inclusión de un control robusto y un programa eficaz de divulgación.	8
Presiente - Gerente general	Cumplir decisiones tomadas por la junta directiva y sus integrantes en los proyectos.	-Apoyar las actividades de la institución en cuestión a proyectos. -Informar a la junta directiva del estado de las actividades que se desarrollan en el proyecto. -Emitir sugerencias de acuerdo a los cambios que pueda requerir el proyecto y el impacto de los mismos	1 persona Gerente de la institución
Gerente de proyectos	Liderar y responsabilizarse por los procesos de planificación, ejecución, control y supervisión del proyecto	-Es el único responsable de la ejecución del proyecto en su totalidad. -Diseñar y definir el plan de dirección del proyecto. -Verificar que el canal de comunicación entre los participantes es el adecuado y el más eficiente.	Integrante con perfil adecuado para este rol.
Líder funcional	Ratificar la disponibilidad de los recursos, según lo estipulado en el plan de la dirección del proyecto.	-Solución de incidencias con el apoyo del gerente general e integrantes de cada una de las áreas. Coordinación con la gerencia de la disponibilidad de recursos de acuerdo al plan para la correcta dirección del proyecto.	Se especifican en la matriz RAM y RACI
Líderes técnicos	Desarrollo de las actividades que van a la par con lo estipulado en el plan de dirección del proyecto	-Cumplir con las responsabilidades asignadas por la alta dirección. -Presentación de avances con los respectivos informes de estado de las actividades desarrolladas.	Integrante con perfil adecuado para este rol.
Stakeholders	Personas y organizaciones que afectan directa o indirectamente en el proyecto independientemente de su participación o no en él.	-Obedecen al interés y posición de acuerdo al proyecto.	-Entidad Reguladora -Proveedores -Funcionarios de la institución.
Usuarios finales	Aprovechar el producto final desarrollado	-Intervenir en la definición del proyecto -Validar las pruebas de funcionamiento.	-Beneficiado del proyecto

Tabla 7. Matriz RACI

1	2	3	4	5	6	7	8
Inicio							
Acta de constitución	A	R	R	I	I	I	I
Identificación de interesados	C	I	R	I	I	I	I

Kick-off	I	I	R	I	I	I	I
1: actividad/rol; 2: Junta directiva, 3: presidente, 4: gerente general, 5: líder funcional financiero, 6: líder funcional contratos, 7: líder de RRHH, 8: líder técnico. R: Responsable., A: Aprobado, C:Consultado: I:Informado							

De acuerdo con el cronograma (ver figura 2), la primera actividad a llevarse a cabo es el acta de constitución, teniendo como responsable al presidente y al gerente general, mientras que la junta directiva es el encargado de aprobar y finalmente se debe informar a los líderes de las diferentes áreas si considerar al líder de pruebas.

2.8.1. Identificación de riesgos

El proceso de la identificación de riesgo es el punto clave para adelantarnos a los acontecimientos que pueden suscitarse en el transcurso del desarrollo del proyecto, es importante identificar categorías las mismas que nos permitan realizar un análisis de los posibles riesgos en cada uno de los paquetes de trabajo. [43]. La siguiente tabla 8 presenta los riesgos que se pueden identificar y que pueden estar asociados al proyecto.

Tabla 8. Identificación de riesgos, categoría y resultados

No	Categoría	Riesgo	Resultado
1	Tecnológico	Tecnología seleccionada o implementada no responde a la solución del problema	Herramientas empleadas no responden a las necesidades de los usuarios
2	Tecnológico	Entorno de desarrollo	Indisponibilidad y baja calidad de las herramientas que se van a emplear en la integración de la plataforma tecnológica
3	Tecnológico	Procesos y metodología	Reprocesos y atrasos en desarrollo del producto por procesos y metodología mal definidas y acordadas en el proceso de desarrollo del software y su seguimiento por el equipo de desarrollo
4	Tecnológico	Alcance del producto final	Riesgos asociados con el tamaño general de los sistemas informáticos a implementar o modificar
5	Recursos	Falta de asignación de presupuesto	Termino, suspensión o atraso del proyecto
6	Recursos	Rotación de personal	Reprocesos, atraso del cronograma

7	Recursos	Conflicto personal	Retraso en el cumplimiento de las actividades
8	Entregables	Defectos de aplicativos	Herramientas mal configuradas, lentitud en las respuestas, indisponibilidad de los aplicativos
9	Entorno	Cambios en las especificaciones de los requisitos	Factores externos, políticos, normas que puedan afectar las definiciones de los requisitos definidos
10	Recursos	Proveedores no entregan en el plazo los productos o servicios	Retraso en el cronograma del proyecto, aumento del presupuesto

3. Propuesta de evaluación del prototipo

En Chiarani [44] se presentó una propuesta de criterios para la evaluación de plataformas de OS factibles. Segura realiza una revisión de modelos de evaluación de la calidad del software para el aprendizaje. Se analizan las distintas dimensiones que evalúan los modelos existentes tales como aspectos técnicos, facilidades de uso, contenido, estéticas y económicas.

Vásquez [45] propone un modelo liviano de medidas para evaluar un proyecto de mejora de procesos de software, con el cual se perseguía ayudar a las empresas de desarrollo de software colombianas a determinar si el proceso de mejora que implementan está siendo eficaz con relación a los objetivos y metas establecidas al inicio del proyecto.

Estayno [46] describen las líneas de investigación y desarrollo que se realizarán en el marco de un proyecto mayor referido a calidad de *software* orientado a Pymes de la región NEA del país, en el contexto de las iniciativas gubernamentales de promoción de la industria del software.

Fernández [47] presenta una propuesta de matriz de evaluación para software libre y, un conjunto de parámetros técnicos que facilitarán la evaluación de diferentes programas de aplicación de software libre.

Mendoza [48-49] se presenta un algoritmo para la aplicación del Modelo Sistemático de Calidad (MOSCA) para la estimación de la calidad de los Sistemas de Software que garantiza la relación sinérgica entre las características de la empresa y las necesidades del

usuario, de tal manera de guiar el proceso de evaluación y garantizar la calidad sistémica [48].

De esta selección de experiencias, Chiarani [44], Vásquez [45], Estayno [46], Fernández [47] y Mendoza [48-49] se toman en cuenta 2 (dos) criterios de evaluación la selección de un panel de expertos en evaluación de software y la selección de una metodología para la evaluación del prototipo, en este caso el *software*.

Por este motivo, para la evaluación del prototipo se elige la norma internacional ISO 9126 que es un estándar internacional para la evaluación de un producto de *software*. Esta norma será utilizada por un 5 panel de expertos, cuyo perfil principal se encuentra en el área de sistemas de ingeniería computacionales ingeniería de *softwares*, redes, etc. Este panel de expertos debe estar constituido por académicos del área de sistemas computacionales, informática, redes, ingeniería de *software* pertenecientes a universidades, centros de investigación, institutos superiores de enseñanza de la informática.

Esta comisión conformada por 5 expertos utilizara las métricas externas, internas, métricas de calidad de uso, métricas de productividad y de satisfacción del usuario establecidas en la norma ISO internacional 9126, que es un estándar internacional para la evaluación de un producto de software [50].

4. Resultados

El presente documento, permitió plantear y aplicar la metodología de diseño y gestión de proyectos con las respectivas etapas especificadas en la Guía PMBOK 5ta edición, en la planeación, explotación e innovación que se han adquirido en la realización del master.

En este artículo se presentó el desarrollo de un estado del arte de la problemática de la deforestación ilegal. En este artículo se presenta el desarrollo de una propuesta del plan de trabajo para el desarrollo de una aplicación Web para el control y gestión de deforestación en el Ecuador – “Web-CONGESDEFO”, La estructura presentada del plan de trabajo correspondió a la definición del alcance, objetivos, requisitos y partes interesadas para el desarrollo del proyecto como se puede apreciar en el desarrollo de los apartados correspondientes.

Se presentó la selección de las metodologías y guías de desarrollo para el desarrollo de la solución y la

gestión propuestas del proyecto. En este sentido, en los procesos de gestión general se establecieron cinco fases para este plan de trabajo para el desarrollo de un proyecto *software* como lo son: inicio, planificación, ejecución, control y seguimiento y cierre. Adicionalmente se determinó que la fase de Ejecución (3) y Control y seguimiento corresponde a un 90.66 % de la propuesta de diseño de un plan de trabajo para el proyecto de desarrollo del *software*.

Se identificaron los perfiles requeridos, roles y responsabilidades en la estructura de la gestión propuesta para el adecuado desarrollo del plan del proyecto.

Se especificó la estructura de los 5 paquetes de trabajo con sus líderes, tareas y los entregables esperados. Se presentó el cronograma para el desarrollo del trabajo de la propuesta de desarrollo de *software* y se estimó el presupuesto del para el desarrollo del proyecto en correspondencia con los paquetes de trabajo indicados. En este sentido, el presupuesto refleja el 74% de gasto proyectado corresponde a las actividades de recursos humanos. En un segundo lugar, se refleja los gastos en redes de datos con un porcentaje de 22%. La inversión que ocupa el tercer lugar es la inversión en comunicaciones con un porcentaje de 3%, en cuarto lugar se observa la inversión en infraestructura de *software* y *hardware* con 1% y finalmente en porcentaje de gastos, se invierte 0.3% en el aplicativo de *software*.

Se establecieron los procesos de la gestión de riesgos y las métricas (indicadores) de la calidad. En sentido, como aprecie en el apartado correspondiente, se identificaron los riesgos con sus respectivas categorías (tecnológica, recursos, entorno y los entregables). Con respecto a la propuesta de evaluación del prototipo, se realizó la revisión de una serie de experiencias previas y se recogen 2 (dos) criterios de evaluación: el primero corresponde a la selección de un panel de 5 expertos en evaluación de *software* con un perfil académico y el segundo a la selección de una metodología para la evaluación del prototipo, la norma internacional ISO 9126 que es un estándar internacional para la evaluación de un producto de *software*.

5. Conclusiones

El desarrollo de este plan de trabajo para el desarrollo de una aplicación web para el control y gestión de deforestación en Ecuador, es de gran utilidad ya que

mientras un proyecto mejor planeado y estructurado se encuentre, menos posibilidad de fracaso tendrá, por lo que aplicando las buenas prácticas del PMBOK se consiguió un análisis adecuado de todos los factores que benefician y afectan al proyecto y a la vez a su desarrollo.

Las soluciones informáticas son el soporte más confiable en el apoyo para el control de actividades como es el caso de la deforestación en el Ecuador, mediante la planificación de una solución tecnológica que optimice el control deforestal, se conseguirá la disminución de la tasa de deforestación apoyando beneficiosamente a la población y frenando el cambio climático que se presenta en la actualidad.

En la gestión documental se especifica los trámites que puede realizar el ciudadano en línea, para esta actividad se especificaron los paquetes de trabajo, los mismos que facilitan el trabajo de un proyecto. Gracias a esto se aplicó una planeación en las buenas prácticas en cuestión a metodología y estándar, lo que abarcó los requisitos para la gestión de proyectos de esta índole.

La implementación de esta plataforma es importante la interacción con los beneficiados por lo que implementar un módulo de denuncias, facilita el conocimiento efectivo al Ministerio del Medio Ambiente sobre la tala ilegal y sus respectivas sanciones de acuerdo al código orgánico.

AGRADECIMIENTOS

Me permito agradecer a la doctora Aránzazu Berbey Álvarez de la Universidad Tecnológica de Panamá como colaboradora activa para el desarrollo del presente artículo.

REFERENCIAS

- [1] Ecuador Explorer. (2018). Deforestación y pérdida de especies en Ecuador. Obtenido de Ecuador Explorer: <http://www.ecuadorexplorer.com/es/html/deforestacion-y-perdida-de-especies.html>
- [2] El Universo. (2011). Ecuador Registra una de las tasas de deforestación más altas en Latinoamérica. Obtenido de El Universo: <https://www.eluniverso.com/2011/10/01/1/1430/ecuador-registra-tasas-deforestacion-mas-altas-latinoamerica.html>
- [3] Palacios, J. (2011). La tasa de deforestación en el Ecuador. (E. Universo, Entrevistador)
- [4] Daniel Lins da Silva, Pedro Luiz Pizzigatti Corrêa, Leandro Halle Najm. Requirements Analysis for a Traceability System for Management Wood Supply Chain on Amazon Forest. Journal of Information & System Management Volume 1 Number 1 March 2011.
- [5] José Luis Martínez Cantón, Fidel Cándano Acosta, Yudel García Quintana. Aplicación WEB para el análisis y simulación del aprovechamiento de la madera. Revista Avances Vol. 16 (1), ene.- marzo, 2014.
- [6] Carolina De Carvalho Cantergiani, José Miguel Rubio Iglesias, Cristina Zamorano Chico, Laura Díaz Sánchez, Miguel Ángel Latre Abadía, Javier Nogueras Iso, Rogelio Galván Plaza. (2011). Interoperabilidad. La aportación española en el proyecto EUROGEOS: hacia un sistema de observación ambiental de la tierra. II Jornadas Ibéricas de Infraestructuras de Datos Espaciales. 9,10 y 11 de noviembre.
- [7] Flores L y Estigarribia V. (2016) Sistema de Información Geográfico para la Universidad Nacional del Este, utilizando Software Libre. XXIV Jornadas. Universidad Nacional Del Este. Paraguay.
- [8] Casco, J. (2018). Aplicación móvil para la geolocalización de árboles endémicos de la Reserva Biológica Pindo Mirador del Cantón Mera. (Tesis de Ingeniería). Universidad Regional Autónoma de los Andes UNIANDÉS. Puyo
- [9] Cordero, V. (2015). Propuesta de aplicación Web y plan de comunicación interna para la Matriz de indicadores de desempeño ambiental de la Red Costarricense de instituciones educativas sostenibles REDIES. (Tesis de Maestría). Universidad Estatal a Distancia. San José.
- [10] Bravo, F., Rodríguez, F., Ordoñez C. (2011). A web-based application to simulate alternatives for sustainable forest management: SIMANFOR. Artículo publicado. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA). Recuperado el 5 de abril de 2019, de: www.inia.es/forestsystems.com: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2112211-01953>
- [11] Ochoa et al. (2014). Página WEB con un índice para la evaluación de la condición ecológica de los bosques tropicales en México. Recuperado el 28 de marzo de 2019 de: <https://www.researchgate.net/publication/267249371>
- [12] Andrade, F. (2018). Aplicación Web para la gestión de inventario de la estación biológica Pindo Mirador del Gobierno Autónomo Descentralizado Provincial de Pastaza. (Tesis de Ingeniería). Universidad Regional Autónoma de los Andes UNIANDÉS. Ambato
- [13] Kantartzis, A., Malesios, C. (2018) A Decision Support System Web—Application for the Management of Forest Road Network. Artículo Publicado. David Publishing Company. Recuperado el 3 de abril de 2019, de: <http://davidpublisher.com/index.php/Home/Article/index?id=36049.html>
- [14] Nunes Antonio y Caetano Mario. (2006). Forest monitoring with remote sensing: a web application for the common user. Material no publicado.
- [15] Tuomas Häme, Laura Sirro, Edersson Cabrera, Fabian Enßle, Jörg Haarpaintner, Jarno Hämäläinen, Bernardus de Jong, Fernando Paz Pellat, Donata Pedrazzani, Johannes Reiche. (2015). Recover: A Concept for Tropical Forest Assessment for REDD. VTT Technical Research Centre of Finland, Finlandia. Recuperado el 28 de marzo de 2019 de: <http://adsabs.harvard.edu/abs/2013ESASP.722E..17H>
- [16] Bravo, Fernando. (2016). A web-based application to simulate alternatives for sustainable forest management: SIMANFOR. Artículo publicado. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria (INIA).

- Recuperado el 5 de abril de 2019, de: www.inia.es/forestsystems.com: <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2112211-01953>
- [17] Goodman, C., (2012). Bunjil Forest Watch un servicio de vigilancia comunitaria de los bosques, la deforestación en todo el mundo, el Dr. Paulo Moutinho (Ed.), ISBN: 978-953-51-0417-9, InTech, disponible en: <http://www.intechopen.com/libros/deforestación-alrededor-del-mundo/Bunjil-bosque-reloj-a-comunidad-basedforest-monitoreo-de-servicio>.
- [18] Sousa, A., Corcho, O., Salles, P., Vilches-Blázquez, L. (2014). An Application of geographical and Statistical Linked Data to Ecology: The Brazilian Cerrado Ontology Network and Qualitative Reasoning Models. International Congress on Environmental Modelling and Software. 46.
- [19] Sousa. La red cerrada de Ontología Brasileña y razonamiento cualitativo. 2015
- [20] Gabriela Lopez-Gonzalez, Simon L. Lewis, Mark Burkitt & Oliver L. Phillips. (2011). ForestPlots.net: a web application and research tool to manage and analyse tropical forest plot data. Journal of Vegetation Science Vol. 22. Pág. 110-116.
- [21] Paul McCord, Francesco Tonini, Liu Jianguo. (2018) El Telecoupling GeoApp: Una aplicación web-SIG para analizar sistemáticamente telecouplings y el desarrollo sostenible. Artículo publicado. Geografía Aplicada. Recuperado el 10 de mayo de 2019 de: www.elsevier.com/locate/apgeog.
- [22] Vidya Sagar y Nageswar Rao. (2015). WEB based Weather Data Acquisition System. Artículo publicado. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). ISSN: 2278-018, Vol. 4. Recuperado el 18 de mayo de 2019 de: www.ijert.org/IJERTV4IS050999.
- [23] Sánchez, J. (2005). Plataformas tecnológicas para el entorno educativo. ACCION PEDAGOGICA, 18-24.
- [24] Potocnik, J. (2005). Plataformas Tecnológicas Europeas. Italia: Comisión Europea.
- [25] Project Management Institute, "A Guide To The Project Management Body Of Knowledge (PMBOK Guides)", 5a. edición
- [26] Luis E. Mendoza, María A. Pérez y Anna C. Grimán. 2004. Prototipo de Modelo Sistémico de Calidad (MOSCA) del Software Prototype of Software Quality Systemic Model (SQSM). Revista Computación y Sistemas Vol. 8 Núm. 3, pp. 196-217. CIC-IPN, ISSN 1405-5546, Impreso en México
- [27] Norma Internacional ISO 9000 (2005). Sistemas de gestión de la calidad: Fundamentos y vocabulario. Lugar: Editorial.
- [28] Universidad del Valle, 2015. Modelos, normas y estándares de calidad internacionales para los productos de software. Documento de apoyo para Desarrollo de Software II.
- [29] David, Rodreck; Ngulube, Patrick; Dube, Adock (16 de julio de 2013). «A cost-benefit analysis of document management strategies used at a financial institution in Zimbabwe: A case study». SA Journal of Information Management 15 (2). doi:10.4102/sajim.v15i2.540.
- [30] IVÁN JOSÉ TURMERO ASTROS, Recuperado de: <https://www.monografias.com/trabajos-pdf5/los-costos-calidad/los-costos-calidad.shtml>
- [31] Ishikawa, Kaoru; traducción del japonés al inglés por David J. Lu ; traducción Margarita Cardenas (1997). Qué es el control total de calidad? : la modalidad japonesa (11 reimpr. edición). Bogotá: Editorial Norma. p. 78. ISBN 9580470405.
- [32] Bellows, Jeannie, Castek (2000). Activity Diagrams and Operation Architecture. Technologies Group Inc.
- [33] Nancy R. Tague (2004). "Seven Basic Quality Tools". The Quality Toolbox. Milwaukee, Wisconsin: American Society for Quality. p. 15.
- [34] Samuel S. Wilks, Mathematical Statistics, John Wiley, 1962, Section 8.1
- [35] Samuel S. Wilks, Mathematical Statistics, John Wiley, 1962, Section 8.1 "9.1.2.1 Organization Charts and Position Descriptions". A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide) (5th ed.). Project Management Institute. 2013. p. 262. ISBN 978-1-935589-67-9.
- [36] Uniandinos, 2017. Gestión de Recursos Humanos en Organizaciones Sociales. Conferencia. 2 de marzo de 2017. Recuperado de: https://mba.americaeconomia.com/sites/mba.americaeconomia.com/files/charla_rrhh_-_02_de_marzo_2017.pdf.
- [37] Gomez, L., Balkin, D., Cardy, R., Delgado, M., Gomez, M., Romero, A., Vasquez, E.; Traducción, revisión técnica y elaboración de notas de adaptación; Isabel Delgado (2008). Gestion de Recursos Humanos. España: Pearson. p. 257. Universidad Complutense de Madrid. ISBN:9788483224021
- [38] Jacka, Mike; Keller, Paulette (2009). Business Process Mapping: Improving Customer Satisfaction. John Wiley and Sons. p. 257. ISBN 0-470-44458-4.
- [39] Cleland, David; Ireland, Lewis (2006). Project management: strategic design and implementation. McGraw-Hill Professional. p. 234. ISBN 0-07-147160-X.
- [40] Jump up to: a b Blokdijs, Gerard (2008). The Service Level Agreement SLA Guide - SLA Book, Templates for Service Level Management and Service Level Agreement Forms. Fast and Easy Way to Write Your SLA. Lulu. p. 81. ISBN 1-921523-62-X.
- [41] Brennan, Kevin (2009). A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK Guide). International Institute of Business Analysis. p. 29. ISBN 0-9811292-1-8.
- [42] Módulo de la asignatura Gestión de Calidad, Riesgos y Evaluación. Master en Diseño y Gestión de Proyectos Tecnológicos. UNIR
- [43] Segura, A., Vidal, C., Prieto, M., 2008. Evaluación de la Calidad del Software para el aprendizaje. Documento publicado. Universidad Internacional de La Rioja.
- [44] Gomez, L., Balkin, D., Cardy, R., Delgado, M., Gomez, M., Romero, A., Vasquez, E.; Traducción, revisión técnica y elaboración de notas de adaptación; Isabel Delgado (2008). Gestion de Recursos Humanos. España: Pearson. p. 257. Universidad Complutense de Madrid. ISBN:9788483224021
- [45] Luis E. Mendoza, María A. Pérez y Anna C. Grimán. 2004. Prototipo de Modelo Sistémico de Calidad (MOSCA) del Software Prototype of Software Quality Systemic Model (SQSM). Revista Computación y Sistemas Vol. 8 Núm. 3,

- pp. 196-217. CIC-IPN, ISSN 1405-5546, Impreso en México
- [46] Valenzuela, P. (2005). Aplicación del Modelo Hídrico Swat 99.2 para el análisis del impacto de la deforestación y del avance de la frontera agrícola en la producción y almacenamiento del recurso agua en las partes alta y media de la Subcuenca del Río San Pedro. (Tesis de Ingeniería). Escuela Politécnica del Ejército - ESPE. Sangolquí
- [47] Vidya Sagar y Nageswar Rao. (2015). WEB based Weather Data Acquisition System. Artículo publicado. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). ISSN: 2278-018, Vol. 4. Recuperado el 18 de mayo de 2019 de: www.ijert.org/IJERTV4IS050999.
- [48] Project Management Institute, "A Guide To The Project Management Body Of Knowledge (PMBOK Guides)", 5a. edición
- [49] Ramírez, R. (2016). Diseño y Gestión Proyecto Mejoramiento Plataforma Tecnológica para Soluciones de Vivienda. Bogotá: Universidad Internacional de la Rioja.
- [50] Mg. Marcela Chiarani - Lic. Irma Pianucci -Mg. Margarita LuceroCriterios de Evaluación de Plataformas Virtuales de Código Abierto para Ambientes de Aprendizajes Colaborativos.

Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema Oxitop para estimar la producción de biogás

Anaerobic digestivity of wastewater biosolids using the Oxitop system to estimate biogas production

Marian Ramírez¹, Euclides Deago,^{2,3*} Nathalia Flores Tejedor²

¹Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

²Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

³Grupo de Biosólidos: Energía y Sostenibilidad

*Autor de correspondencia: euclides.deago@utp.ac.pa

RESUMEN— Panamá experimenta un crecimiento económico sostenido en los últimos 10 años. Esto trae como consecuencia algunos potenciales problemas, como es la acumulación de biosólidos de aguas residuales (BioAR) y que estos son dispuestos en rellenos sanitarios. Por ejemplo, hasta el año 2014 se depositaron aproximadamente 75946 toneladas de BioAR en el principal relleno sanitario de Panamá. Esta situación genera una gran presión a la gestión de manejo de desechos y a nivel ambiental. En este sentido, nuestra investigación se basó en el estudio de digestividad anaeróbica de BioAR usando el sistema Oxitop, a fin de estimar la cinética y potencial generación de biogás para su posible aprovechamiento. La caracterización de BioAR estudiados de diversas actividades económicas indican su viabilidad para usarlos, dada sus bajas concentraciones de contaminantes y su alto contenido de materia orgánica. Los ensayos de digestividad indican que los rangos de producción de biogás estuvieron entre 9.6 y 41.56 mL CH₄/g SV. Dichos valores son bajos en comparación con los reportados en la literatura y no tendrían la capacidad para sostener una actividad de generación eléctrica; sin embargo, es posible aprovechar estos biosólidos si son mezclados con otros sustratos orgánicos para mejorar los rendimientos de producción de biogás.

Palabras clave— Digestión anaeróbica, biogás, biosólidos de aguas residuales, Oxitop.

ABSTRACT— Panama experiences sustained economic growth in the last 10 years. This results in some potential problems, such as the accumulation of wastewater biosolids (WWB) and they are disposed in landfills. For example, until 2014, approximately 75946 tons of WWB were deposited in the main Landfill in Panama. This situation generates great pressure on waste management and environmental management. In this sense, our research was based on the study of anaerobic digestivity of WWB using the Oxitop system, in order to estimate the kinetics and potential generation of biogas for its possible use. The characterization of WWB studied from various economic activities indicates their viability to use them, given their low concentrations of pollutants and their high content of organic matter. Digestivity tests indicate that the biogas production ranges were between 9.6 and 41.56 mL CH₄/g SV. These values are low compared to those reported in the literature and would not have the capacity to sustain an electricity generation activity; however, it is possible to take advantage of these biosolids if they are mixed with other organic substrates to improve biogas production yields.

Keywords— Anaerobic digestion, biogas, wastewater biosolids, Oxitop.

1. Introducción

A nivel internacional existen tendencias crecientes en aprovechar cada vez más los subproductos derivados del saneamiento de las aguas residuales, específicamente los biosólidos de aguas residuales (BioAR) [1]. Estos BioAR son estudiados como materia prima para la generación de

biogás, el cual es usado para la generación eléctrica. Esta generación de biogás es obtenida por medio de la digestión anaeróbica. Por ejemplo, en Estados Unidos la tecnología de digestión anaeróbica ha sido potenciada para la producción de biogás obtenido de granjas agrícolas, BioAR, en otras fuentes, con el objetivo de producir energía para abastecer a 3 millones de familias

Citación: M. Ramírez, E. Deago y N. Flórez, "Digestividad anaeróbica de biosólidos de aguas residuales usando el sistema oxitop para estimar la producción de biogás", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 30 de agosto de 2019. **Recibido con correcciones:** 16 de marzo de 2020. **Aceptado:** 7 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 M. Ramírez, E. Deago y N. Flórez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

[2]. De igual forma, México se encuentra desarrollando investigación para el aprovechamiento de BioAR, dado que generan más de 600,000 toneladas anuales [3].

Actualmente, en la Ciudad de Panamá los Sistemas de Tratamientos de Aguas Residuales (STAR), están generando gran cantidad de BioAR. Según informes del año 2017, el Relleno Sanitario de Cerro Patacón recibió 24,013 toneladas de lodos, 9.2 % más que el año 2016 [4]. Los biosólidos depositados en Cerro Patacón tienen diferentes procedencias: hay de origen industrial, tanques sépticos; trampas de grasa y aquellos que se derivan de letrinas portátiles; los cuales mayormente eran dispuestos sin un pretratamiento [5].

A raíz de esta situación, desde el año 2018, la administración del Relleno Sanitario de Cerro Patacón suspendió la recepción de biosólidos de aguas residuales (BioRA), debido a que presentan limitaciones para absorberlos y tratarlos. Actualmente, los únicos BioAR que recibe Cerro Patacón son los generados en la Planta de Tratamiento de Agua Residuales de Juan Díaz, que atiende a la Ciudad de Panamá, la cual genera en promedio 83 toneladas por día, dado que los mimos están deshidratados a un 75% de humedad y son aprovechados como material de cobertura [6].

Debido al aumento de la generación de BioAR, se abre una oportunidad en Panamá, para realizar investigación que permitirá generar información referente a las características físico-químicas de los BioAR y establecer el potencial uso de estos. Como se indicó, uno de los principales aprovechamientos que se han identificado es la generación de electricidad derivado de la producción de biogás. Por ejemplo, desde el punto de vista económico, un informe realizado y publicado por la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), señala que los costos de las distintas energías renovables en el 2018 indican que existe una caída considerable de los costos globales de la electricidad, donde resalta que la bioenergía es la que presenta mayor baja (14%) [7].

El uso de BioAR para producir bioenergía es una opción que tiene muchas posibilidades en Panamá, porque el marco regulatorio existente ofrece incentivos por el uso de nuevas tecnologías [8]. Además, existen políticas nacionales que se enmarcan en temas de sostenibilidad; tal es el caso del Plan Energético Nacional 2015-2050 (PEN), que entre sus lineamientos está la descarbonización de la matriz energética del país y su

diversificación [9]. Es por ello, que se busca conocer el potencial para producir metano, derivado de la digestión anaeróbica de BioAR.

Las actividades seleccionadas en la investigación de BioAR fueron: avícola (sacrificio de aves de corral, comercial y hotelero. Cabe destacar que los STAR seleccionados son aeróbico de tipo lodos activados [10].

2. Métodos y Materiales

2.1 Muestreo de biosólidos

El muestreo realizado en los STAR seleccionados se basó en lo dispuesto en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 47-2000 [11]. Los BioAR fueron muestreados por un período de seis meses desde octubre de 2018 hasta marzo de 2019. El BioAR de la actividad avícola tenía una coloración rojiza (figura 1a), con alto contenido de humedad, grasas y restos de plumas, lo cual es consistente con lo reportado en la literatura [12]; los BioAR comerciales, tenían coloración marrón claro (figura 1b), con consistencia semi- líquida, dado que fue muestreado en el lecho de secado. En tanto, el BioAR de la actividad hotelera mantuvo una consistencia compacta con poca humedad y con coloración marrón oscuro (ver figura 1c).

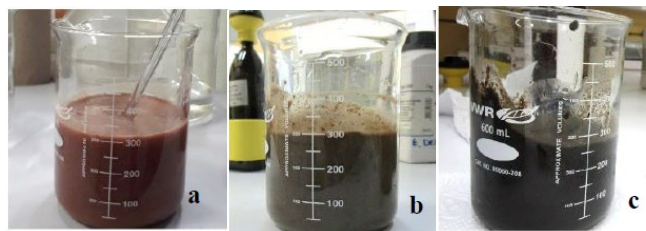


Figura 1. BioAR muestreados en STAR de actividades económicas estudiadas: a) Avícola; b) Comercial y c) Hotelera.

2.2 Caracterización físico-química de biosólidos

Las muestras de BioAR obtenidas de los STAR de las tres actividades económicas estudiadas se analizaron en el Laboratorio de Sistemas Ambientales del Centro de Investigaciones Hidráulicas e Hidrotécnicas de la Universidad Tecnológica de Panamá. A estas muestras se les determinó DQO, nitrato, pH, conductividad, Sólidos Volátiles y Fijos, según Standard Methods [13]. Para verificar el contenido de metales pesados definidos en el Reglamento Técnico DGNTI-COPANIT 47-2000 [11], las muestras se enviaron a un laboratorio especializado (tabla 2). Estos parámetros se determinaron según las normas de la EPA [14].

2.3 Configuración de reactores batch de digestividad anaeróbica con sistema Oxitop

Para determinar la generación de biogás, producto de la digestión anaeróbica de los BioAR, se usó el Sistema Oxitop (figura 12 a); el cual se basa en mediciones manométricas, es decir que registra delta de presiones que se producen por los procesos de digestión anaeróbicos. Este método es muy apropiado para la determinación de la degradabilidad y para obtener tasas de hidrólisis, ya que el Sistema Oxitop permite registrar presiones generadas por los gases generados por el proceso de digestión anaeróbica.

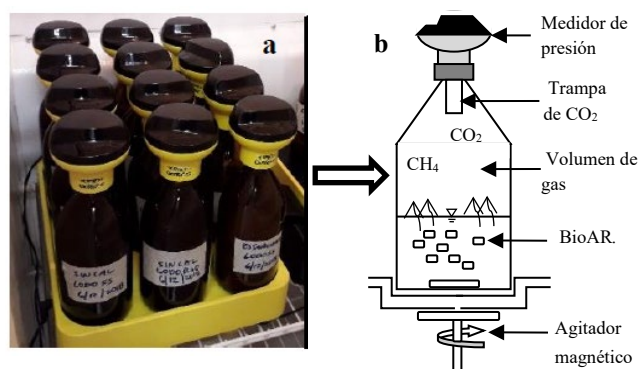


Figura 2. a) Sistema Oxitop b) Componente y funcionamiento del Sistema Oxitop

El Sistema Oxitop consiste en una serie de botellas ámbar de 500 mL, con cabezales digitales que registran presiones internas producidas por gases generados. Además, cuenta con una base magnética que agita el contenido de las botellas. La presión registrada en las cabezas de medición [15] (figura 2 b).

Los ensayos de digestividad se realizaron en duplicado a 25°C. En cada reactor batch (botellas ámbar de 500 mL) se usó un volumen de trabajo de 300mL, de los cuales el 50% correspondía a BioAR. Estos ensayos se realizaron por períodos de tiempo comprendido entre 700 y 800 horas. Durante este período los reactores se mantuvieron agitados. En tanto, para registrar la presión neta debido al gas metano formado por la digestión anaeróbica, se empleó trampas de NaOH para remover CO₂, que es otro subproducto de este proceso (figura 2b).

2.4 Estimación del Potencial Bioquímico de Metano

Para la estimación del Potencial Bioquímico de Metano (PBM) se hizo en base a ecuaciones que toman como referencia la Ley General de los gases, las cuales han sido adecuados por varios investigadores [16], [17] y

[18]. En este sentido, la variable experimental usada en la estimación del PBM es la presión obtenida en los ensayos batch registrada por el Sistema Oxitop. Con estas ecuaciones se determinan el volumen de metano.

A continuación, se describen las ecuaciones utilizadas para calcular el PBM y los parámetros usados (tabla 1):

$$n_{CH_4} = \frac{\Delta P \cdot V_l}{R \cdot T_e} \quad (1)$$

n_{CH_4} : Moles de CH₄ (mol); ΔP : Incremento de Presión en Sistema Oxitop (hPa); R : Constante de gases ideales (atm*mL/mol*K); T_e : Temperatura de ensayo (°K).

$$V_{CH_4-CE} = \frac{n_{CH_4} \cdot R \cdot T_{CE}}{P_{CE}} \quad (2)$$

V_{CH_4-CE} : Volumen de metano en condiciones estándar (mL); P_{CE} : Presión a condiciones estándar (atm)

$$H_{CH_4} = 10^{\frac{-675.74}{T_e} + 6.88} \quad (3)$$

H_{CH_4} : Constante de Henry para el CH₄ (atm).

$$X_{CH_4 \text{ disuelto}} = \frac{\Delta P}{H_{CH_4}} \quad (4)$$

$X_{CH_4 \text{ disuelto}}$: Fracción molar de CH₄ disuelto.

$$M_{CH_4 \text{ disuelto}} = \frac{M_{H_2O} \cdot X_{CH_4 \text{ disuelto}}}{1 - X_{CH_4 \text{ disuelto}}} \quad (5)$$

$M_{CH_4 \text{ disuelto}}$: Concentración molar de CH₄ disuelto (mol*mL⁻¹); M_{H_2O} : Concentración molar del agua (mol*mL⁻¹); $X_{CH_4 \text{ disuelto}}$: fracción molar de CH₄ disuelto.

$$n_{CH_4 \text{ disuelto}} = M_{CH_4 \text{ disuelto}} \cdot V_u \quad (6)$$

$n_{CH_4 \text{ disuelto}}$: Moles de CH₄ disuelto (mol); V_u : volumen útil en reactor (mL)

$$V_{CH_4 \text{ disuelto}-CE} = \frac{n_{CH_4 \text{ disuelto}} \cdot R \cdot T_e}{\Delta P} \quad (7)$$

$V_{CH_4 \text{ disuelto}-CE}$: Volumen de CH₄ disuelto en condiciones estándar (mL)

$$V_{TCH_4-CE} = V_{CH_4-CE} + V_{CH_4 \text{ disuelto}-CE} \quad (8)$$

V_{CH_4-CE} : Volumen de CH₄ en condiciones estándar (mL)

$$PBM = \frac{V_{TCH_4}}{g_{SV}} \quad (9)$$

g_{SV} : Sólidos Volátiles del sustrato. (g); **PBM**: Potencial Bioquímico de Metano (mL/g SV).

Tabla 1. Valores de constantes y parámetros usados en la estimación del Potencial Bioquímico de Metano

Parámetros	Unidades	Valor	Referencias
R	Atm*mL/mol*K	0.08205746	
H _{CH₄}	Atm	41073.04816	
M _{H₂O}	Mol/mL	0.181642	
P _{CE}	Atm	1.0	Este estudio
T _{CE}	°K	273.15	
T _e	°K	298.15	Este estudio
V _u	L	0.5	Este estudio

3. Resultados y Discusión

3.1 Calidad físico-química de BioAR estudiados

Los BioAR de cada actividad económica se mantuvo en rangos de valores permisibles definidos por la Norma COPANIT 47-2000. Para el caso de los parámetros como el DQO, se encontró que los mayores valores fueron detectados en la actividad avícola, cuyo valor promedio durante los seis meses de estudio fue de 924mg/L, en comparación con las actividades comercial (236.3 mg DQO/L) y hotelera (204.17mg DQO/L) (tabla 2).

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos de BioAR de las actividades económicas estudiadas durante seis meses

Actividades	Parámetros	Periodo de Caracterización					
		2018			2019		
		Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
Avícola	pH	5.8	6.4	6.2	6.48	6.5	6.6
	DQO (mg/L)	775	241	1356	1441	857	874
	NO ₃ ⁻ (mg/L)	2.5	2.06	1.95	1.75	3.06	1.56
	SV (%)	91.6	59.9	83.5	45.8	44	60.5
	SF (%)	8.4	40.1	16.5	54.2	56	39.5
Comercial	pH	7.4	6.4	7.54	7.69	7.8	7.8
	DQO (mg/L)	202	370	200	152	260	234
	NO ₃ (mg/L)	1.9	1.05	1.6	3.5	2.3	3.16
	SV (%)	69.5	72.4	57.5	41.7	71.9	69.3
	SF (%)	30.5	27.6	42.5	58.3	28.1	30.7
Hotelera	pH	6.9	6.9	6	7	6.5	7.2
	DQO (mg/L)	243	365	216	120	181	100
	NO ₃ (mg/L)	1.9	0.85	2.86	1.25	3.66	1.06
	SV (%)	74.3	74.6	50.1	56.7	69.3	72.5
	SF (%)	25.7	25.4	49.9	43.3	30.7	27.5

Tabla 3. Los resultados metales pesados obtenido en una muestra de BioAR de las actividades económicas estudiadas

Parámetros	Actividades económicas			COPANIT 47-2000	
	Avícola	Comercial	Hotelera	Tabla 3.1	Tabla 3.2
Coliformes Fecales (UFC/g)	2.8x10 ⁸	1.2x10 ⁴	1.1x10 ⁵	2000	2000
As (mg/kg)	<0.001	<0.001	2.6	75	40
Cr (mg/kg)	4,070	15.8	7.4	3000	1500
Cd (mg/kg)	<0.001	1.1	0.365	85	40
Cu (mg/kg)	33.6	425	1390	4300	1500
Hg (mg/kg)	<0.001	<0.001	<0.001	57	25
Mo (mg/kg)	0.414	5.11	1.41	75	25
Ni (mg/kg)	5,540	156	30.6	420	420
Pb (mg/kg)	1,530	31.6	3.35	840	300
Se (mg/kg)	3.84	<0.001	<0.001	100	50
Zn (mg/kg)	118	1090	551	7500	3000

En cuanto al perfil de metales pesados, los resultados obtenidos demostraron que los BioAR tenían muy bajas concentraciones, lo cual se ajusta a los valores permisibles (tabla 3). Estos resultados son muy

importantes, porque descarta la posibilidad de inhibición de las bacterias por la presencia de metales pesados

3.2 Potencial Bioquímico de Metano

Los resultados experimentales demuestran una variación de la generación de biogás o PBM en la digestión anaeróbica de BioAR de cada actividad económica durante los seis meses de monitoreo (Figura 3). Los valores de PBM se presentan como el volumen de metano generado por gramo de BioAR seco. Los valores de PBM de cada actividad fueron: Avícola: 10.6mL CH₄/g SV; Comercial 41.56mL CH₄/g SV; Hotelera 9.6mL CH₄/g SV.

El comportamiento de PBM fue diferenciado para los ensayos de los BioAR de las actividades económicas estudiadas durante los seis meses de monitoreo. En el caso de la actividad hotelera el PBM resultó ser el más bajo durante el período de medición del ensayo de digestividad (Figura 3c). Solo en el mes de enero de 2019 logró un valor mayor de 9.6mL CH₄/g SV; los demás valores estuvieron por debajo de 6mL CH₄/g SV.

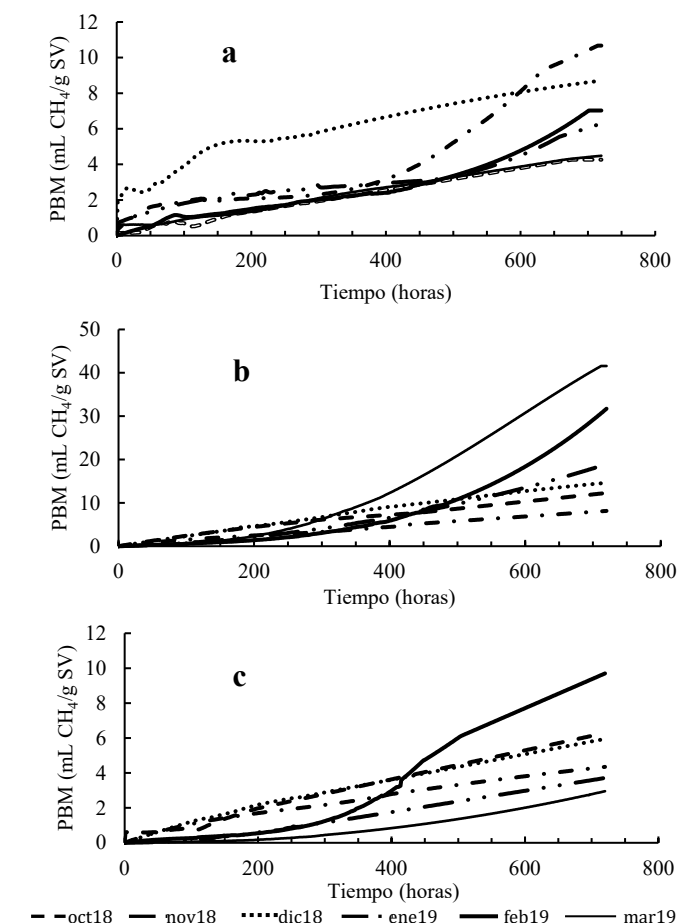
Las condiciones de poca producción de metano en los ensayos de BioAR de actividad hotelera, se asocia al bajo contenido de sólidos volátiles; ya que en hoteles los principales contaminantes de las aguas se encuentran en lo detergentes de baja calidad (alto contenido de sulfatos), las grasas y aceites que se recogen de las cocinas, duchas y áreas de limpieza y por supuesto de las aguas residuales domésticas [19]. En consecuencia, se puede inferir que, debido a la poca materia orgánica en los BioAR de la actividad hotelera, por sí mismo no tiene la carga orgánica suficiente disponible para la digestión.

En tanto, para los ensayos con BioAR de la actividad avícola, los valores obtenidos reflejan congruencia con lo señalado en la literatura, en el sentido que son ricos en grasas y proteínas; lo que facilitaría una mayor formación de biogás. Sin embargo, al ser restos muy grasos el proceso se inhibe, porque son limitados los tipos de microorganismos capaces de metabolizarlos [20]. Esto se refleja en el comportamiento registrado en el ensayo (Figura 3a), para los meses de febrero y marzo de 2019, donde el valor máximo de PBM (4.2mL CH₄/g SV), se estabilizó a las 720h del ensayo siendo similar en varios meses de los ensayos de digestividad con BioAR de actividad hotelera (figura 3c).

Los valores obtenidos de BioAR de la actividad comercial se asemejan a BioAR generados de actividades

domésticas, ya que mayormente sus aguas provienen de oficinas y locales comerciales de venta al detal (Tabla 3). Además, no se registraron valores inhibidores por metales pesados (tabla 4). Sin embargo, los valores registrados están muy por debajo de valores reportados de BioAR primarios (190mL CH₄/g SV) [21].

A pesar de que en los BioAR estudiados de las actividades comercial y hotelera mantienen condiciones muy similares y que estaban ausentes de condiciones agresivas que pudieran afectar el crecimiento bacteriano (tabla 2 y 3), los valores de PBM fueron muy bajos los registros obtenidos en la biometanización derivado de la digestión anaeróbica (figura 3b y 3c). Sin embargo, el PBM de BioAR hotelero fue menor en comparación con la actividad comercial. En este caso se infiere que se debe a lo indicado previamente, el alto contenido de sulfatos.



3.3 Tasas de digestividad de BioAR

Con las curvas de PBM para cada actividad económica se estimaron las tasas de digestividad de los BioAR (tabla 4). Dado el comportamiento de los resultados (figura 3), se aplicó linealización.

Tabla 4. Tasas de Digestividad por Actividad Económica

Actividad Económica	Periodo de Análisis					
	2018			2019		
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
	K (d ⁻¹)					
Avícola	0.125	0.112	0.205	0.314	0.144	0.157
Comercial	0.357	0.542	0.467	0.200	0.842	0.607
Hotelera	0.167	0.102	0.173	0.146	0.232	0.038

Los resultados de las tasas de digestividad variaron poco entre meses para la actividad avícola. Esto puede asociarse a que es una actividad industrial donde se tiene un control de la cantidad de aves que son sacrificados. Sólo hubo una variación importante en el mes de enero de 2019 que fue el más elevado (tabla 5). Para esta actividad la tasa de digestividad estuvo en promedio 0.184 d⁻¹. De igual forma, las tasas de la actividad hotelera se mantuvieron cercanos durante los seis meses de monitoreo con un valor promedio de fue 0.1382 d⁻¹. En tanto, para los BioAR de la actividad comercial tuvo una tasa promedio de 0.5216 d⁻¹. Estos resultados están en los rangos indicados en la literatura para lodos secundarios [22].

3.4 Análisis estadístico de los resultados de PBM

El ANOVA de una vía o con un factor, es el tipo de análisis que se emplea cuando los datos no están pareados y se quiere estudiar si existen diferencias significativas entre las medias de una variable aleatoria continua (producción de metano en mL CH₄/ gr SV) en los diferentes niveles de otra variable cualitativa o factor (actividad que procesa la PTAR: comercial, avícola y hotelera). Es una extensión de los t-test independientes para más de dos grupos.

Las hipótesis contrastadas en esta investigación fueron:

H0: No hay diferencias entre las medias de los diferentes grupos: $\mu_1 = \mu_2 = \mu_3$

H1: Al menos un par de medias son significativamente distintas la una de la otra.

El funcionamiento básico de un ANOVA consiste en calcular la media de cada uno de los grupos para luego

comparar la varianza de estas medias (varianza explicada por la variable grupo, entre grupos) frente a la varianza promedio dentro de los grupos (la no explicada por la variable grupo, dentro de grupos) [23].

La representación gráfica más útil antes de realizar un ANOVA es el modelo Box-Plot (figura 4). Este tipo de representación permite identificar de forma preliminar si existen asimetrías, datos atípicos o diferencia de varianzas. En este caso, los 3 grupos parecen seguir una distribución simétrica. En el ensayo de BioAR de la actividad Comercial se detecta un valor extremo que habrá que estudiar con detalle por si fuese necesario eliminarlo. El tamaño de las cajas es similar para todas las actividades (Avícola, Comercial y Hotelero) por lo que no hay indicios de falta de homocedasticidad.

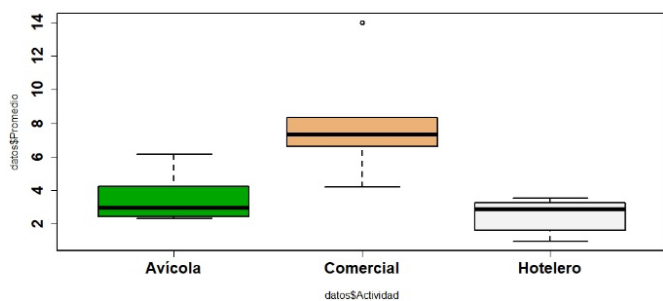


Figura 4. Gráfico de cajas de la producción de metano para actividades avícola, comercial y hotelera

El ANOVA se realizó utilizando el Software Estadístico R y se obtuvieron los resultados presentados a continuación (tabla 5):

Tabla 5. Resultados de ANOVA de producción de metano para actividades avícola, comercial y hotelera

	Grados de libertad	Suma de Cuadrados	Error cuadrático medio	F	p-valor
Actividad	2	101.4	50.7	10.79	0.00125**
Residuos	15	70.5	4.7		

**p-valor<0.001

Dado que el p-valor es inferior a 0.05 hay evidencias significativas para considerar que al menos dos medias son distintas (Se rechaza H0). La representación gráfica de los residuos muestra una falta de homocedasticidad (Figura 5a) y en el qqplot los residuos se distribuyen muy cercanos a la línea de la normal (figura 5b).

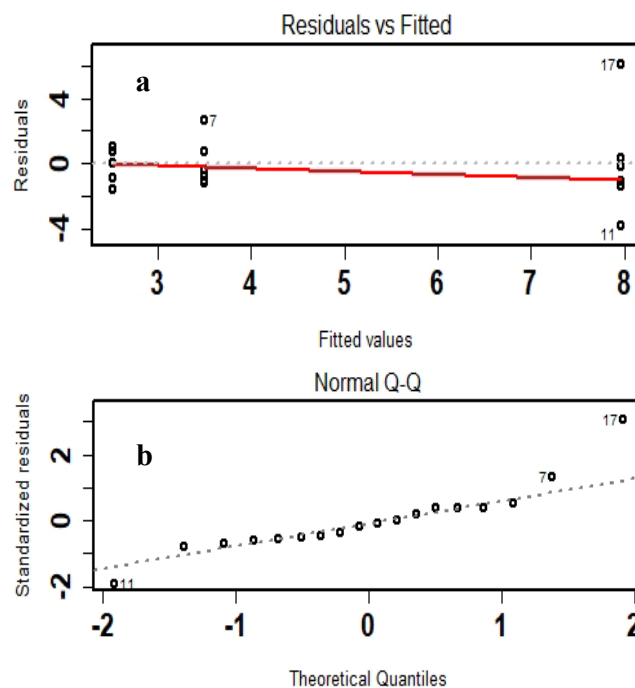


Figura 5. a) Gráfico de Residuos Vs Valores ajustado y b) Gráfico qqplot.

En este caso el ANOVA ha resultado significativo por lo que se procedió a realizar comparaciones entre las actividades (tabla 6). De entre los diferentes métodos de comparaciones múltiples y correcciones, se utilizó TukeyHSD.

Tabla 6. Resultados de la prueba TukeyHSD para la producción de metano de actividades avícola, comercial y hotelera.

Comparaciones	Diferencia* (ml CH ₄ / g SV)	Inferior	Superior	p valor
Comercial - Avícola	4.4680818	1.216911	7.719253	0.0074034
Hotelero - Avícola	-0.9876368	-4.238808	2.263534	0.7152125
Hotelero - Comercial	-5.4557187	-8.706890	-2.204548	0.0015310

*Diferencia de producción de metano entre cada actividad.

El intervalo de confianza para la diferencia entre las medias de Comercial-Avícola es de 1.21 a 7.72 y para hotelero-comercial es de -5.46 a 8.71. En ambos rangos no incluyen el cero, lo que indica que la diferencia es estadísticamente significativa (figura 6). El intervalo de confianza del par de media hotelero-avícola incluyen el cero, lo que indica que las diferencias no son estadísticamente significativas.

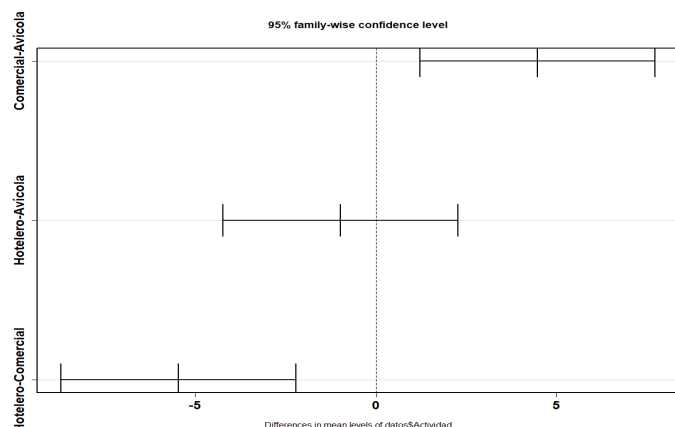


Figura 6. Diferencias en los niveles de las medias por actividad económica (TukeyHSD)

4. Conclusiones

El uso del Sistema Oxitop en su modo de registro manométrico, es decir, de mediciones de presiones internas, permitió evaluar exitosamente el comportamiento de la digestión anaeróbica de los biosólidos de las diferentes actividades económicas. Este método es muy útil, porque se remueve el CO₂ generado en la digestión anaeróbica, permitiendo registrar la presión neta producida por el gas metano.

Si bien es cierto que cada BioAR, independientemente de la actividad produce metano, su rendimiento dependerá de factores asociados a los contenidos de Sólidos Volátiles, alto contenido de grasas o sustancias surfactantes y altas relaciones C/N. Adicional se deben considerar otras variables como edad de los lodos, ya que un lodo maduro o en proceso de estabilización tendrán diferentes rendimientos.

Es necesario continuar explorando los BioAR de otras actividades económicas, en especial de actividades económicas como las industrias alimenticias; las cuales producen altos contenidos de materia orgánica. Además, es necesario explorar la alternativa de la adición de otros sustratos con alto contenido de materia orgánica y nitrógeno; de forma tal, de generar las condiciones favorables para que los microorganismos mejoren los rendimientos en la producción de biogás.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos a la SENACYT por el financiamiento del proyecto IDDS15-071 “Evaluación del aprovechamiento de lodos orgánicos de sistemas de tratamiento de aguas residuales en Panamá”, del cual se

desprende este artículo. Además, agradecemos a la Universidad Tecnológica de Panamá por el permanente e incondicional apoyo que nos brinda.

REFERENCIAS

- [1] IDAE. 2011. Situación y potencial de generación de biogás. Estudios Técnicos PER 2011-2020.
- [2] USDA, EPA, & DOE. 2014. Biogas Opportunities Roadmap. Washington, D.C.
- [3] Rojas, R.; Mendoza, L. G. 2011. Utilización de biosólidos para la recuperación energética en México. Producción + Limpia - Julio - Diciembre de 2012. Vol.7, No.2 – 74-94
- [4] Ministerio de Economía y Finanzas. Informe Económico y Social Anual 2017, pág 87.
- [5] Planta de tratamiento de lodos y parque eco-industrial en el Relleno Sanitario de Cerro Patacón. Energaseo, S.A. 2016.
- [6] Garrido, E.(1 de abril de 2018). Relleno de Cerro Patacón, área destinada para los residuos de la planta de tratamiento de Juan Díaz. Capital Financiero. Recuperado de: <https://elcapitalfinanciero.com/relleno-del-cerro-patacon-area-destinada-para-los-residuos-de-la-planta-de-tratamiento-de-juan-diaz/>
- [7] IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2018, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 2019
- [8] Ley 45. Que establece un régimen de incentivos para el fomento de sistemas de generación hidroeléctrica y de otras fuentes nuevas, renovables y limpias y dicta otras disposiciones, 45 C.F.R. (2004).
- [9] SNE. Plan Nacional de Energía. Panamá. (2016).
- [10] Castillo, J., & Murillo C. “Línea base y diagnóstico de los sistemas de tratamiento de aguas residuales basado en los principales sectores económicos de las provincias de Panamá y Coclé”. Tesis de Pregrado. Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá. (2018).
- [11] COPANIT 47-2000. Agua. Uso y disposición final de lodos (2000).
- [12] Caldera Y., & Gutierrez E., “Aguas residuales de un matadero de aves: Características y tratamiento”, vol. II N°3, Intellectus, 2012, pág. 7.
- [13] APHA, AWWA, and WEF, Standar Methods for The Examination of Water And Wastewater. 21 ed, ed. A.D. Eaton, et al. 2005, Baltimore, Meryland.
- [14] EPA 200.7 (1982). Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry.
- [15] WTW, M. S. (1998). Operating Manual. Systmen OxiTop ® Control Germany
- [16] Ortiz J. Puesta a punto de una metodología para la determinación de la actividad metanogénica específica de un fango anaerobio mediante el sistema OxiTop®. Influencia de las principales variables experimentales (Tesis doctoral). Valencia, España: Universidad Politecnica de Valencia; 2011, págs 58-62.
- [17] Aquino, S. F., Chernicharo, L. C. A., Foresti, E. & Florencio, D. S. M. D. L. (2007). Metodologias Para Determinação Da Atividade Metanogênica Específica (Ame) Em Lodos Anaeróbios. Eng. Sanit. Ambient., pág. 199.

- [18] Giménez, J. B., Martí, N., Ferrer, J. & Seco, A. (2012). Methane Recovery Efficiency In A Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor (Sanmbr) Treating Sulphate-Rich Urban Wastewater: Evaluation Of Methane Losses With The Effluent. *Bioresource Technology*, pág 7-10.
- [19] León, León (13 de septiembre de 2007). Una investigadora de la Universidad de León estudia las mejores formas de obtener biogás a partir de residuos de matadero. DICYT.
- [20] Consuelo, I. & Guerrero, J. (2016). Evaluación del potencial de biometanización de la co-digestión de lodos provenientes del tratamiento de aguas residuales municipales mezclados con residuos de alimentos. Tesis de maestría. Universidad de Antioquia.
- [21] S. Luostarinen, S. Luste, and M. Sillanpää. (2009). "Increased biogas production at wastewater treatment plants through co-digestion of sewage sludge with grease trap sludge from a meat processing plant," *Bioresource Technol.*, vol. 100, no. 1, pp. 79–85.
- [22] Ghosh, S. 1981 Kinetic of acid-phase fermentation in anaerobic digestion. *Biotechnol. Bioeng. Symp.* 11, 301-313.
- [23] Joaquín Amat Rodrigo, ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias, 2016. [En línea]. Disponible en: https://rpubs.com/Joaquin_AR/219148. [Accedido: 28-ago-2019]

Aprendizaje automático aplicado al análisis de sentimientos

Machine learning applied to the sentiment analysis

Denis Cedeno-Moreno ^{1*}, Miguel Vargas-Lombardo²

¹ GISES CIDITIC, Facultad de Ingeniería de Sistemas Computacionales, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: denis.cedeno@utp.ac.pa

RESUMEN— Con la evolución del Internet, hay una gran cantidad de información presente en la web como lo son las opiniones de los usuarios o consumidores sobre diversos contextos ya sea para expresar su conformidad o inconformidad sobre un producto o servicio recibido, así como la opinión de un artículo comprado o sobre la gestión que realiza alguna persona. Debido a la gran cantidad de opiniones, comentarios y sugerencias de los usuarios, es muy importante explorar, analizar y organizar sus puntos de vista para tomar mejores decisiones. El análisis de sentimientos es una tarea de procesamiento de lenguaje natural y extracción de información que identifica las opiniones de los usuarios explicadas en forma de comentarios positivos, negativos o neutrales. Varias técnicas pueden ser utilizadas para este fin, por ejemplo, el uso de diccionarios léxicos que ha sido muy utilizada y recientemente la utilización de la inteligencia artificial específicamente algoritmos supervisados. En este documento, se propone la utilización de técnicas de algoritmos supervisados para observar su utilización y ver el rendimiento de diferentes modelos de algoritmos supervisados para medir la efectividad en la clasificación de un conjunto de datos.

Palabras clave— *Análisis de sentimientos, inteligencia artificial, aprendizaje automático, procesamiento de lenguaje natural.*

ABSTRACT— With the evolution of the Internet, there is a large amount of information present on the web such as the opinions of users or consumers about different contexts, either to express their agreement or disagreement about a product or service received, as well as the opinion of a item purchased or about the management performed by someone. Due to the large number of opinions, comments and suggestions from users, it is very important to explore, analyze and organize their views to make better decisions. Sentiment analysis is a natural language processing and information extraction task that identifies the opinions of the users explained in the form of positive, negative or neutral comments. Several techniques can be used for this purpose, for example the use of lexical dictionaries that has been widely used and recently the use of artificial intelligence specifically supervised algorithms. In this document, we propose the use of supervised algorithm techniques to observe their use and see the performance of different models of supervised algorithms to measure the effectiveness in the classification of a data set.

Keywords— *Artificial intelligence, machine learning, natural language processing, Sentiment analysis.*

1. Introducción

En gran medida por la explosión en Internet de la Web 2.0, nos hemos encontrado con un crecimiento abrumador de la información disponible. Así mismo el acelerado y rápido crecimiento del contenido generado por los usuarios por ejemplo redes sociales, blogs o foros, en donde encontramos que está cargado de diferentes opiniones de los usuarios sobre diferentes aspectos cotidianos y dichas opiniones también conocidas como información subjetiva logran generar un sentimiento en las personas [1].

En un texto la información subjetiva tiene un gran potencial. La información subjetiva contiene el punto de vista de la persona que la expone en la cual influye sus intereses y deseos. Esta información puede ser procesada

por organizaciones públicas o privadas para conocer más sus estrategias y proyectarse mejor.

La lingüística computacional es una de las áreas que se ha enfocado en el estudio de las opiniones, o mejor dicho del lenguaje subjetivo. Este tipo de lenguaje se emplea para expresar estados personales en el contexto de una conversación o un texto [2].

Por ejemplo, la información subjetiva se puede emplear para, conocer la opinión de los clientes a cerca de un producto o servicio o saber la opinión que tiene el electorado sobre un posible candidato de elecciones, conocer que producto prefieren los clientes [3].

Por estas razones expuestas anteriormente hoy día existe un gran interés por parte de los investigadores y desarrolladores de software por la minería de opiniones

Citación: D. Cedeno y M. Vargas, “Aprendizaje automático aplicado al análisis de sentimientos”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 2 de septiembre de 2019. **Recibido con correcciones:** 12 de septiembre de 2019. **Aceptado:** 8 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 D. Cedeno y M. Vargas. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

(MO), también llamada análisis de sentimientos (AS) [4], la cual es una tarea del procesamiento del lenguaje natural (PLN) que permite identificar las opiniones relacionadas con un objeto dentro de un contexto común [5].

Para [6] las opiniones son una parte importante en las decisiones del ser humano, cuando una persona desea tomar una decisión se basa en los comentarios de otras personas, por ejemplo, para comprar un producto, seleccionar un destino turístico, incluso para votar por un partido político.

Comúnmente el AS se aplica extrayendo revisiones para un dominio específico, así por ejemplo puede ser de un producto, película, música, un candidato. El AS se puede realizar en diferentes niveles del texto que a lo que se conoce como granularidad, puede ser del documento completo, por oración o por características. En cuanto al documento o por oración el AS tiene como finalidad clasificar la orientación general del sentimiento que se expresa [7].

El concepto de AS no es nuevo, desde hace varios años, los especialistas han ido preparando cantidades innumerables de conjuntos de datos etiquetados con polaridades que tienen etiquetas con simples positivos y negativos hasta conjunto de datos mucho más elaborados que determinan el grado de positividad o negatividad que tiene un texto estudiado.

El AS [8] se apalanca en la utilización de una gran variedad de herramientas tecnológicas para lograr su objetivo, el cual es poder determinar el tono emocional que tiene una palabras.

La mayoría de los proyectos desarrollados para AS han basado su estrategia en la categorización manual. Otros pocos han automatizado el análisis del texto y utilizan diccionarios léxicos para etiquetar la palabra [9].

La inteligencia artificial (IA) que permite crear sistemas expertos, ha evolucionado el concepto del aprendizaje automático. Con la IA se están realizando proyectos de análisis de opiniones trabajando con aprendizaje automático, sin embargo, este tipo de soluciones son muy escasas.

El objetivo principal de este trabajo consiste en aplicar modelos del aprendizaje automático en una solución de AS, sobre un conjunto de datos o corpus, que se ha obtenido del Taller de análisis de sentimientos en español para ver el mejor rendimiento de estos modelos que permitan ver la polaridad ya sea positiva o negativa de las opiniones emitidas.

El resto de este documento está estructurado de la siguiente manera: Sección 2 presenta os antecedentes. Sección 3 los materiales y métodos. Sección 4 los

resultados. Sección 5 se describe la discusión y finalmente en la sección 6 las conclusiones y trabajo futuro.

2. Antecedentes

Cada día una enorme cantidad de datos son generados en las organizaciones, por ejemplo, de salud, por tal motivo es necesario el diseño y desarrollo de nuevas y potentes herramientas de procesamiento de la información, con el avance de las tecnologías relacionadas con la información se pueden acceder y analizar estos datos todos ellos relacionados con los registros electrónicos de salud del paciente.

2.1 Análisis de sentimiento.

La forma de comunicarnos a diario con las demás personas es a través del lenguaje natural (LN). Los lenguajes naturales tienen un gran poder expresivo y su función y valor como una herramienta para razonamiento.

El LN [10] ha venido perfeccionándose a partir de la experiencia a tal punto que puede ser utilizado para analizar situaciones altamente complejas. Todo lo que expresamos en Internet en forma de LN como las opiniones puede ser visto como una forma de información no estructurada.

En la actualidad según [11] se afirma que la información se encuentra clasificada de dos formas: estructurada y no estructurada. Desde el punto de vista del análisis cuantitativo de datos, el LN que usamos los humanos para comunicarnos a menudo es incluido dentro de la categoría de datos no estructurados [12]. Por ello, hoy día dentro de la informática ha logrado mucho auge las tareas que incluyen el procesamiento de estos datos no estructurados [13].

Se estima que entre el 80% y el 90% de la información de las organizaciones es no estructurada. La relación entre estas dos formas de clasificación de la información estructura y no estructurada es clave, debido a que hoy día una elevada cantidad de información está en forma no estructurada y requiere el uso de técnicas de procesamiento automático para poder tratarlos.

Existe gran cantidad de información no estructurada en las organizaciones y esta requiere el uso de técnicas de PLN para poder procesarla [14]. Según recientes investigaciones se estima que, en un minuto, habrá:

- 204 millones de emails
- 2,46 millones de post en Facebook
- 320.000 tweets
- 54.000 post en Tumblr
- 17 artículos nuevos en Wikipedia

El tratamiento automático del lenguaje natural o lenguaje humano se llama PLN. El PLN es la parte de la IA que se define como “la ciencia y la ingeniería de hacer máquinas inteligentes” [15].

El AS, también llamado minería de opiniones o análisis de opiniones, en años recientes ha tomado gran interés e importancia gracias al inmenso auge de las redes sociales en las que compartimos a diario nuestras experiencias son una fuente inagotable opiniones.

Los sistemas tradicionales de aplicación del PLN fueron para el tratamiento de textos que describían hechos o que se pueden observar y comprobar en la realidad. En la actualidad, sin embargo, la información sobre hechos ya no es la principal fuente para extraer conocimiento, debido a que la mayoría de los textos en la Web contiene expresiones con sentimientos y repletos de subjetividad.

Así han surgido en la actualidad nuevos campos de investigación dentro del PLN cuyo propósito es analizar la subjetividad en las opiniones o extraer y clasificar los sentimientos de las opiniones expresadas por las personas en el ámbito educacional, político, social y económico [16].

Dentro del PLN el área encargada de la detección automática de los sentimientos expresados en los textos y su clasificación según la polaridad que tienen (positiva, negativa o neutra) es el área de AS. El AS se puede utilizar para medir la intensidad de una opinión así como también puede ponderar cuantitativamente expresiones que muchas veces nos resultan subjetivas, permitiendo saber si se está hablando de forma positiva, negativa o neutra sobre un amplio contexto como servicios, productos, películas entre otros [17].

Con la importancia actual de las redes sociales, donde a diario se comenta de todo un poco, la posibilidad de tener herramientas que permitan monitorizar y valorar las opiniones vertidas en estas redes sociales son un punto de partida para el análisis de información no estructurada. Las soluciones tecnológicas de AS hacen posible extraer un valor tangible y directo a los comentarios de usuarios emitidos en lenguaje natural.

El AS, se refiere a la aplicación de una serie de técnicas del PLN, lingüística computacional y minería de textos, cuyo objetivo es la extracción de información subjetiva a partir de contenidos generados por los usuarios, como comentarios en blogs u opiniones en revistas de productos [18].

Existen básicamente dos enfoques para el AS, el enfoque basado en diccionarios semánticos y el basado en aprendizaje automático.

El enfoque de diccionarios semánticos hace uso de lexicones, en este enfoque principalmente se etiquetan

palabras dando un valor negativo o positivo a cada palabra. Entre los lexicones más utilizados en la literatura se encuentran SentiWordNet y WordNet-affect [19].

El enfoque basado en aprendizaje automático requieren de un conjunto de características para posteriormente entrenar un algoritmo de clasificación [17]. En la figura 1 se muestra el proceso general del aprendizaje automático seguido en este experimento.

Como primer paso tenemos la extracción de características que se hace desde un conjunto de datos de entrenamiento, estas se representan como un vector de características. Estas características son extraídas a través de diversos métodos como bolsa de palabras, n-gramas entre otros. Luego el segundo paso es el entrenamiento del algoritmo de clasificación seleccionado con los vectores de características [20].

En este enfoque el método para la extracción de características y el algoritmo de clasificación seleccionado juegan un rol importante en la precisión de la clasificación de la opinión. Ya que elegir el del algoritmo de aprendizaje y la determinación de las características correctas es fundamental para obtener un buen resultado en la clasificación.

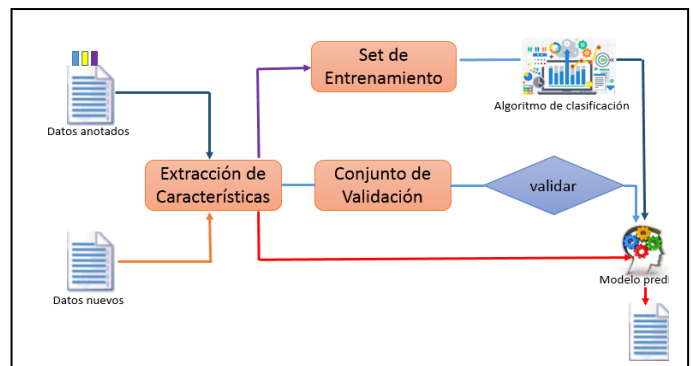


Figura 1. Proceso de aprendizaje automático.

2.2 Aprendizaje Automático.

El aprendizaje automático o machine learning [21], es una rama de la IA que se dedica al estudio de aquellos agentes o programas de software que aprenden o evolucionan basados en su experiencia, para realizar una tarea determinada cada vez mejor. El objetivo principal es desarrollar técnicas que permitan a las computadoras aprender. Existen 4 formas distintas de aprender: mediante un aprendizaje supervisado, aprendizaje no supervisado, aprendizaje semi supervisado o aprendizaje por refuerzo [22].

En el caso particular de los 3 primeros tipos de algoritmos se diferencian en el conocimiento a priori que

se tiene en cada uno. Los dos extremos son el supervisado, donde se tiene conocimiento a priori de los datos, y el no supervisado, caracterizado por la ausencia de conocimiento a priori.

- **Aprendizaje supervisado:** Son los algoritmos más sencillos de realizar y comprender. En ellos se parte de un conocimiento a priori. El objetivo es, mediante unos datos de entrenamiento, deducir una función que haga lo mejor posible el mapeo entre unas entradas y una salida. Los datos de entrenamiento constan de tuplas (X, Y) , siendo X las variables que predicen una determinada salida Y . La variable a predecir Y puede ser una variable cuantitativa para los casos de problemas de regresión o de tipo cualitativa para los casos de problemas de clasificación de un modelo de aprendizaje supervisado [23].

Dentro de los algoritmos supervisados se pueden encontrar dos corrientes, los algoritmos de clasificación y los de regresión. Los algoritmos de clasificación se usan cuando el resultado deseado es una etiqueta discreta. Aquí tenemos clasificación binaria, solo se elige entre dos etiquetas y clasificación para múltiples etiquetas.

La otra corriente son los algoritmos de regresión, los cuales son útiles para predecir valores que son continuos. Eso significa que la respuesta a su pregunta se representa mediante una cantidad que puede determinarse de manera flexible en función de las entradas del modelo en lugar de limitarse a un conjunto de posibles etiquetas. Consiste en un modelo matemático usado para aproximar la relación de dependencia entre una variable dependiente, las variables y un término independientes B . Este modelo puede ser expresado en forma de recta.

- **Aprendizaje no supervisado:** Se organizan los datos de alguna manera que se pueda describir su estructura. Esto puede significar agruparlos en clústeres o buscar diferentes maneras de examinar datos complejos para que parezcan más simples u organizados. Al contrario que en el aprendizaje supervisado, en este caso no existe conocimiento a priori. No se tienen tuplas (X, Y) , simplemente se tiene la variable X . El objetivo del aprendizaje no supervisado es lograr crear un modelo de la estructura o distribución de los datos para aprender más sobre ellos. Sirve tanto para entender como para resumir un conjunto de datos. En términos generales, pueden ser agrupados en algoritmos de clustering y algoritmos de asociación.
- **Aprendizaje semisupervisado:** El aprendizaje semisupervisado se encuentra a medio camino entre el aprendizaje supervisado y el no supervisado. Ahora

lo que tenemos son tanto datos etiquetados como datos no etiquetados, es decir, además de tener tuplas (X, Y) , tenemos datos sólo de X de los que no sabemos su respuesta Y .

- **Aprendizaje por refuerzo:** En estos casos lo que tenemos son problemas no supervisados que sólo reciben realimentaciones o refuerzos (por ejemplo, gana o pierde). Se sustituye la información supervisada (Y) por información del tipo acción/reacción. El objetivo en el aprendizaje por refuerzo es aprender a mapear situaciones de acciones para maximizar una cierta función de recompensa. En estos problemas un agente aprende por prueba y error en un ambiente dinámico e incierto. En cada interacción el agente recibe como entrada un indicador de estado actual y selecciona una determinada acción que maximice una función de refuerzo o recompensa a largo plazo.

Elegir un algoritmo es un paso crítico en el proceso de aprendizaje automático, por lo que es importante que realmente se adapte al caso de uso del problema en cuestión [17]. Específicamente para la tarea clasificación de opiniones tenemos los algoritmos: máquina de soporte vectorial (SVM), las redes bayesianas (Naive Bayes), los árboles de decisión (Random Forest) y K-vecinos más cercanos (Knn). Para el desarrollo de nuestra investigación hemos utilizado los algoritmos de aprendizaje supervisado [24].

2.3 Trabajos relacionados.

En la actualidad algunos sistemas de AS se basan en técnicas de aprendizaje automático para el proceso de clasificación de sentimientos. Por ejemplo uno de los primeros trabajos de sistemas de AS que utiliza el enfoque de aprendizaje automático es el de [25], en estos trabajos se utilizan varios algoritmos de clasificación supervisados tales como Naive Bayes y máquina de soporte de vectores (SVM).

Propuestas, como la de Cruz [26], han sido realizadas de forma flexible en cuanto a la aplicación de técnicas de clasificación de sentimientos basadas en aprendizaje automático. En este tipo de trabajos se puede aplicar cualquier método de clasificación sentimental.

En los trabajos de Min y Park [27] se enfocan en la combinación de dos algoritmos de aprendizaje automático. En sus investigaciones combinan SVM y reglas de árboles de decisión. En un trabajo de Chen [28] se ha utilizado otra técnica de aprendizaje automático para el AS llamada Condicional Random Fields (CRF).

Enfoques tales como [29], en donde se utilizan algoritmos basados en diccionario para llevar a cabo la

clasificación de sentimientos. Por último, y no menos importante el sistema presentado por [30] en el cual utilizan un servicio de terceros de AS llamado OpenDover. La utilización de este servicio no es gratuita y no está disponible su código fuente, por lo que se dificulta la obtención de dichas técnicas de AS empleadas ya que no están publicadas.

3. Materiales y métodos

Realizar AS en inglés es una tarea relativamente sencilla ya que existen paquetes que vienen con modelos preparados para calcular el sentimiento o polaridad de un nuevo texto. Sin embargo en español aún no se cuenta con muchas herramientas [31].

3.1 Propuesta

La metodología propuesta que se presenta en este artículo ha sido implementada como un caso de estudio en el siguiente orden: se investigó a cerca del estado del arte en el contexto de aprendizaje automático y AS, revisión de trabajos relacionados, obtención de un corpus etiquetado, regularización del corpus, implementación de técnicas para el pre proceso del texto hasta obtener el más óptimo, aplicación de dos algoritmos de aprendizaje automático supervisado para clasificación y análisis de los resultados [32].

3.2 Conjunto de datos

Se han utilizado varios conjuntos de datos (data set) en español para llevar a cabo la investigación. Este conjunto de datos fue recuperado del corpus TASS que es el Taller de Análisis de Sentimientos en español organizado cada año por la Sociedad Española del Procesado del Lenguaje Natural (SEPLN). Para conseguir el corpus nos pusimos en contacto con los organizadores vía mail y nos dieron acceso al uso de su repositorio de data set [33].

Dos conjuntos de datos principales para fines de aprendizaje se usaron: en general este corpus contiene 7.219 que son mensajes de Twitter escritos en español sobre personalidades conocidas en política, economía, comunicación o cultura. Algunos de estos archivos están enfocados en un tópico, por ejemplo, política o TV.

Los archivos del corpus están en formato XML y contienen miles de tweets en español etiquetados con su sentimiento o polaridad. Es decir, el texto estos categorizados si expresa algo en positivo, negativo o sentimiento neutral. En nuestro caso particular filtramos y solo utilizamos las polaridades positivas y negativas. Los temas son variados algunos mensajes son de política, fútbol, literatura o entretenimiento. En la figura 2 se muestra un extracto de la estructura de los archivos:

```
<tweet>
  <tweetid>756700943043928064</tweetid>
  <user>105199059</user>
  <content>Gracias a Dios cerrando con broche de oro!
  <date>Sat Jul 23 04:02:18 +0000 2016</date>
  <lang>es</lang>
  <sentiment>
    <polarity><value>P</value></polarity>
  </sentiment>
</tweet>
```

Figura 2. Extracto del corpus evaluado.

3.3 Preparando los datos

Una vez obtuvimos el conjunto de datos en XML los transformamos a formato CSV para su posterior lectura en Python. El texto en bruto es bastante desordenado, si analizamos el conjunto de datos, nos damos cuenta de que hay dentro del texto innumerables caracteres que sobran ya que no tienen una representación ni valía para nuestro trabajo por lo que se realizó una limpieza, en este caso se eliminaron utilizando una función de expresión regulares, que es un requisito previo para realizar cualquier tarea de PLN [34]. Con los datos limpios se hace necesario que el texto tenga sentido para el algoritmo, es decir necesitamos convertir el texto en a una representación numérica, es decir en un formato vectorial.

3.4 Librerías de Python

Se ha decidido trabajar con la herramienta de programación Python, el lenguaje de programación Python ofrece muchos beneficios para los que desean integrarse en el contexto de PLN y aprendizaje automático, pues posee una enorme cantidad de librerías que facilitan las tareas, entre ellas tenemos:

- **Sklearn:** Librería de aprendizaje automático que incluye muchos algoritmos de machine learning, aquí, estamos usando algunos de sus módulos como `train_test_split`, `RandomForestClassifier` y `precision_score`.
- **NumPy:** Librería con una variedad de módulos numéricos de Python que proporciona funciones matemáticas rápidas para los cálculos. Se utiliza para leer datos y llevarlos a arreglos y para poder manipularlos.
- **Pandas:** Es utilizada esta librería para leer y escribir en archivos. La manipulación de datos se puede hacer fácilmente con esta librería.

3.5 Preprocesar los datos

El algoritmo necesita algún tipo de vector de características para realizar la tarea de clasificación. La forma más sencilla de convertir un corpus a un formato vectorial, donde cada única palabra en un texto será representada por un número. Para ello, usamos una técnica

llamada vectorización o bolsa de palabras a través de la clase de Python llamada CountVectorizer [19]. En este paso se convirtió el texto en una matriz en la que cada palabra es una columna cuyo valor es el número de veces que dicha palabra aparece en el texto.

Antes de entrenar el modelo, tenemos que dividir el conjunto de datos en conjunto de datos utilizado en entrenamiento y prueba, esta tarea la realizamos utilizando el módulo de sklearn train_test_split.

3.6 Entrenamiento del algoritmo

Aquí es donde comenzamos a utilizar las técnicas de aprendizaje automático. En este paso se entrenaron los algoritmos de clasificación a través de los vectores de características generados en el preproceso.

Se requirió dos conjuntos de datos uno de entrenamiento y otro para pruebas. El primer conjunto es utilizado para que el algoritmo “aprenda” de las diversas características de los documentos y el segundo conjunto sirve para evaluar el rendimiento del modelo obtenido. Dicho modelo, permite clasificar nuevos documentos, en este caso como positivos o negativos. La idea es que los algoritmos puedan extraer información útil de los datos que le pasamos para luego poder hacer predicciones.

Aplicamos los algoritmos Naives Bayes, Máquina de soporte de vectores (SVM) y también Árboles aleatorios (Random Forest) [35].

El clasificador Naive Bayes usa el Teorema de Bayes, con un supuesto de independencia entre los predictores. En términos simples, un clasificador Bayesiano asume que la presencia de una característica particular en una clase no está relacionada con la presencia de cualquier otra característica.

SVM es un algoritmo de aprendizaje automático supervisado que se puede utilizar tanto para tareas de clasificación como de regresión. SVM realiza la clasificación al encontrar el hiper plano que diferencia las clases que trazamos en el espacio n-dimensional.

Random Forest [36] es un algoritmo que mezcla una combinación de árboles predictores tal que cada árbol depende de los valores de un vector aleatorio probado independientemente y con la misma distribución para cada uno de estos.

3.7 Validación del modelo

Se han utilizado métricas que son de las más utilizadas hoy día para la evaluación de desempeño de modelos de clasificación, para nuestro caso usaremos las métricas en el modelo de clasificación que acabamos de entrenar, estas métricas son: matriz de confusión, medida de F1 y la precisión.

En la librería sklearn de Python podemos encontrar estos métodos para realizar las métricas mencionadas así que para el estudio hemos usado las herramientas classification_report, confusion_matrix y accuracy_score [37].

El puntaje de precisión (accuracy score) lo hemos utilizado para calcular la precisión del clasificador entrenado. Con la matriz de confusión pudimos tener una mejor idea de cómo está clasificando nuestro modelo, ya que nos proporcionó un conteo de los aciertos y errores de cada una de las clases por las que clasificamos. Pudimos comprobar si nuestro modelo está confundiendo entre clases, y en qué medida.

En cada columna de la matriz de confusión tenemos el número de predicciones para cada clase realizadas por el modelo, y cada fila representa los valores reales por cada clase. Con lo cual los conteos quedan divididos en 4 clases, VP (verdaderos positivos), FN (falsos negativos), FP (falsos positivos) y VN (verdaderos negativos). En la figura 3 mostramos los elementos de la matriz de confusión [38].

		Predicción	
		Positivos	Negativos
Observación	Positivos	VP	FN
	Negativos	FP	VN

Figura 3. Elementos de la matriz de confusión.

- VP: Representa las predicciones correctas para la clase.
- FN: La predicción es negativa cuando realmente el valor tendría que ser positivo.
- FP: Son el número de falsos positivos, es decir, la predicción es positiva cuando realmente el valor tendría que ser negativo.
- VN: Son el número de verdaderos negativos, es decir, de predicciones correctas para la clase.

A través del método classification_report podemos crear un informe de texto que muestre las principales métricas de clasificación. Nos muestra un resumen en base a las métricas de: precision, recall, f1-score y support [39].

Los promedios reportados incluyen micro estos promedios se han obtenido promediando el total de positivos verdaderos, falsos negativos y falsos positivos, promedio macro promediando la media no ponderada por etiqueta, promedio ponderado promediando la media ponderada por soporte por etiqueta.

4. Resultados

Pudimos medir en el experimento el `classification_report` que nos brindó información de las métricas comunes de precisión, recall y f1-score para cada etiqueta de POS o NEG de las clases evaluadas con los distintos algoritmos (Naives Bayes, Random Forest, SVM) por lo observado los algoritmos de Random Forest y SVM presentan mejores resultados de precisión. Esto en gran medida a que siempre se ambos algoritmos son considerado mejores para la tarea de clasificación.

En la siguiente gráfica de la figura 4, podemos observar los resultados del `classification_report`:

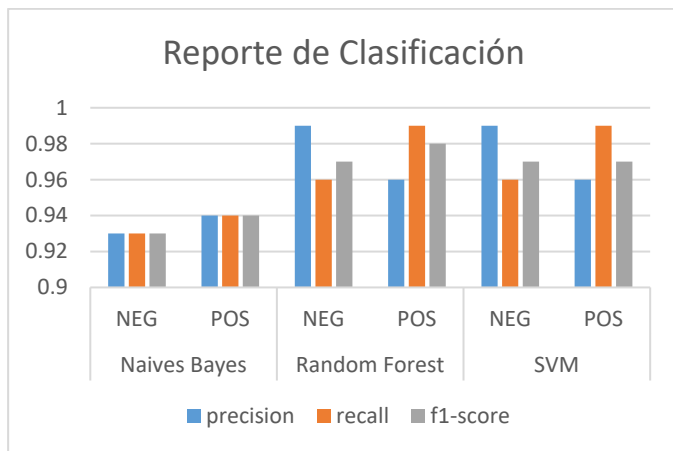


Figura 4. Reporte de clasificacion.

En cuanto a la precisión (accuracy) se refiere a que la hemos podido evaluar objetiva e individualmente en cada modelo. Dando como resultado que el algoritmo de Random Forest presenta un 0.9751 el mejor porcentaje obtenido de los tres. SVM segundo con 0.9735 y por último Naives Bayes con 0.9359, sin embargo, los tres están arriba del 93% lo que es bastante significativo y predice que los modelos están trabajando bien.

5. Discusión

Se han realizado diferentes experimentos. Se basan principalmente en el enfoque de aprendizaje automático, donde hemos combinado resultados de diferentes algoritmos de clasificación y también hemos podido utilizar métricas para ver su precisión.

Después de realizar los experimentos sobre el corpus de TASS en donde les aplicamos distintos algoritmos de aprendizaje automático para la tarea de clasificación de mensajes el rendimiento global obtenido es bastante positivo, ya que cada algoritmo mostro métricas superior al 93% en exactitud.

Aplicamos varios algoritmos de aprendizaje automático para clasificación, en conjunto los tres obtuvieron buenos resultados sin embargo para nuestro experimento nos resultó mejor Random Forest, lo que marca un precedente para otros trabajos similares.

La precisión es un tema importante en el AS. La precisión aún puede mejorarse, consideramos haciendo una selección más cuidadosa del corpus y el etiquetado de polaridad, puesto que en el corpus utilizado muy bien se ven textos valorados como positivos y que pudiesen ser lo contrario, mucho de esto por el cambio cultural o demás. Por lo tanto, este tipo de desafíos se pueden resolver utilizando enfoques innovadores.

El enfoque utilizado de bolsa de palabras produce una buena precisión en comparación con otros enfoques estudiados, pero requiere más esfuerzo computacional y es un método más lento.

6. Conclusiones y trabajos futuros

Se ha presentado una investigación que hace experimentos de AS sobre un corpus de datos que estaba etiquetado con polaridades positivas y negativas, aplicando diferentes algoritmos de aprendizaje automático supervisado y realizando tareas de clasificación. Nuestra meta fue analizar y validar a través de métricas cual algoritmo de los algoritmos presentados de clasificación era más eficiente para nuestros propósitos.

Para ello creamos una metodología que involucró el levantamiento del estado del arte, luego la selección y limpieza de los datos, el preprocesamiento, generación del modelo y su validación.

Consideramos que esta investigación fue positiva y eficiente en cuanto a la metodología propuesta y por otro lado se pudo ver las ventajas que ofrecen el aprendizaje automático en cuanto a la clasificación y procesamiento de texto no estructurado.

En cuanto a trabajos futuros, seguir encaminados en esta área de la IA pues nos parece muy interesante y proponer otros estudios con otro set de datos para ver el comportamiento de los algoritmos de clasificación.

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a la Secretaria Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT), por el apoyo dado en el desarrollo de esta investigación y al Centro Regional de Panamá Oeste de la Universidad Tecnológica de Panamá (CRPO-UTP).

REFERENCIAS

- [1] J. G. Montalvo, "Big Data & Data Science : situación actual y aplicaciones financieras," 2014.

- [2] M. M. Mostafa, "More than words: Social networks' text mining for consumer brand sentiments," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, no. 10, pp. 4241–4251, 2013.
- [3] T. Wilson and P. Hoffmann, "OpinionFinder: A system for subjectivity analysis," *Proc. hlt/emnlp Interact. Demonstr.*, no. October, pp. 34–35, 2005.
- [4] B. Pang and L. Lee, *LR.references.Opinion Mining and Sentiment Analysis*, vol. 2, no. 1–2, 2008.
- [5] N. Barrett, J. H. Weber-Jahnke, and V. Thai, "Engineering natural language processing solutions for structured information from clinical text: Extracting sentinel events from palliative care consult letters," *Stud. Health Technol. Inform.*, vol. 192, pp. 594–598, 2013.
- [6] I. Peñalver-Martínez *et al.*, "Feature-based opinion mining through ontologies," *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 13, pp. 5995–6008, 2014.
- [7] D. C. Moreno and M. V. Lombardo, "Ontología y Procesamiento de Lenguaje Natural," *KnE Eng.*, vol. 3, no. 1, p. 492, 2018.
- [8] O. Araque, I. Corcuera, C. Román, C. A. Iglesias, and J. F. Sánchez-Rada, "Aspect based Sentiment Analysis of Spanish Tweets," *Tass 2015*, pp. 29–34, 2015.
- [9] G. a. Miller, "WordNet: a lexical database for English," *Commun. ACM*, vol. 38, no. 11, pp. 39–41, 1995.
- [10] J. Allan, "NLP for IR Natural Language Processing for Information Retrieval Notice to the reader," pp. 1–50, 2000.
- [11] V. C. Pande and A. S. Khandelwal, "A Survey Of Different Text Mining Techniques," *IBMRD's J. Manag. Res.*, vol. 3, no. 1, pp. 125–133, 2014.
- [12] C. Friedman, T. C. Rindflesch, and M. Corn, "Natural language processing: State of the art and prospects for significant progress, a workshop sponsored by the National Library of Medicine," *J. Biomed. Inform.*, vol. 46, no. 5, pp. 765–773, 2013.
- [13] D. Cedeno-Moreno and M. Vargas-Lombardo, "An ontology-based knowledge methodology in the medical domain in the Latin america: The study case of republic of Panama," *Acta Inform. Medica*, vol. 26, no. 2, pp. 98–101, 2018.
- [14] J. Villena-Román, S. Collada-Pérez, S. Lana-Serrano, and J. C. González-Cristóbal, "Método híbrido para categorización de texto basado en aprendizaje y reglas," *Proces. Leng. Nat.*, vol. 46, pp. 35–42, 2011.
- [15] S. Ordóñez-Salinas and A. Gelbukh, "Information retrieval with a simplified conceptual graph-like representation," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 6437 LNAI, no. PART 1, pp. 92–104, 2010.
- [16] A. Khadjeh Nassirtoussi, S. Aghabozorgi, T. Ying Wah, and D. C. L. Ngo, "Text mining for market prediction: A systematic review," *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 16, pp. 7653–7670, 2014.
- [17] J. Khairnar and M. Kinikar, "Machine Learning Algorithms for Opinion Mining and Sentiment Classification," *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 3, no. 6, pp. 1–6, 2013.
- [18] C.-H. Lee and S.-H. Wang, "An information fusion approach to integrate image annotation and text mining methods for geographic knowledge discovery," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 10, pp. 8954–8967, 2012.
- [19] V. B. and B. M., "Analysis of Various Sentiment Classification Techniques," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 140, no. 3, pp. 22–27, 2016.
- [20] B. Trstenjak, S. Mikac, and D. Donko, "KNN with TF-IDF based framework for text categorization," *Procedia Eng.*, vol. 69, pp. 1356–1364, 2014.
- [21] F. Pedregosa *et al.*, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 12, pp. 2825–2830, 2012.
- [22] J. Brank and D. Mladenic, "Gold Standard Based Ontology Evaluation," *Work. Eval. Ontol. Web, EON*, 2006.
- [23] A. Akusok, K.-M. Bjork, Y. Miche, and A. Lendasse, "High-Performance Extreme Learning Machines: A Complete Toolbox for Big Data Applications," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1011–1025, 2015.
- [24] E. Haddi, X. Liu, and Y. Shi, "The role of text pre-processing in sentiment analysis," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 17, pp. 26–32, 2013.
- [25] X. Zhu, S. Kiritchenko, and S. Mohammad, "NRC-Canada-2014: Recent Improvements in the Sentiment Analysis of Tweets," no. SemEval, pp. 443–447, 2015.
- [26] C. G. Cruz, F. L., Troyano, J. A., Enríquez, F., Ortega, F. J. & Vallejo, "Long autonomy or long delay? The importance of domain in opinion mining," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, pp. 3174–3184, 2013.
- [27] J. C. Min, H.J., Park, "Identifying helpful reviews based on customer's mentions about experiences," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, pp. 11830–11838., 2012.
- [28] F. Chen, L., Qi, L., Wang, "Comparison of feature-level learning methods for mining online consumer reviews," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, pp. 9588–9601, 2012.
- [29] J. Eirinaki, M., Pisal, S., & Singh, "Feature-based opinion mining and ranking," *J. Comput. Syst. Sci.*, vol. 78(4), pp. 1175–1184, 2012.
- [30] N. Kontopoulos, E., Berberidis, C., Dergiades, T. & Bassiliades, "Ontology-based sentiment analysis of twitter posts," *Expert Syst. Appl.*, vol. 40, pp. 4065–4074., 2013.
- [31] N. Li and D. D. Wu, "Using text mining and sentiment analysis for online forums hotspot detection and forecast," *Decis. Support Syst.*, vol. 48, no. September, pp. 354–368, 2010.
- [32] T. Baldwin, P. Cook, B. Han, A. Harwood, S. Karunasekera, and M. Moshlaghi, *A Support Platform for Event Detection using Social Intelligence*. 2012.
- [33] D. Vilares, Y. Doval, M. A. Alonso, and C. Gómez-Rodríguez, "LyS at TASS 2014: A Prototype for Extracting and Analysing Aspects from Spanish tweets," *Tass 2014*, 2014.
- [34] a Holzinger, R. Geierhofer, F. Mödritscher, and R. Tatzl, "Semantic Information in Medical Information Systems: Utilization of Text Mining Techniques to Analyze Medical Diagnoses," *J. Univers. Comput. Sci.*, vol. 14, no. 22, pp. 3781–3795, 2008.
- [35] M. W. Berry, "Survey of Text Mining: Clustering, Classification, and Retrieval," *New York*, p. 262, 2004.
- [36] G. Williams, "Hands-On Data Science with R Text Mining," no. January, 2016.
- [37] I. Spasić, J. Livsey, J. A. Keane, and G. Nenadić, "Text mining of cancer-related information: Review of current status and future directions," *Int. J. Med. Inform.*, vol. 83, no. 9, pp. 605–623, 2014.
- [38] N. Ur-Rahman and J. a. Harding, "Textual data mining for industrial knowledge management and text classification: A business oriented approach," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 5, pp. 4729–4739, 2012.
- [39] M. Othman, H. Hassan, R. Moawad, and A. M. Idrees, "Using NLP Approach for Opinion Types Classifier," *J. Comput.*, vol. 11, no. 5, pp. 400–410, 2018.

Resiliencia de Sistemas Eléctricos de Potencia mediante la Conmutación de Líneas de Transmisión – Estado del arte

Electrical Power Systems Resilience by Switching of Power Transmission Lines – State of art

Jaime Pilatásig Lasluisa ^{1*}, Diego Carrión ¹

¹ Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: jpilatasigl@est.ups.edu.ec

RESUMEN– Los sistemas eléctricos se ven amenazados por diversos factores que afectan la continuidad en el suministro de electricidad, a la economía y a las personas; los eventos extremos tanto derivados del cambio climático o de los desastres naturales, identificados como riesgos de baja probabilidad, pero de alto impacto han causado grandes apagones a nivel mundial. La resiliencia es un aspecto que define la capacidad de los sistemas de energía para recuperarse de los disturbios sean de corta o larga duración. Se aborda la conmutación de líneas de transmisión para incrementar la resiliencia del sistema y reducir costos totales en el contexto del despacho económico. Se resalta los aspectos considerados en las publicaciones que abarcan la temática de la resiliencia en los sistemas eléctricos, la conmutación de las líneas de transmisión bajo escenarios de evaluación de contingencia N-1, y, la planificación de expansión de transmisión comprendiendo los planteamientos de distintos autores y sus conclusiones. En la literatura técnica revisada, se visualiza el alcance de sus resultados para direccionarlos para el estudio de la Restauración Óptima de la Operación de Sistemas Eléctricos de Potencia mediante la Conmutación de Líneas de Transmisión. Se determina que el punto de partida es el flujo óptimo de potencia DC (DCOPF), encontrándose la mejor solución y sobre todo la minimización de los costos totales de despacho.

Palabras clave– Resiliencia, líneas de transmisión, conmutación de líneas de transmisión, sistemas eléctricos de potencia, operación óptima, flujos óptimos de potencia, planificación de expansión de transmisión.

ABSTRACT– Power systems are threatened by various factors that affect the continuity in the supply of electricity, the economy and people; extreme events, derived from climate change or from natural disasters, identified as low probability but high impact risks have caused major blackouts worldwide. Resilience is an aspect that defines the ability of energy systems to recover from short or long-term disturbances. The switching of transmission lines is addressed to increase the resilience of the system and reduce total costs in the context of the economic dispatch.

It highlights the aspects considered in the publications that cover the theme of resilience in the power systems, the transmission lines switching under scenarios of contingency evaluation N-1, and, transmission expansion planning including the approaches of different authors and their conclusions. In the revised technical literature, the scopes of their results are highlighted to direct them for the study of the Optimal Restoration of the Power Systems Operation by means of Transmission Lines Switching. From which it is determined that the starting point is the Dc optimal power flow (DCOPF), finding the best solution and the minimization of the total costs of dispatch.

Keywords– Resilience, climate change, transmission lines, switching, modeling, optimization, cost, transmission expansion planning.

1. Introducción

Los sistemas eléctricos están expuestos a sufrir perturbaciones severas que pueden llevar a su colapso, siendo así que el número y duración de las desconexiones son afectadas por factores ambientales, físicos y

tecnológicos [1], los eventos relacionados al clima extremo están considerados dentro de las principales causas que influyen significativamente en la confiabilidad y operación de los componentes del sistema eléctrico [2]–[5], los desastres naturales en más de una

Citación: J. Pilatásig y D. Carrión, “Resiliencia de Sistemas Eléctricos de Potencia mediante la Conmutación de Líneas de Transmisión – Estado del arte”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 25 de octubre de 2019. **Recibido con correcciones:** 25 de octubre de 2019. **Aceptado:** 7 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 J. Pilatásig y D. Carrión. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

ocasión han comprometido el suministro de electricidad [6]. Este impacto se evidencia en la sociedad y en la economía, por lo que se ha encaminado varias investigaciones sobre la capacidad de restaurar los servicios de energía inmediatamente [7], buscándose determinar varias estrategias o modelos para mejorar la resiliencia de los sistemas eléctricos.

Cada día los sistemas eléctricos se vuelven más complejos, se integran energías renovables no convencionales, nuevas tecnologías, con lo cual se han consolidado los aspectos relacionados a la generación distribuida, redes inteligentes, que deben ser analizadas integralmente con el sistema eléctrico, de este modo buscando mejorar la resiliencia ante cualquier evento.

En [8], considera siete indicadores clave para la resiliencia de un sistema eléctrico, siendo: a) la dependencia del combustible no renovable en la generación, b) la eficiencia de la generación que pretende el balance de la energía requerida versus la energía generada, c) la eficiencia de la distribución, que incluye las pérdidas en transmisión y distribución así como el consumo en la industria, d) la intensidad de dióxido de carbono en la generación, la dependencia de combustibles fósiles en la generación incrementará los costos de producción y el precio del cambio climático, e) diversidad en la generación, es decir, la pertinencia de que la generación de electricidad considere diversos tipos de combustibles o fuentes de energía, f) Potencia redundante para disponer de capacidad para responder ante eventos de alta probabilidad y bajo impacto, g) confianza en la importación, para aquellos países que dependen de la importación de electricidad.

Un sistema de potencia resiliente debe ser capaz de ejecutar acciones preventivas, mitigar el impacto de eventos extremos, responder de forma óptima a través de procedimientos de control automatizados, reducir el tiempo para restablecer el servicio de electricidad y propender a ahorros económicos significantes, según [9].

Un componente importante de un sistema eléctrico, y enlace entre la generación y la carga son las líneas eléctricas, que de igual manera son susceptibles a diversos riesgos, que de materializarse el impacto es sumamente alto; en este sentido, se explora diversos métodos para maximizar la resiliencia del sistema eléctrico a través de la conmutación de líneas de transmisión.

El método tradicional para evaluar la confiabilidad se basa en la simulación de Monte Carlo (MCS), en [10], se presenta un método para clasificación de contingencia que se incorpora para evaluar la confiabilidad de la operación de conmutación de líneas. De lo cual se obtiene un listado de clasificación de líneas recomendadas, líneas seguras y líneas críticas resultantes del análisis de índices anuales y de eventos, determinando que la conmutación de las líneas recomendadas mejora la confiabilidad del sistema.

El punto de partida, son los resultados obtenidos en las investigaciones consideradas, validando sus planteamientos y en gran parte buscando su integración.

Este documento resume los principales esfuerzos de la investigación reciente en la resiliencia de los sistemas eléctricos y se enfoca en los aspectos de la conmutación de líneas de transmisión. Siendo la sección 2 donde se presenta los conceptos y los aspectos de la resiliencia, su interrelación con los eventos externos extremos, derivados del cambio climático y de los desastres naturales, principalmente; la sección 3 enfatiza en la conmutación de líneas de transmisión desde los aspectos de mejorar la resiliencia del sistema de potencia hasta la reducción de costos de despacho de generación, asimismo, se estudia la inclusión del análisis de contingencia N-1 en tiempo real (RTCA); la sección 4 se presentan las conclusiones más relevantes de las contribuciones consideradas en este documento.

2. Metodología

2.1 Resiliencia en sistemas de potencia

Los modelos globales del clima (GCM) usan un sistema de ecuaciones para representar muchos aspectos del clima, estos aspectos permiten determinar los impactos de eventos de clima extremo en los sistemas eléctricos; los componentes de los sistemas eléctricos se ven amenazados a nivel mundial por el cambio climático, de las recientes investigaciones se determinan impactos como el incremento de la demanda de electricidad, afectación en la capacidad efectiva y eficiencia de generadores térmicos, disminución de los recursos potenciales hidráulicos, de viento y sol para la generación de electricidad y la reducción de la capacidad de transmisión [11].

Para [12], existen varios artículos técnicos que estudian sobre los riesgos que afectarían las infraestructuras críticas de energía en relación con el

impacto del cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos, en contraste, sólo unos pocos artículos consideran la resiliencia e interdependencia con otros sistemas.

A nivel mundial, de la energía generada entre el 60% y 80% se consume en las áreas urbanas, de ahí que la continuidad del suministro de electricidad se ve afectada por el cambio climático y por otras amenazas (ataques cibernéticos, terrorismo, deficiencias técnicas, mercados inestables), afectando a la sociedad en los aspectos económicos y de la vida diaria [13]. Conceptualmente se propone que un sistema resiliente debe ser capaz de planificar y prepararse para absorber, recuperarse y adaptarse a cualquier evento adverso que pueda suceder, por ejemplo: desastres naturales, por citar sismos, incendios, inundaciones, erupciones volcánicas, huracanes que podrán considerarse de probabilidad baja pero de alto impacto.

Ante estos eventos adversos [14], los sistemas eléctricos deben ser capaces de tolerar estas perturbaciones y continuar con el suministro de electricidad, la resiliencia de un sistema es la capacidad que tiene para recuperarse rápidamente de una gran desconexión o evento a través de cualquier medio para continuar con el suministro de electricidad. En la figura 1 se presenta una clasificación de las causas principales de desconexiones en un sistema.

Hasta la actualidad se han efectuado varias investigaciones partiendo de definir el concepto de resiliencia, entre los cuales se determina que refleja como una infraestructura de un sistema puede moderar las consecuencias de un evento impredecible raro de alto impacto (Black Swan) o de un evento parcialmente predecible raro de alto impacto (Gray Swan) en [15]; en la figura 2 se presenta una curva de comportamiento típico de un sistema ante un incidente.

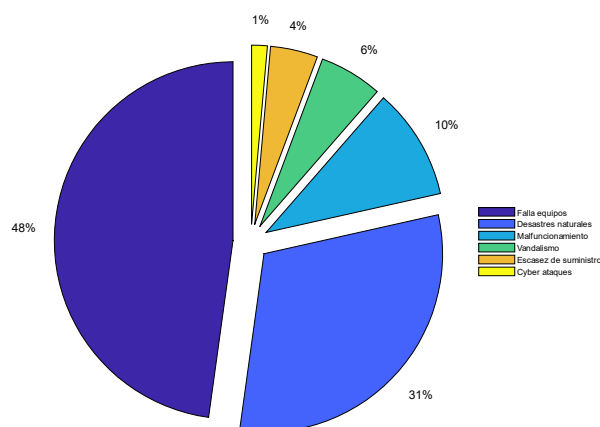


Figura 1. Principales causas de desconexiones.

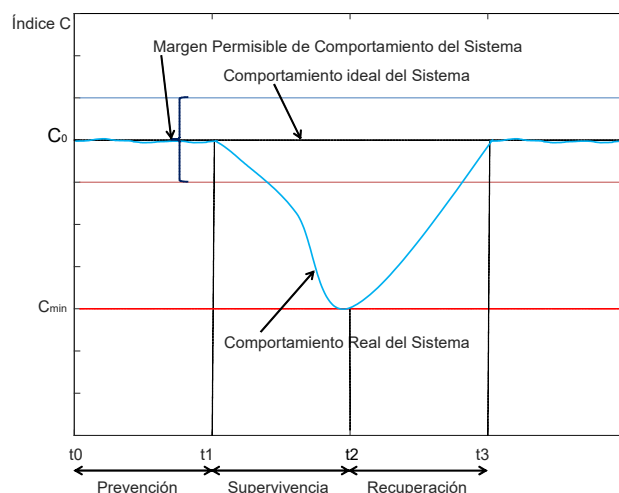


Figura 2. Comportamiento del Sistema de potencia después de un incidente raro de alto impacto.

Por otro lado en [16], se establece que la resiliencia cyber física de un sistema de potencia corresponde a su habilidad para mantener el suministro continuo de electricidad a los clientes bajo un esquema de priorización de carga.

Las métricas de resiliencia que permite disponer de atributos clave son identificados en los cálculos de estabilidad de pequeña señal, cálculos de estabilidad transitoria y el impacto de la latencia de comunicación que permiten determinar un modelo de resiliencia estableciendo una región de confiabilidad [17]; en la figura 3 se presenta un modelo de resiliencia.

En [18], se efectúa una evaluación empírica sobre la resiliencia de la red eléctrica de los EE.UU. soportada en

la base de datos de eventos de perturbaciones eléctricas, se analiza tres componentes clave asociados con cada apagón y recuperación del sistema de potencia, el tiempo entre interrupciones, pérdida de rendimiento en cada interrupción y el tiempo empleado para la recuperación del sistema, para estos tres componentes se detecta su tendencia a través de la prueba Lewis-Robinson corrigiendo las pruebas estadísticas Military handbook y de Laplace.

A través de una metodología sencilla se evalúa la resiliencia y su interdependencia con subsistemas de la infraestructura de red, el método combina las medidas de resiliencia, modelos de entrada y salida y fragilidades estructurales, según [19].

En [20], recopila 472 contribuciones relacionados a la ingeniería de resiliencia que tiene como objetivo proporcionar herramientas para gestionar proactivamente el riesgo, reconociendo la complejidad inherente al funcionamiento del sistema y la correspondiente necesidad de variabilidad del rendimiento; la definición de métodos para identificar las causas que pueden afectar a la resiliencia de un sistema de energía y sobre todo establecer soluciones que permitan maximizar la resiliencia, sin embargo todavía no se ha definido una receta definitiva.

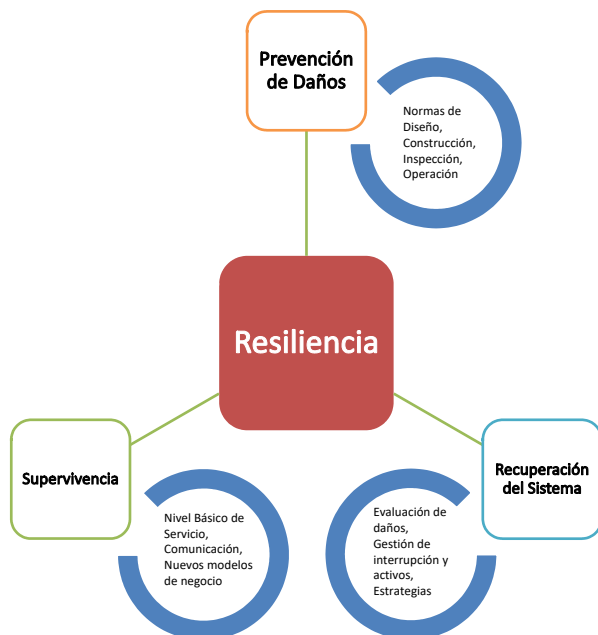


Figura 3. Modelo de Resiliencia.

El sistema eléctrico si bien al inicio de la contingencia puede mantenerse robusto y resistente podrá no ser capaz de soportar la perturbación, para corregir esta situación se plantea el modelado de soluciones que sean robustas a los errores [21], integrando las restricciones de seguridad (contingencia), redes inteligentes, generación distribuida, energías renovables no convencionales, el impacto del clima y la gestión de los riesgos, sin embargo, el concepto de resiliencia en los sistemas de potencia y sus principales amenazas aún no está del todo claro, particularmente en términos de aspectos de modelado y análisis cuantitativos.

En [22], se presenta un modelo de optimización para establecer estrategias secuenciales de operación proactiva, los operadores del sistema tomaran la decisión de ajustar estas estrategias conforme al estado del sistema en tiempo real. Se lo modela con un proceso discreto de decisión en el tiempo de Markov; la estrategia óptima para cada estado del sistema debe asegurar el costo mínimo esperado; en la figura 4 se representa las fases de operación de un sistema, en condiciones normales debería situarse entre normal y emergencia.

De la literatura revisada, se puede destacar estudios que consideran la estimación de estado, modelos de redespacho de generación, la determinación de curvas de fragilidad aplicable a la infraestructura, modelos de regresión de error y de cadena de fallas para determinar líneas sensibles [23], en el Algoritmo 1 se presenta un proceso para determinar el conjunto de líneas sensibles.

Modelos para restauración de sistemas eléctricos que consideran los tiempos de restauración en líneas de transmisión, generalmente se emplean datos históricos de al menos 10 años, con lo cual las estimaciones del tiempo medio de restauración es altamente variable debido a grandes fluctuaciones inherentes a los datos, una buena práctica es el procesamiento automático de la mayor cantidad de datos disponibles para las empresas que operan sistemas de potencia [24].

En la literatura se ha propuesto varios modelos para evaluar el daño en los sistemas de potencia, la duración de la desconexión y restauración después de desastres naturales, sin embargo esta evaluación se la hace después de la ocurrencia del evento extremo. La tarea más importante para el operador del sistema es restaurar el sistema de potencia lo más pronto posible para restablecer las cargas críticas y minimizar las pérdidas

económicas a los usuarios. Este proceso de restauración puede ser considerado en tres etapas: preparación, restauración del sistema y restablecimiento de la carga, asimismo la generación distribuida puede aportar para mejorar la resiliencia de la red asegurando la disponibilidad de generación en las estrategias de mitigación [25].

Técnicas o metodologías de optimización combinadas se analizan en [26] para la planificación de líneas de transmisión, sin embargo es una tarea compleja debido al problema de la optimización que radica en la exactitud, tiempo de cálculo y confiabilidad, para obtener una solución óptima se encuentra al combinar dos o más técnicas de optimización, algoritmos para gerenciamiento de potencia, sistemas reconfigurables, optimización de topología, modelamiento del clima, optimización del control, gestión de la confiabilidad, sincronización.

El campo de investigación abordado es bastante amplio, y sobre todo acoplar los diversos resultados en una solución única o patrón, no es una tarea fácil, depende de las necesidades de las empresas encargadas de los sistemas eléctricos en función de las acciones a corto y largo plazo que prevean, y en las estrategias que permitan obtener beneficios óptimos para su sustentabilidad.

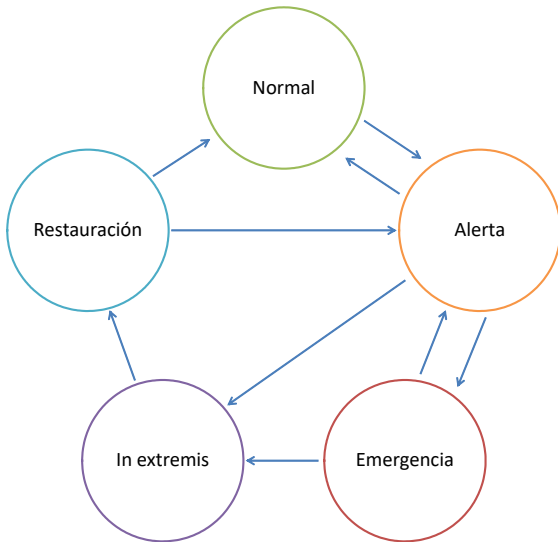


Figura 4. Fases de operación de un sistema.

Para definir el conjunto de líneas sensibles del sistema se debe considerar los siguientes tipos: Tipo 1, la desconexión de las líneas correspondientes, como el segmento inicial de una cadena de falla, causará

directamente inestabilidad del sistema; Tipo 2, la desconexión de las líneas correspondientes, como el segmento inicial, seguirá causando inestabilidad del sistema después que se disparen todos los segmentos medios y el nivel de riesgo para la cadena de falla completa es de 4 o 5.

La inestabilidad del sistema es causada por varios accidentes (segmentos) en serie, denominado cadena de falla

Algoritmo 1. Proceso de cálculo de conjunto de líneas sensibles

Inicio	
Paso 1:	Input Estadística de fallas, carga de la línea, coeficiente de correlación //Para el segmento inicial. Transferencia de potencia, secuencia de sobrecarga de líneas, daños a secciones de transmisión //Para segmento medio*/ Li //Cadena de falla Tij //Segmento j-énimo de la cadena de falla i-énimo*/ Hij //Factor de influencia 0(Tij) //Función condición de cada segmento
Paso 2:	Calcular función condición del segmento inicial 0(Tij) Valor Max 0(Tij) /*Clasificación de 10 líneas*/ Filtrar líneas con máximo 0(Tij) /*líneas críticas o vulnerables del sistema*/ Desconectar una L/T con máximo 0(Tij)
Paso 3:	Calcular cadena de falla Elegir segmentos de cadena de falla Calcular flujo de potencia /*nuevo estado del sistema*/
Paso 4:	SI Flujo de potencia no converge, Sistema Inestable? 0(Tij) /*Calcular función condición de segmentos medios*/ Establecer segmentos medios Flujo de potencia no converge, Sistema Inestable? Fin NO
	<i>Entonces si no</i> <i>Entonces si</i>
Paso 5:	SI Adicionar segmentos en conjunto cadena de falla Todos los segmentos establecidos? Filtrar líneas con máximo 0(Tij) /*líneas críticas o vulnerables del sistema*/
	<i>Entonces si no</i> <i>Entonces si</i>
Paso 6:	Pri * ci /*Calcular riesgo Ri, probabilidad por consecuencia de Li*/ Evaluar nivel de riesgo de cadena de falla /*Nivel 1, 2, 3, 4, 5, de baja a alta probabilidad y severidad*/ Líneas cadenas de falla de un segmento Conjunto de línea sensible tipo 1 Líneas cadenas de falla de más de un segmento Conjunto de línea sensible tipo 2
Paso 7:	Identificar línea sensible
Fin	

Los artículos enunciados, hasta ahora, consideran el análisis de la resiliencia del sistema eléctrico bajo la

conceptualización de lo que define a un sistema resiliente.

2.2 Conmutación de líneas de transmisión

En esta sección se presenta las contribuciones en el tema de la conmutación de líneas de transmisión, que permitirá comprender la definición del problema.

En [27], la conmutación óptima de líneas de transmisión se considera para reducir costos de generación a través de la desconexión de líneas de transmisión, emplea el modelo de flujo de potencia óptimo DC, clasifica las líneas candidatas a conmutación, posteriormente, a través de una modificación de la heurística en base al DCOPF se usa el flujo de potencia óptimo AC, [28], sin embargo aumenta el tiempo de cómputo siendo poco práctico para sistemas reales, por lo cual aún persisten futuras investigaciones.

Para [29], establece que la conmutación de líneas de transmisión produce un gran ahorro en los costos en especial al limitar el número de líneas a conmutar, el algoritmo implementado como programación de enteros mixtos, presenta mejora en la velocidad de cómputo.

La conmutación en la transmisión ha sido considerada como un método de control para problemas de sobre y bajo voltaje, sobrecargas de líneas de transmisión, reducción de pérdidas y costos, mejora de la seguridad del sistema, por citar algunos; En [30], se aborda el problema de la conmutación óptima de transmisión (OTS), se formula el problema como un programa lineal de enteros mixtos, basado en el flujo óptimo de potencia DC (DCOPF) que se lo usa en el despacho de generadores, emplea variables para representar el estado abierto o cerrado de las líneas de transmisión, sin embargo, se podría usar un flujo óptimo de potencia AC (ACOPF), condición que requerirá más tiempo de solución debido a la complejidad computacional.

Para el flujo de potencia óptimo básico, la función objetivo, maximiza los costos totales del sistema, sujeta a restricciones físicas del sistema y flujos de potencia.

$$TC = \text{Max} \sum_g c_{ng} P_{ng} \quad (1)$$

Siendo, c_{ng} el costo de generación de electricidad desde el generador g ubicado en el nodo n ; P_{ng} el flujo de potencia activa hacia o desde el generador g al nodo n .

Cinco restricciones representan los límites de operación física de la red: el límite del ángulo de voltaje,

el límite de capacidad del generador g , el límite del flujo de potencia a través de la línea de transmisión, el balance de potencia en cada nodo, y, las leyes de Kirchhoff.

Para el flujo de potencia óptimo con conmutación óptima de transmisión, la función objetivo maximiza el costo total del sistema con un número j de líneas de transmisión:

$$TC_j = \text{Max} \sum_k c_{nk} P_{nk} \quad (2)$$

Siendo, k las líneas de transmisión, la inclusión de restricciones adecuadas fortalece la función objetivo: la quinta restricción se modifica, y se incorpora el límite de líneas abiertas en la red óptima. Como resultados de la simulación en el sistema de prueba de IEEE 118 barras, se evidencia que la conmutación de líneas de transmisión, sin afectar la confiabilidad mejora el despacho económico; sin embargo, podría efectuarse un análisis de contingencias para validar que la seguridad y confiabilidad no se vean afectadas.

En [31], a través de un método secuencial investiga la seguridad del sistema posterior a conmutación óptima de transmisión, considerando el criterio de contingencia N-1, la formulación del problema OTS y evaluación de la seguridad se basa en el flujo óptimo de potencia AC con un modelo de programación no lineal de enteros mixtos, resultando un incremento del costo total al considerarse las restricciones de seguridad, comparado en algunos casos sin restricciones.

Una solución de conmutación de transmisión, no necesariamente es óptima, pues una modificación de la topología podría afectar las métricas de la seguridad probabilística del sistema, por ende antes de implementar una solución OTS debe realizarse un análisis de seguridad probabilística, [32]; Determinar el conjunto óptimo de líneas a conmutar trae consigo una enorme carga computacional, debido a las formulaciones matemáticas y a las variables binarias que se añaden al modelo, por ende debe tratarse de desarrollar un algoritmo de corte plano que genere desigualdades válidas y variables fijas, [33].

Para [34], la aproximación DC del modelo de flujo de potencia en el problema de conmutación óptima de transmisión puede conducir a soluciones imprecisas y no considerar problemas de estabilidad. Por lo cual se enfoca en el modelo de flujo de potencia AC completo con relajación a través de programación de enteros

mixtos de segundo orden; sin embargo, la conmutación óptima de transmisión AC es un problema muy desafiante debido a que presenta al menos dos tipos de no convexidades.

En [35], presenta dos formulaciones matemáticas para conmutación óptima de transmisión, con flujos de potencia óptimos DC y AC, de la comparación el flujo de potencia óptimo AC logra el costo operacional más bajo y con menor tiempo de cómputo que el flujo de potencia óptimo DC.

En [36], a partir del problema de Conmutación Óptima de Transmisión (OTS) que es modelado en base al Flujo Óptimo de Potencia DC (DCOPF), propone un modelo aproximado para el problema OTS. La función objetivo en el modelo OTS (3) tomada de [36], considera minimizar los costos totales de la generación de electricidad sujeto a que: a) la potencia que ingresa y sale de un nodo sea igual; b) los ángulos de voltaje en barras conectadas y el flujo de potencia en líneas conectadas; c) límite térmico de las líneas; d) capacidad de los generadores; e) límites de la diferencia de los ángulos de fase de las barras conectadas; sin embargo, el programa de enteros mixtos presenta dificultad para resolver cuando hay un gran número de líneas de transmisión.

$$\text{Min}, P_1 = \sum_n C_n g_n \quad (3)$$

Donde, C_n es el costo de operación del generador n , y , g_n es la potencia generada por el generador n .

En el modelo aproximado OTS la función objetivo (4) tomada de [36], ϵ_k es una variable de decisión, y , C' es un número constante.

$$\text{Min}, P_3 = \sum_n C_n g_n + C' \sum_k \frac{\epsilon_k}{M_k} \quad (4)$$

Como resultado del análisis efectuado en sistemas de prueba de 14, 39, 57, IEEE 118 y 2383 barras, el modelo aproximado OTS provee similar o el mismo ahorro en el costo, pero, con menor número de líneas de transmisión conmutadas.

Con la finalidad de encontrar la mejor solución al problema de OTS, en [37], se aborda la conmutación de la transmisión con cierta eficiencia económica mientras la seguridad de la red es sujeta a una contingencia N-1. A través de la formulación DCOPF N-1 se asegura que el sistema sobrevivirá a la pérdida de cualquier línea de transmisión o generador, de igual manera, buscando

minimizar los costos sujetos a restricciones físicas del sistema y leyes de Kirchhoff de flujos de potencia:

$$\text{Min: ETC} = \sum_{g,c} \rho_c C_{ngc} P_{ngc} + \sum_{k \in K'} C_k Z_k \quad (5)$$

Siendo: ρ_c la probabilidad de estado de c , cuando $c=0$ no hay contingencia, para $c>0$ hay una contingencia N-1; C_{ngc} el costo de producción desde el generador g en el estado c ; P_{ngc} suministro de potencia desde el generador g en el nodo n para el estado c ; Z_k variable binaria para el elemento de transmisión, 0 abierto y 1 cerrado.

Las restricciones consideran: ángulo del voltaje en el nodo n para el estado c , balance de potencia en los nodos, límites de líneas de transmisión y generadores para cada estado; debido a la complejidad computacional, se simplifica el modelo con condiciones iniciales de costo cero y sin probabilidad de falla, esto para cuantificar el ahorro con la conmutación de líneas de transmisión ante la contingencia N-1.

Como resultado, se obtiene una reducción de aproximadamente 15% en el costo sujeto a una contingencia N-1, conmutando líneas de transmisión en el despacho de generación.

Si bien aún persisten desafíos que no han sido estudiados a profundidad, por citar: la complejidad computacional al manejar un modelo completo, la incorporación de sistemas reales a gran escala, la evaluación de la estabilidad dinámica del sistema y la aplicación de ACOPF, han permitido que [38] considere una corrección AC a la conmutación de transmisión en base al análisis de contingencias en tiempo real, lo cual usa datos del estimador de estado y del análisis de contingencias en flujos de potencia AC.

El análisis de contingencias en tiempo real RTCA, no considera ninguna optimización, no impone ninguna restricción, su finalidad es identificar contingencias críticas que puedan afectar la confiabilidad del sistema.

Con respecto a la estabilidad del sistema eléctrico, las contingencias, la conmutación de líneas de transmisión asocian cambios importantes en la estabilidad del sistema, lo que podría volverlo vulnerable haciéndolo inestable; siendo esta condición la causa de varios apagones.

La estabilidad del sistema evalúa únicamente si la conmutación de transmisión obtenida es estable. La simulación en el dominio del tiempo considera las contingencias en líneas de transmisión y en generadores.

Se identifica que la conmutación de transmisión, reduciría los costos operativos, mejoraría la confiabilidad del sistema y mejoraría la incorporación de recursos renovables. En el Algoritmo 2 se presenta el procedimiento RTCA.

Algoritmo 2. Procedimiento para RTCA con CTS	
Inicio	
Paso 1: Input	
ACOPF	<i>/*Información del estado del sistema y topología*/</i>
Paso 2: Ejecutar CA //Análisis de contingencia	
Paso 3: Resultados CA //Mostrar resultados	
Paso 4: Identificar contingencias críticas	
Paso 5: Mostar c=1 //Contingencia c (N-1)	
Paso 6: Generar lista de elementos de conmutación	
Paso 7: Comprobar reducción de violaciones	<i>/*Conmutación de transmisión*/</i>
Paso 8: Seleccionar 5 soluciones de conmutación	
Paso 9: SI	Contingencias críticas verificadas?
	Entonces si no
	For c=c+1 //Contingencia c (N-1-1)
	Generar lista de elementos de conmutación
	Comprobar reducción de violaciones
	<i>/*Conmutación de transmisión*/</i>
	Seleccionar 5 soluciones de conmutación
	Entonces si
Fin SI	
Fin	

Para [39], la conmutación óptima de transmisión se emplea como una herramienta para manejar la congestión en la red eléctrica, cambiando la topología. La conmutación de transmisión se formula como un problema de optimización; para aliviar la congestión se considera la seguridad de voltaje, se desarrolla a través de flujos óptimos de potencia con restricciones AC y variables binarias.

Una metodología para manejar la congestión usando conmutación óptima de transmisión considera la minimización del costo total de operación y la maximización de la confiabilidad, incluye la posibilidad de cambio de topología existente, como resultados de obtiene un ahorro substancial sin afectar la confiabilidad del sistema se describe en [40].

2.3 Conmutación de líneas en planificación de transmisión

En [41], el problema tradicional de la planificación de la expansión de transmisión (TEP) es minimizar el costo de inversión de la línea de transmisión, sin embargo un objetivo ideal sería el bienestar social. Considera la siguiente función objetivo:

$$\begin{aligned} \text{Min } C = & \sum_{t=1}^{\text{TPL}} \sum_{k \in \Omega_k} \frac{c_k (z_{kt} - z_{kt-1})}{(1+d)^{t-1}} \\ & + \sum_{t=1}^{\text{TOP}} \sum_{g \in \Omega_g} \frac{CG_{gt}}{(1+d)^{t-1}} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde, el primer término representa el costo total de planificación, el segundo término representa el costo total de operación del generador; c_k es el costo de construir la línea k , z_{kt} es una variable de decisión binaria para determinar si se construye o no la línea; $c_k(z_{kt} - z_{kt-1})$ garantiza que c_k es una inversión única; la variable inicial de decisión z_{k0} es cero. TPL y TOP son los horizontes totales de planificación y operación anual, respectivamente; CG_{gt} corresponde el costo de energía del generador; d es un factor de descuento.

Las restricciones del problema entre otras consideran el balance de potencia en cada nodo, si una línea existe o es seleccionada para construirse, el flujo máximo a través de la línea, la diferencia angular entre dos nodos, el límite de generación programada.

Para [42], la planificación de la expansión usando conmutación de transmisión la define como un problema principal o maestro de plan óptimo de inversión, que se complementa con dos problemas para verificación de la seguridad y la operación óptima. Un conjunto típico de restricciones de planificación consideran: fondos de inversión de capital, recursos proyectados y capacidad de la línea, número máximo de unidades de generación y líneas de transmisión a añadirse, tiempo de construcción de la inversión candidata; por otro lado las restricciones de operación consideran: balance de potencia, límites de flujo por líneas de transmisión, límites de generación; es decir, minimiza el costo total del sistema mientras satisface las restricciones de seguridad y confiabilidad del sistema.

En [43], el objetivo de la formulación TEP es encontrar una estructura de transmisión óptima para satisfacer la demanda de carga máxima con mínima inversión y pérdidas de costo de carga, mientras se satisfacen las limitaciones operativas.

En [44], a partir del modelo matemático para planificación básica que usa un modelo DC sin considerar la incertidumbre de la demanda, se plantean dos modelos que consideran la incertidumbre en la demanda total e individual en cada barra de carga, de esta

forma la demanda se considera como una variable del problema ya no es un dato.

$$\text{Min } v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} \quad (7)$$

$$\text{Min } v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum r_i - \beta z \quad (8)$$

$$\text{Min } v = \sum_{(i,j) \in \Omega} c_{ij} n_{ij} + \alpha \sum r_i - \delta \sum d_i \quad (9)$$

Donde, v es la inversión; c_{ij} , n_{ij} representan el costo de un circuito y el número de circuitos que pueden ser añadidos al derecho de paso $i - j$; r es el vector de desconexión de carga; α es un parámetro de penalización en la función objetivo por desconexión de carga del sistema; β (USD/MW) es el parámetro que maximiza la demanda suministrada en el sistema; d_i es la demanda en cada barra de carga i ; δ (USD/MW) es el parámetro que maximiza la demanda suministrada en cada barra en el sistema; Ω es el conjunto de todos los derechos de paso.

En si con el problema de TEP, podría obtenerse una planificación más barata que satisfaga toda la demanda que podría incrementarse en el futuro, evitando una expansión sobre dimensionada del sistema.

3. Resultados

La aplicación de los modelos determinados en la revisión literaria, determinando las restricciones que permitan alcanzar la solución óptima sin penalizar la respuesta computacional, permitirán demostrar que una red puede satisfacer el estándar N-1 mientras se reducen los costos incorporando la conmutación de líneas de transmisión, favoreciendo así el despacho económico de generación, en [37] a través de los sistemas de pruebas, se obtuvo hasta un ahorro de 15% en el costo de generación con un modelo N-1 DCOPF debido a la conmutación de la transmisión.

Para [39], la administración de la congestión de la transmisión usando conmutación de líneas de transmisión considerando criterios N-1 y seguridad de voltaje, permitió determinar las líneas más idóneas a ser desconectadas para aliviar la congestión, sin embargo, la seguridad del sistema juega un rol importantísimo que

puede comprometer la remoción de la congestión del sistema.

Para [41–44], si bien en esencia los modelos determinan la expansión del sistema a través de la construcción o no de una línea de transmisión o de un generador, en los diferentes resultados para un sistema en específico, las líneas o generadores candidatos no siempre pueden coincidir debido a la complejidad de los modelos a través de las restricciones.

Los modelos previstos por los diversos autores, son resueltos mediante programación lineal entera mixta, las funciones objetivo se enfocan en la minimización de los costos de operación, se plantea la metodología de los flujos óptimos de potencia en DC y AC, siendo el primero menos complejo y computacionalmente más rápido, su simplicidad permite tener un margen aceptable de precisión, posteriormente al incorporar los criterios de seguridad y estabilidad del sistema analizando contingencias N-1, se prevén estrategias que puedan ser implementadas por los operadores de los sistemas eléctricos.

Asimismo, se espera que los potenciales beneficios de la conmutación óptima de transmisión y sus efectos en la estabilidad, confiabilidad y seguridad del servicio del sistema no decrezcan, estableciéndose como un sistema resiliente ante contingencias N-1.

El problema TEP podría considerarse en el horizonte de la operación del sistema de transmisión, dándole un enfoque adecuado en el aspecto de la resiliencia a través del restablecimiento del sistema después de una contingencia, evaluando líneas candidatas existentes para ser conectadas o desconectadas.

4. Conclusiones

Las investigaciones actuales han contribuido para establecer una definición de resiliencia en un sistema de potencia, a pesar que no se ha determinado una metodología o identificado métricas óptimas que permitan cuantificar la resiliencia en un sistema eléctrico, se requiere disponer de una visión clara del estado del sistema antes, durante y después de ocurrido un evento extremo severo.

Cuantificar la resiliencia depende de la interrelación con otros sistemas y factores sociales, económicos y de infraestructura. Se han propuesto varios modelos que abordan la problemática, por citar cadenas de Markov, simulación de Monte-Carlo, de regresión, de cadena de

falla, de optimización, etc. Todos en busca de las mejores soluciones que permitan obtener beneficios comprobados, sin embargo, se han obtenido buenos resultados sin alcanzar lo óptimo.

Se han identificado estrategias de mejora en lo que respecta a la capacidad operacional y de recuperación de la infraestructura, donde se considera un rol importante la concientización de los operadores del sistema, contrastado con la intención de que casi no exista intervención humana, para que el sistema se adapte y recupere ante cualquier evento.

La óptima conmutación de líneas de transmisión que permitan maximizar la resiliencia del sistema eléctrico, presenta aspectos atractivos en función de minimizar el costo total de despacho; en la planificación y operación de los sistemas eléctricos, el modelamiento permitirá determinar las líneas y sus tramos sensibles, determinar las líneas candidatas para conmutación, cuantificar el flujo de potencia, optimizar el despacho de generación y mantener la mayor cantidad de carga.

Las investigaciones citadas presentan buenos resultados, por lo tanto su metodología es aplicable en la restauración del sistema eléctrico a través de la conmutación de líneas de transmisión, validando las restricciones físicas, de tal forma que los modelos permitan obtener resultados confiables en las simulaciones.

REFERENCIAS

- [1] R. S. Liévanos and C. Horne, "Unequal resilience: The duration of electricity outages," *Energy Policy*, vol. 108, no. August 2016, pp. 201–211, 2017.
- [2] M. Panteli and P. Mancarella, "Influence of extreme weather and climate change on the resilience of power systems: Impacts and possible mitigation strategies," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 127, pp. 259–270, 2015.
- [3] M. Panteli, P. Mancarella, D. N. Trakas, E. Kyriakides, and N. D. Hatziaargyriou, "Metrics and Quantification of Operational and Infrastructure Resilience in Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 4732–4742, 2017.
- [4] M. Panteli, C. Pickering, S. Wilkinson, R. Dawson, and P. Mancarella, "Power System Resilience to Extreme Weather: Fragility Modeling, Probabilistic Impact Assessment, and Adaptation Measures," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 5, pp. 3747–3757, 2017.
- [5] M. Panteli, D. N. Trakas, P. Mancarella, and N. D. Hatziaargyriou, "Power Systems Resilience Assessment: Hardening and Smart Operational Enhancement Strategies," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1202–1213, 2017.
- [6] G. Huang, J. Wang, C. Chen, J. Qi, and C. Guo, "Integration of Preventive and Emergency Responses for Power Grid Resilience Enhancement," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 6, pp. 4451–4463, 2017.
- [7] P. Dehghanian, S. Aslan, and P. Dehghanian, "Maintaining Electric System Safety Through An Enhanced Network Resilience," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 54, no. 5, pp. 4927–4937, 2018.
- [8] L. Molyneaux, L. Wagner, C. Froome, and J. Foster, "Resilience and electricity systems: A comparative analysis," *Energy Policy*, vol. 47, pp. 188–201, 2012.
- [9] J. Wang and H. Gharavi, "Power Grid Resilience [Scanning the Issue]," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1199–1201, 2017.
- [10] S. Zhao and C. Singh, "A hybrid method for reliability evaluation of line switching operations," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 163, no. June, pp. 365–374, 2018.
- [11] M. T. Craig *et al.*, "A review of the potential impacts of climate change on bulk power system planning and operations in the United States," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 98, no. August, pp. 255–267, 2018.
- [12] C. Varianou Mikellidou, L. M. Shakou, G. Boustras, and C. Dimopoulos, "Energy critical infrastructures at risk from climate change: A state of the art review," *Saf. Sci.*, no. December, pp. 0–1, 2017.
- [13] A. Sharifi and Y. Yamagata, "Principles and criteria for assessing urban energy resilience: A literature review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 1654–1677, 2016.
- [14] Z. Bie, Y. Lin, G. Li, and F. Li, "Battling the Extreme: A Study on the Power System Resilience," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1253–1266, 2017.
- [15] A. Gholami, T. Shekari, M. H. Amiroun, F. Aminifar, M. H. Amini, and A. Sargolzaei, "Toward a consensus on the definition and taxonomy of power system resilience," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 32035–32053, 2018.
- [16] R. Arghandeh, A. Von Meier, L. Mehrmanesh, and L. Mili, "On the definition of cyber-physical resilience in power systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 58, pp. 1060–1069, 2016.
- [17] K. Eshghi, B. K. Johnson, and C. G. Rieger, "Metrics required for power system resilient operations and protection," *Proc. - 2016 Resil. Week, RWS 2016*, pp. 200–203, 2016.
- [18] L. Shen, B. Cassottana, and L. C. Tang, "Statistical trend tests for resilience of power systems," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 177, no. May, pp. 138–147, 2018.
- [19] D. A. Reed, K. C. Kapur, and R. D. Christie, "Methodology for assessing the resilience of networked infrastructure," *IEEE Syst. J.*, vol. 3, no. 2, pp. 174–180, 2009.
- [20] R. Patriarca, J. Bergström, G. Di Gravio, and F. Costantino, "Resilience engineering: Current status of the research and future challenges," *Saf. Sci.*, vol. 102, no. August 2017, pp. 79–100, 2018.
- [21] M. Panteli and P. Mancarella, "Modeling and evaluating the

- resilience of critical electrical power infrastructure to extreme weather events,” *IEEE Syst. J.*, vol. 11, no. 3, pp. 1733–1742, 2017.
- [22] C. Wang, Y. Hou, F. Qiu, S. Lei, and K. Liu, “Resilience Enhancement with Sequentially Proactive Operation Strategies,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 2847–2857, 2017.
- [23] J. Yang and K. Jiang, “The sensitive line identification in resilient power system based on fault chain model,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 92, pp. 212–220, 2017.
- [24] S. Kancherla and I. Dobson, “Heavy-tailed transmission line restoration times observed in utility data,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 1, pp. 1145–1147, 2018.
- [25] Y. Wang, C. Chen, J. Wang, and R. Baldick, “Research on Resilience of Power Systems under Natural Disasters - A Review,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 2, pp. 1604–1613, 2016.
- [26] T. S. Kishore and S. K. Singal, “Optimal economic planning of power transmission lines: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 39, pp. 949–974, 2014.
- [27] J. D. Fuller, R. Ramasra, and A. Cha, “Fast heuristics for transmission-line switching,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, pp. 1377–1386, 2012.
- [28] M. Soroush and J. D. Fuller, “Accuracies of optimal transmission switching heuristics based on DCOPF and ACOPF,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 924–932, 2014.
- [29] C. Barrows and S. Blumsack, “Transmission Switching in the RTS-96 Test System,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1134–1135, 2011.
- [30] E. B. Fisher, R. P. O’Neill, and M. C. Ferris, “Optimal Transmission Switching,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 1346–1355, 2008.
- [31] M. Tarafdar Hagh, M. Zamani Gargari, and M. J. Vahid Pakdel, “Sequential analysis of optimal transmission switching with contingency assessment,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 6, pp. 1390–1396, 2017.
- [32] P. Henneaux and D. S. Kirschen, “Probabilistic security analysis of optimal transmission switching,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 1, pp. 508–517, 2016.
- [33] J. Ostrowski, J. Wang, and C. Liu, “Transmission switching with connectivity-ensuring constraints,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 6, pp. 2621–2627, 2014.
- [34] B. Kocuk, S. S. Dey, and X. A. Sun, “New Formulation and Strong MISOCP Relaxations for AC Optimal Transmission Switching Problem,” vol. 32, no. 6, pp. 1–25, 2016.
- [35] T. Lan, Z. Zhou, and G. M. Huang, “Modeling and Numerical Analysis of Stochastic Optimal Transmission Switching with DCOPF and ACOPF,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 28, pp. 126–131, 2018.
- [36] M. Jabarnejad, “Approximate optimal transmission switching,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 161, pp. 1–7, 2018.
- [37] K. W. Hedman, R. P. O’Neill, E. B. Fisher, and S. S. Oren, “Optimal Transmission Switching With Contingency Analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 24, no. 3, pp. 1577–1586, 2009.
- [38] X. Li, P. Balasubramanian, M. Sahraei-Ardakani, M. Abdi-Khorsand, K. W. Hedman, and R. Podmore, “Real-Time Contingency Analysis with Corrective Transmission Switching,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 2604–2617, 2017.
- [39] M. Khanabadi, H. Ghasemi, and M. Doostizadeh, “Optimal transmission switching considering voltage security and N-1 contingency analysis,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 1, pp. 542–550, 2013.
- [40] S. R. Salkuti, “Congestion management using optimal transmission switching,” *IEEE Syst. J.*, vol. 12, no. 4, pp. 3555–3564, 2018.
- [41] H. Zhang, V. Vittal, G. T. Heydt, and J. Quintero, “A mixed-integer linear programming approach for multi-stage security-constrained transmission expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1125–1133, 2012.
- [42] A. Khodaei, M. Shahidehpour, and S. Kamalinia, “Transmission switching in expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1722–1733, 2010.
- [43] G. A. Orfanos, P. S. Georgilakis, and N. D. Hatziaargyriou, “Transmission expansion planning of systems with increasing wind power integration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 2, pp. 1355–1362, 2013.
- [44] I. de J. Silva, M. J. Rider, R. Romero, and C. A. F. Murari, “Transmission network expansion planning considering uncertainty in demand,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 4, pp. 1565–1573, 2006.

Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión

State of the art transmission expansion planning

José Palacios ^{1*}, Diego Carrión ²

¹ Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: jpalacios@est.ups.edu.ec

RESUMEN—El crecimiento de la demanda en los sistemas eléctricos de potencia ha creado la necesidad de la expansión en todos sus niveles, el problema de la planeación de la óptima expansión de los sistemas eléctricos de transmisión es, considerar todos los factores y restricciones que se involucran como: confiabilidad, cargabilidad máxima, desviación angular, perfil de voltaje, método de resolución, contingencias y pérdida del sistema; en busca de una óptima expansión de los sistemas de transmisión la presente investigación es orientada hacia el método de flujos óptimos de potencia AC; por lo tanto, se realizó un levantamiento de información de artículos científicos relevantes que permitan ser la base del inicio de futuras investigaciones, permitiendo robustecer el sistema de transmisión a bajos costo, con el fin de mantener el sistema eléctrico de potencia con estabilidad y confiabilidad.

Palabras clave— *Flujo óptimo de potencia, sistema eléctrico de potencia, planeación de la expansión de transmisión, método de optimización.*

ABSTRACT— The growth of demand in electric power systems has created the need for expansion at all levels, the problem of planning the optimal expansion of electric transmission systems, considering all the factors and restrictions that are involved as: reliability, maximum chargeability, angular deviation, voltage profile, resolution method, contingencies and system loss; in search of an optimal expansion of the transmission systems the present investigation is oriented towards the method of optimal power flow AC; Therefore, gathering information of relevant scientific articles was carried out that would be the basis of the beginning of future research, allowing to strengthen the transmission system at low cost, in order to maintain the power electrical system with stability and reliability.

Keywords— *Optimal power flow, power electrical system, transmission expansion planning, optimization method.*

1. Introducción

En las últimas décadas se ha incrementado la demanda de energía eléctrica y para atender el complejo crecimiento, es indispensable la óptima expansión de los sistemas de transmisión (TEP) [1], [2] ya que es la columna vertebral del sistema eléctrico de potencia (SEP); el sistema de transmisión tiene que ser estructurado adecuadamente, sin embargo la problemática para los planificadores es que, tienen que analizar restricciones como: cargabilidad máxima, perfil de voltaje, desviación angular y pérdidas del sistema [3]. En muchos de los casos la óptima TEP busca fortalecer la red para que sea estable, segura y confiable; de esta

forma pudiese mantener su operatividad ante la presencia de contingencias.

El método de mayor utilización hace algunos años es el de flujos óptimos de potencia DC [4], ya que solo considera la potencia activa, bajo esta circunstancia la resolución utiliza un algoritmo lineal considerado de baja complejidad; no obstante, la TEP, mediante el método de flujos óptimos de potencia AC, permite tener soluciones apegadas a la realidad de un SEP, ya que considera la potencia activa y reactiva, bajo lo mencionado, la resolución utiliza un algoritmo no lineal entero mixto [5], [6].

La investigación consiste en la revisión bibliográfica y análisis de artículos científicos sobre la TEP, el

Citación: J.Palacios y D.Carrión “Estado del arte de la planeación de expansión de sistemas de transmisión”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Revisión. **Recibido:** 26 de octubre de 2019. **Recibido con correcciones:** 5 de mayo de 2020. **Aceptado:** 12 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 J.Palacios y D.Carrión. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

objetivo del procesamiento de esta información permitirá establecer un punto de partida para futuras investigaciones orientadas a una temática específica [7–12].

La función objetivo de la óptima TEP es garantizar la continuidad del suministro eléctrico con calidad y confiabilidad a bajos costo: construcción (inversión), operación, producción o generador [2], [13–17].

Sujeto a las restricciones que se podrían presentar y tomando en cuenta contingencias. En un análisis profundo hay que considerar que, para tener una óptima planificación global se debe utilizar un esquema correctivo y preventivo, para manejar las contingencias de las líneas de transmisión y las unidades generadoras [18] en tal situación, se debería realizar la TEP y la expansión de la generación de forma conjunta y no por separado, ya que las restricciones del sistema de transmisión afectan la ubicación y la capacidad de las unidades de generación proyectadas [17], [19], sin embargo, por la complejidad de los posible algoritmos matemático la investigación solo se enfocara en la TEP.

Es necesario tener claro el camino para la óptima TEP del SEP, por lo que, consideramos que primero se debe determinar el problema, posterior realizar el análisis y desarrollo de simulaciones de posibles soluciones, si el análisis es aceptable se tendrá una optimización en la expansión de la transmisión, caso contrario se debe seguir analizando las posibles soluciones [20].

En base a las referencias citadas se busca enfocar la tendencia para que futuras investigación tengan un punto de partida que permita encontrar una óptima.

El documento tiene la siguiente organización: La sección II, revisa los modelos de expansión con el análisis de ciertas investigaciones; la sección III, trata sobre los flujos óptimos de potencia y su clasificación; en la sección IV, presenta el análisis genérico de otras investigaciones sobre el problema de la planificación de la transmisión.

2. Modelos de Expansión

Dentro de los modelos de la TEP, podemos encontrar la optimización matemática y heurística, no obstante, existen herramientas tecnológicas que los pueden combinar y a este modelo se lo denomina meta-heurísticos [10], [21] y [22].

Los modelos de optimización matemática son procedimientos de cálculos que resuelven la formulación

matemática de la TEP, este ha sido considerado un modelo práctico, sin embargo, al no poder considerar todos los factores o restricciones, se convierte en óptimo solo omitiendo algunos detalles de los aspectos técnicos, ambientales y financieros.

Dependiendo el tipo de flujo de potencia que se considere para el análisis se utilizara una las opciones matemáticas como: la programación lineal, programación no lineal, programación dinámica y programación de enteros mixtos [23]; Si el modelo direcciona la utilización de un algoritmo no lineal la TEP, se limitará en el proceso de la optimización.

El Modelo Heurístico (MH) es un tipo de conocimiento específico que sirve para resolver problemas complejos en determinados eventos y situaciones, por lo tanto, es considerado como un medio de inventar para crear. Los MH realizan búsquedas para generar y clasificar las opciones con la orientación de reglas lógicas o empíricas y sensibles; esto permite llevar a cabo el proceso heurístico hasta obtener el algoritmo [23–25].

Dicho en forma sencilla, es un método que comprende el desarrollo de habilidades, procedimientos y procesos que nos ofrecen una posibilidad razonable para solucionar un problema [26]. Estando orientado a la generación de conocimientos, recurso, técnicas y modelos creativos e innovadores, proyectados a aportar con los avances tecnológicos y científicos, para hacer frente a las cambiantes demandas del SEP.

Los MH tienen una gran deficiencia que al no ser matemáticamente sólidos, los resultados no son confiables para las redes complejas [27]. Actualmente hay una cantidad muy importante de trabajos científicos publicados que abordan problemas de optimización usando los modelos metaheurísticos (MMH), se puede determinar que son reglas de sentido común que permiten hacer una búsqueda inteligente siendo la principal característica, a pesar de esto no existe un marco teórico que las sustente, sin embargo, es a través de los buenos resultados se encuentra su justificación.

Los MMH se dividen en tres categorías principales: La primera, los algoritmos evolutivos, La segunda, inteligencia de enjambre, y, La tercera, una mezcla que comparte los mismos principios de las dos primeras categorías. Otra situación importante de considerar es que mientras un MMH es eficiente para un caso [28], el mismo modelo puede presentar ineficiencia para otro; el

comportamiento es igual cuando se relacionan todas las variables posibles, entonces dependiendo de varios factores o restricciones como: modelado, método de resolución, fiabilidad, cargabilidad máxima, desviación angular, perfil de voltaje y pérdida del sistema; Puede ser que un modelado X sea más óptimo que un modelado Y, pero al variar los valores de los factores, podría el modelado Y, ser más óptimo que el modelado X; esta teoría determina que, ningún MMH es mejor que otro. Una segunda característica que presentan los MMH es que existen pocas pruebas sobre su aproximación hacia un óptimo global; es decir, que no se puede asegurar la calidad de la solución obtenida[29].

Torres [16] muestra un modelo de optimización de la saturación de partículas modificadas, la optimización de partículas de enjambre que incorpora un nuevo procedimiento de inicialización de enjambres para resolver el problema de planificación de líneas de transmisión. El método propuesto se ha probado en sistemas de ensayo y los resultados son prometedores.

A pesar de los problemas de este modelo, muchos investigadores han demostrado que el comportamiento de la mayoría de los MMH es cuasi óptimo, siendo una alternativa factible de muchos problemas difíciles de resolver, creando una solución de calidad en corto tiempo. Muchas veces los MMH se comportan muy robustos pero eficientes y se pueden aplicar con relativa facilidad a una variedad amplia de problemas.

3. Flujos óptimos de potencia

Los flujo de potencia también llamado flujos de carga, es la herramienta básica para analizar o investigar los sistemas de transmisión y distribución eléctrica [30], [31]. Esta herramienta que se desempeña en estado estacionario, determina la magnitud del voltaje y corrientes en cada una de las líneas o barras, el flujo a través de los elementos del sistema de potencia, las pérdidas, los niveles de cargabilidad, la desviación angular y el perfil de voltaje.

El objetivo del estudio de flujos de potencia, es el análisis de lo que puede acontecer en el SEP en una supuesta condición operativa. Además, es la condición inicial para muchos estudios e investigaciones, adicional calcula los flujos de potencia real y reactiva, para todos los dispositivos eléctricos interconectados en las líneas, así como las pérdidas en las líneas de transmisión.

Dichos procedimientos mezclan heurísticas con algoritmos matemáticos de optimización, programación lineal o no lineal para resolver la problemática [32–34], paso a paso la TEP se pueden encontrar soluciones factibles, económicamente competitivas, mediante un esfuerzo computacional. Sin embargo, un modelo matemático no garantiza una óptima expansión de los sistemas de transmisión. Los flujos de potencia se clasifican en dos: Flujos de Corriente Directa DC y Flujos de Corriente Alterna AC.

3.1 Flujos de potencia DC

Este tipo de flujo de potencia realiza su análisis solo con potencia activa, el cual está basado en un algoritmo lineal sin complejidad, este tipo de modelos son aceptables en sistemas pequeños o casos en especiales [31], [35] y [36].

Las desventajas de los flujos DC es que no considera el análisis la potencia reactiva, adicional es difícil considerar las pérdidas de potencia y no se pueden tomar en cuenta ciertas restricciones [2], [29].

Tabla 1. Simbología de las ecuaciones

Simbología de las ecuaciones	
i, j	Índice de barras
Li	Índice de líneas
g	Índice de generadores
e	Índice de existentes
c	Índice de candidatas
Bus	Conjunto de barras
A	Parámetros de las barras del sistema existente
B	Parámetros de líneas existentes
C	Parámetros de líneas candidatas
D	Parámetros del generador
Q	Potencia reactiva
P	Potencia activa
T	Topología óptima
R	Resistencia
X	Reactancia
PG	Potencia activa de generación
QG	Potencia reactiva de generación
PD	Demanda de potencia activa

QD	Demanda de potencia reactiva
V_i^{min}	Voltaje mínimo de la barra
V_i	Magnitud de voltaje
V_i^{max}	Voltaje máximo de la barra

Para este caso la función objetivo se representan en las ecuaciones de la 1 a la 3 [37].

$$\max \left(\sum_{i=1}^{n_D} B_i * P_{Di} - \sum_{i=1}^{n_G} C_i * P_{Gi} \right) \quad (1)$$

$$B_i * P_{Di} = a_i * P_{Di}^2 + b_i * P_{Di} + c_i; \forall i \in n_D \quad (2)$$

$$C_i * P_{Gi} = d_i * P_{Gi}^2 + e_i * P_{Gi} + f_i; \forall i \in n_G \quad (3)$$

La limitación está dada por las restricciones que se muestran a continuación.

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}; \forall i \in n_G \quad (4)$$

$$P_{ij}(\delta) \leq P_{ij}^{max}; \forall i, j \in n_{bus}; i \neq j \quad (5)$$

$$P_i = P_{ij} - P_{Di}; \forall i \in n_{bus} \quad (6)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^{N_{bus}} b_{ij} * (\delta_i - \delta_j) \quad (7)$$

En la ecuación (8) podemos observar el cálculo de la susceptancia.

$$b_{ij} = \frac{X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (8)$$

$$b_{ij} = \frac{X_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (8)$$

3.2 Flujos de potencia AC

Hay que tener claro que la corriente alterna AC tiene magnitud y dirección que varían cíclicamente. La forma de onda de la corriente alterna más comúnmente utilizada es la Onda senoidal, la transmisión es trifásica la que está formada por un conjunto de tres fases que forman ondas, desfasadas entre si 120 grados, a esto se lo conoce como sistema balanceado. Para ser más objetivo en la TEP se tiene que considerar un análisis detallado que englobe todo el sistema eléctrico de potencia, esto incluye la generación [19], [21], la transmisión y las cargas.

A continuación, representamos en ecuación la función objetivo.

$$\max \left(\sum_{i=1}^{n_D} B_i * P_{Di} - \sum_{i=1}^{n_G} C_i * P_{Gi} \right) \quad (9)$$

$$B_i * P_{Di} = a_i * P_{Di}^2 + b_i * P_{Di} + c_i; \forall i \in n_D \quad (10)$$

$$C_i * P_{Gi} = d_i * P_{Gi}^2 + e_i * P_{Gi} + f_i; \forall i \in n_G \quad (11)$$

Restricciones

$$P_G * P_D = \sum_{i=1}^{n_{bus}} P_{ij}; \forall i, j \in n_{bus} \quad (12)$$

$$Q_G * Q_D = \sum_{i=1}^{n_{bus}} Q_{ij}; \forall i, j \in n_{bus} \quad (13)$$

$$P_{ij} = |V_i|^2 G_{ij} + |V_i||V_j|[G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j)]; \forall i, j \in n_{bus} \quad (14)$$

$$Q_{ij} = |V_i|^2 G_{ij} + |V_i||V_j|[G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - b_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j)]; \forall i, j \in n_{bus} \quad (15)$$

Para dar confiabilidad al sistema real se tiene que considerar, la magnitud del voltaje es de aproximadamente 1 p.u. para todos los buses de la red.

En la ecuación (16) la conductancia.

$$G_{ij} = \frac{R_{ij}}{R_{ij}^2 + X_{ij}^2} \quad (16)$$

En la ecuación (17) podemos observar el límite de restricción en la potencia activa y en la ecuación (18) el límite de restricción de la potencia reactiva.

$$P_{Gi}^{min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{max}; \forall i \in n_G \quad (17)$$

$$Q_{Gi}^{min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{max}; \forall i \in n_G \quad (18)$$

$$|V_i^{min}| \leq V_i \leq |V_i^{max}|; \forall i \in n_{bus} \quad (19)$$

$$\delta_{ij}^{min} \leq \delta_{ij} \leq \delta_{ij}^{max}; \forall i, j \in n_{bus} \quad (20)$$

$$\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j \quad (21)$$

Dentro de los estudios de algunos investigadores llegaron a concluir que son muy complejos los modelos de flujo de potencia AC [21], [36], [38], sin embargo se tienen algunas ventajas [2]:

- Se considera la potencia activa y reactiva dentro de la planificación para mantener estable el SEP.
- El análisis puede tomar en cuenta más parámetros y restricciones, para optimizar TEP.
- Dentro de los análisis se pueden incluir las pérdidas de potencia en el SEP.
- Los diversos tipos de cargas ocasionan desbalance en el sistema eléctrico lo que permite realizar otros análisis como: contingencia, estabilidad de voltaje, análisis nodal e investigación de estabilidad transitoria.
- Se pueden incluir sistemas de compensación como bancos de capacitores o dispositivos FACTS.

Un modelo interesante es el que propone Ploussard [21], este se basa en la reducción de redes, es decir disminuir las barras y formando un conjunto de redes relevantes al sistemas, el proceso consiste en dividir las barras en grupos o áreas, después se agrega líneas de transmisión para reducir el número de barras en cada zona, el último paso consiste en calcular la equivalente de los enlaces de las líneas y barras de la red reducida.

Si bien es cierto realizar el análisis con flujo de corriente AC, dan resultados más reales y tiene ciertas desventajas como por ejemplo [9]:

- El problema más trascendental es la programación no lineal tan grande y compleja.
- Al considerar tantas restricciones se convierte en un modelo de optimización no tan eficiente para determinar una expansión del SEP.
- Tener restricciones variables que cambian constantemente el alcance del problema.

Montes [39] realiza una comparación de resultados utilizando el método convención de flujos de potencia DC con un reforzamiento, y el modelo de flujos de potencia AC; en los sistemas de 6 barras de Garver y en el de 118 barra de la IEEE. El modelo de flujos de potencia AC supero de forma notable los obtenidos por el modelo DC.

La función objetivo de esta propuesta busca minimiza el costo total de la expansión y operación, considerando el voltaje en la barra, la potencia reactiva y las pérdidas de potencia.

Khandelwal [5], [28], propones un método llamado lobo gris basado en su primera investigación y posterior lo modifíco; mostró su manejo para solucionar los problemas de optimización complejos multimodales y no separables. Por medio de flujos de potencia AC expreso un algoritmo no lineal de números enteros complejos y de gran escala, valido sus resultados realizando pruebas en los sistemas: 6 barra de Garver y 46 barras brasileño; obteniendo buenos resultados en la TEP. Según el investigador el problema de la incertidumbre de la demanda y generación puede manejarse utilizando lógica difusa y/o red neuronal.

Das [38] propone un modelo en dos etapas; la primera, se resuelve utilizando flujos de potencia DC para reducir la cantidad de posibles soluciones; la segunda, mediante flujos de potencia AC y planeación de expansión reactiva. Dicho modelo utilizo un algoritmo modificado de colonia de abejas artificial, para su comprobación utilizó los sistemas: 6 barras de Garver, 24 barras de IEEE, 118 barras de IEEE y 300 barras de IEEE. La investigación presento una solución de contingencia y de estabilidad de voltaje muy similares en comparación con métodos rigurosos, siendo su fortaleza una aceptable carga computacional, es decir, converge los resultados en poco tiempo.

4. Análisis genérico comparativo

El estado del arte de la presente investigación busca proporcionar la actual temática de la literatura científica con respecto a la óptima TEP en el SEP, por lo que se consideran las restricciones del problema y la propuesta de solución.

Es difícil considerar todas las investigaciones, sin embargo, las presentadas en la tabla 2 son consideradas como aportes importantes para empezar un estudio, adicional nos podemos orientar en la tendencia de las investigaciones y definir la ruta a tomar para futuros análisis, sin descartar la posibilidad de mejorar alguno de los diversos métodos propuestos por los investigadores citados.

Tabla 2. Tendencias de investigadores en la optimización de la TEP.

Datos		Restricciones del problema				Propuesta de solución del problema		
Año de publicación	Investigador	Contingencias	Perfil de voltaje	Cargabilidad	Desviación angular	Técnicas de optimización	Modelo de flujo de potencia ac	Heurística o meta heurísticas
2013	Hemmati [2]	✗		✗				
2007	Rider [24]	✗	✗		✗	✗	✗	✗
2010	Molina [11]		✗	✗		✗		✗
2014	Quintero [10]	✗		✗		✗		✗
2006	Sum-Im [4]	✗	✗			✗		✗
2017	Khandelwal [28]	✗	✗				✗	✗
2017	Verma [13]	✗	✗			✗	✗	✗
2007	Choi [14]	✗	✗		✗	✗	✗	✗
2008	Gajbhiye [20]		✗	✗			✗	✗
2016	Montes [39]		✗	✗			✗	✗

2012	Lottfjou [32]	✗						✗
2017	Moreira [19]		✗					✗
2018	Li [36]	✗		✗	✗			✗
2018	Koltsaklis [17]			✗				✗
2002	Romero [29]		✗			✗		✗
2018	Morquecho [16]	✗	✗		✗	✗	✗	✗
2010	Khodaei [25]	✗	✗			✗		✗
2013	Bolaños [1]	✗	✗			✗	✗	✗
2018	Ploussard [21]		✗	✗		✗		✗
2018	Duque [18]		✗	✗		✗		✗
2014	Alhamrouni [22]	✗	✗		✗		✗	✗
2011	Akbari [27]	✗	✗	✗			✗	✗
2003	Al-Hamouz [6]	✗		✗	✗	✗		
2018	Abbasi [31]		✗	✗		✗		✗
2011	Cedeño [3]	✗		✗				✗
2005	Choi [34]	✗	✗	✗				✗

5. Conclusiones

El presente documento presenta una relevante lista de investigación sobre la planificación de la explosión de los sistemas de transmisión, el crecimiento constante de la demanda eléctrica ha generado una búsqueda de un óptimo modelo TEP del SEP, en tal situación es difícil considerar todas las investigaciones sobre la temática, no obstante, se tomó en cuenta investigaciones relevantes que permiten enfocar la actual tendencia en el campo de la TEP.

Muchas de las investigaciones utilizan un modelo matemático ya que su método son los flujos de potencia DC, puesto que al no tener tantas restricciones y por ser un algoritmo lineal, permite tener soluciones aceptables en redes pequeñas o específicas, por lo tanto, no son confiables. Una alternativa muy utilizada son los modelos heurísticos y metaheurísticos, sin embargo tiene limitaciones en los diversos procesos, es así; que como

herramienta de óptima planificación es poco considerada dentro de los requerimientos de los mercados energéticos.

La óptima TEP debe considerar muchos parámetros y restricciones, sin embargo, no se puede descartar que hay modelos que son cuasi óptimos para problemas específicos, los cuales deberían ser reforzados. La mayoría de las investigaciones tratan de encarar una restricción a la vez, ya que tratar de considerar más al mismo tiempo volvería complejo el modelo.

Es relevante indicar que para obtener una óptima TEP, se debe considerar el análisis desde el modelo de flujo de potencia AC y a través de técnicas de optimización manejar una sola restricción, que permita robustecer el SEP.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo investigativo lo dedicamos principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A la Universidad Politécnica Salesiana y su cuerpo docente por haber compartido su conocimiento y experiencia, que ha sido una guía importante durante todo el proceso académico.

REFERENCIAS

- [1] R. A. Bolaños Ocampo and C. A. Correa Florez, "Planeamiento de la transmisión considerando seguridad e incertidumbre en la demanda empleando programación no lineal y técnicas evolutivas," *Tecnura*, vol. 18, no. 39, p. 62, 2013.
- [2] R. Hemmati, R. A. Hooshmand, and A. Khodabakhshian, "State-of-the-art of transmission expansion planning: Comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 23, pp. 312–319, 2013.
- [3] E. B. Cedeño and S. Arora, "Performance comparison of Transmission Network Expansion Planning under deterministic and uncertain conditions," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 33, no. 7, pp. 1288–1295, 2011.
- [4] T. Sum-Im, G. A. Taylor, M. R. Irving, and Y. H. Song, "A comparative study of state-of-the-art transmission expansion planning tools," *41st Int. Univ. Power Eng. Conf. UPEC 2006, Conf. Proceedings*, vol. 1, pp. 267–271, 2006.
- [5] A. Khandelwal, A. Bhargava, A. Sharma, and H. Sharma, *ACOPF-Based Transmission Network Expansion Planning Using Grey Wolf Optimization Algorithm*. Springer Singapore.
- [6] Z. M. Al-Hamouz and A. S. Al-Faraj, "Transmission-expansion planning based on a non-linear programming algorithm," *Appl. Energy*, vol. 76, no. 1–3, pp. 169–177, 2003.
- [7] P. V. Gomes and J. T. Saraiva, "Electrical Power and Energy Systems State-of-the-art of transmission expansion planning: A survey from restructuring to renewable and distributed electricity markets," *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 111, no. March, pp. 411–424, 2019.
- [8] A. R. Mazhar, S. Liu, and A. Shukla, "A state of art review on the district heating systems," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 96, no. September 2017, pp. 420–439, 2018.
- [9] P. F. S. Freitas, L. H. Macedo, and R. Romero, "A strategy for transmission network expansion planning considering multiple generation scenarios," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 172, no. August 2018, pp. 22–31, 2019.
- [10] J. Quintero, H. Zhang, S. Member, and Y. Chakhchoukh, "Planning Framework: Models, Tools, and Educational Opportunities," vol. 29, no. 4, pp. 1–8, 2014.
- [11] J. D. Molina and H. Rudnick, "Transmission of Electric Energy: A Bibliographic Review," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 8, no. 3, pp. 245–258, 2010.
- [12] G. Latorre, R. Darío Cruz, J. M. Areiza, and A. Villegas, "Classification of publications and models on transmission expansion planning," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 18, no. 2, pp. 938–946, 2003.
- [13] S. Verma and V. Mukherjee, "Investigation of static transmission expansion planning using the symbiotic organisms search algorithm," *Eng. Optim.*, vol. 50, no. 9, pp. 1544–1560, 2018.
- [14] J. Choi, T. D. Mount, and R. J. Thomas, "Transmission expansion planning using contingency criteria," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, no. 4, pp. 2249–2261, 2007.
- [15] D. Rios, F. Fernandez, and G. Blanco, "Analysis of power systems expansion processes based on System Dynamics-state-of-the-art," *2016 IEEE Bienn. Congr. Argentina, ARGENCON 2016*, 2016.
- [16] E. G. Morquecho et al., "AC transmission network expansion planning considering losses," *2018 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [17] N. E. Koltsaklis and A. S. Dagoumas, "State-of-the-art generation expansion planning: A review," *Appl. Energy*, vol. 230, no. April, pp. 563–589, 2018.
- [18] A. Duque, "Transmission network expansion planning using spectral clustering," *SBSE 2018 - 7th Brazilian Electr. Syst. Symp.*, pp. 1–5, 2018.
- [19] A. Moreira, D. Pozo, A. Street, and E. Sauma, "Reliable Renewable Generation and Transmission Expansion Planning: Co-Optimizing System's Resources for Meeting Renewable Targets," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 32, no. 4, pp. 3246–3257, 2017.
- [20] R. K. Gajbhiye, D. Naik, S. Dambhare, and S. A. Soman, "An expert system approach for multi-year short-term transmission system expansion planning: An Indian experience," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 226–237, 2008.
- [21] Q. Ploussard, L. Olmos, and A. Ramos, "An efficient network reduction method for transmission expansion

- planning using multicut problem and Kron reduction,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 8950, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [22] M. S. Ibrahim Alhamrouni, Azhar Khairuddin, Ali Khorasani Ferdavani and Faculty, “Transmission expansion planning using AC-based differential evolution algorithm,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 8, no. 10, pp. 1637–1644, 2014.
- [23] A. Mahmoudabadi, M. Rashidinejad, M. Mohammadian, M. Z. Maymand, M. Rahmani, and H. Khorasani, “An Application of CHA to Concurrent Short-Term Transmission Expansion & Reactive Power Planning,” *2011 IEEE Trondheim PowerTech*, pp. 1–6, 2011.
- [24] M. J. Rider, L. A. Gallego, S. Member, R. Romero, and A. V. García, “Heuristic Algorithm to Solve the Short Term Transmission Network Expansion Planning,” pp. 1–7, 2007.
- [25] A. Khodaei, M. Shahidehpour, and S. Kamalinia, “Transmission switching in expansion planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 3, pp. 1722–1733, 2010.
- [26] R. Romero and A. Monticelli, “A hierarchical decomposition approach for transmission network expansion planning,” *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 9, no. 1, pp. 373–380, 1994.
- [27] T. Akbari, A. Rahimikian, and A. Kazemi, “A multi-stage stochastic transmission expansion planning method,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 52, no. 8–9, pp. 2844–2853, 2011.
- [28] A. Khandelwal, A. Bhargava, A. Sharma, and H. Sharma, “Modified Grey Wolf Optimization Algorithm for Transmission Network Expansion Planning Problem,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 43, no. 6, pp. 2899–2908, 2018.
- [29] R. Romero, A. Monticelli, A. Garcia, and S. Haffner, “Transmission Network Expansion Planning,” *IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, vol. 149, no. 1, p. 10, 2002.
- [30] J. López and L. Gallego, “Flujo de potencia óptimo usando el método del gradiente para reducción de pérdidas en sistemas de potencia,” *Ing. y Ciencia, ISSN*, vol. 4, no. 7, pp. 71–85, 2008.
- [31] S. Abbasi, H. Abdi, S. Bruno, and M. La, “Electrical Power and Energy Systems Transmission network expansion planning considering load correlation using unscented transformation,” *Electr. Power Energy Syst.*, vol. 103, no. November 2017, pp. 12–20, 2018.
- [32] A. Lotfjou, Y. Fu, and M. Shahidehpour, “Hybrid AC/DC transmission expansion planning,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 27, no. 3, pp. 1620–1628, 2012.
- [33] W. Peng, L. Chuanquan, L. Jie, and H. Cheng, “Transmission network expansion planning under interval load,” *CICED 2010 Proc.*, pp. 1–6, 2010.
- [34] J. Choi, “A method for transmission system expansion planning considering probabilistic reliability criteria,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 20, no. 3, p. 1240, 2005.
- [35] G. Qu, H. Cheng, L. Yao, Z. Ma, and Z. Zhu, “Transmission surplus capacity based power transmission expansion planning,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 1, pp. 19–27, 2010.
- [36] Z. Li, J. Yu, and Q. H. Wu, “Approximate Linear Power Flow Using Logarithmic Transform of Voltage Magnitudes with Reactive Power and Transmission Loss Consideration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 4, pp. 4593–4603, 2018.
- [37] K. Zare, S. Abapour, and B. Mohammadi-Ivatloo, “Dynamic planning of distributed generation units in active distribution network,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 12, pp. 1455–1463, 2015.
- [38] S. Das, A. Verma, and P. R. Bijwe, “Security constrained AC transmission network expansion planning,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 172, no. March, pp. 277–289, 2019.
- [39] C. V. Montes, J. F. Franco, M. J. Rider, L. H. Macedo, and R. Romero, “MILP branch flow model for concurrent AC multistage transmission expansion and reactive power planning with security constraints,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 10, no. 12, pp. 3023–3032, 2016.

Evaluación de la estabilidad del sistema de transmisión eléctrica a partir de estructuras simétricas considerando transferencia de carga

Evaluation of the stability of the electrical transmission system from symmetric structures considering load transfer

Saúl Mauricio Jami Solís¹

¹ Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: sjamis@est.ups.edu.ec

RESUMEN— Este artículo propone un análisis de la geometría de las líneas de transmisión, basado en comparaciones de diferentes geometrías, que se proponen para analizar qué sistema es el más óptimo para su posible implementación, lo que permite introducir criterios de construcción y diseños apropiados en las líneas de transmisión, dependiendo del calibre de los conductores y las distancias entre las líneas, según las curvas de capacidad de carga de St.Clair, que ofrecen una forma sencilla de visualizar la capacidad de transferencia de energía de las líneas eléctricas. transmisión. Hay una serie de agentes o componentes que condicionan la capacidad de las líneas de transmisión, algunos de estos se discuten desde un punto de vista práctico, como la estabilidad para líneas de más de 80 km, hay varias publicaciones que se refieren a este tema, que analiza todos los aspectos del problema de estabilidad en las líneas de transmisión, lo que significa en la práctica que la línea de transmisión es esencialmente una reactancia, un punto de referencia que se ha estructurado para este tipo de análisis de una impedancia de aumento (SIL) de uno, para un convencional línea de 480 km, operando a una frecuencia de 60 Hz.

Palabras clave— Capacidad de transferencia de línea, carga de impedancia de sobretensión, curva de St. Clair, límite de estabilidad.

ABSTRACT— This article proposes an analysis of the geometry of the transmission lines, based on comparisons of different geometries, which are proposed to analyze which system is the most optimal for its possible implementation, which allows to introduce construction criteria and appropriate designs in the transmission lines, depending on the caliber of the conductors and the distances between the lines, based on the St.Clair chargeability curves, which makes available a simple way to visualize the energy transfer capacity of the power lines. transmission. There are a number of agents or components that condition the capacity of transmission lines, some of these are discussed from a practical point of view, such as stability for lines of more than 80 km, there are several publications that refer to this issue, which analyzes all aspects of the stability problem in the transmission lines, which means in practice that the transmission line is essentially a reactance, a reference point that has been structured for this type of analysis of an increase impedance (SIL) of one, for a conventional line of 480 km, operating at a frequency of 60 Hz.

Keywords— Line transfer capacity, surge impedance load, St. Clair curve, stability limit.

1. Introducción

Existen factores que restringen las capacidades de una línea de transmisión el más relevante es el nivel existente de voltaje. Otro parámetro importante es la geometría de las líneas de transmisión utilizado para transportar eficientemente la energía desde un punto a otro y tienen un efecto sobre la amplitud de las sobretensiones [1], [2]

Posteriormente en 1953 H.P. Saint Clair introdujo su conocida curva de carga de línea de transmisión, potencia

transferida versus longitud de la línea, expresadas en términos en por unidad de su SIL (Surge Impedance Loading) o potencia natural de la línea. [3] El valor del SIL depende tanto de la inductancia serie y la capacitancia en derivación como del nivel de tensión entre fases de la línea de transmisión.

En [4] los autores proponen analizar líneas de longitudes largas basándose en un análisis de redes de corriente alterna y algunas deducciones matemáticas

Citación: S.Jami, "Evaluación de la estabilidad del sistema de transmisión eléctrica a partir de estructuras simétricas considerando transferencia de carga.", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 20 de enero de 2020. **Recibido con correcciones:** 25 de marzo de 2020. **Aceptado:** 12 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 S. Jami. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

formuladas en por unidad y con una potencia base igual al cuadrado del voltaje de la línea [5]. Además de este análisis se dedujo la importancia de la estabilidad como uno de los factores limitantes para la transferencia de potencia la cual debía ser tomada en cuenta para el sistema de potencia [6].

En los últimos años, la estabilidad del voltaje del sistema de potencia ha inclinado considerable interés en las fábricas, por lo tanto, es trascendental introducir la estabilidad de voltaje en la curva de capacidad de carga de línea [7].

En [8] los autores realizan una crítica acerca del problema de estabilidad en una línea de transmisión que es esencialmente una reactancia y como tal requiere un voltaje de capacidad de St. Clair y rendimiento de las líneas de transmisión para provocar flujo de poder sobre la línea considerando además los generadores ya que estos agregan más o menos reactancia a la línea.6

En [9] los autores usas la curva de St. Clair para estimar la capacidad de carga máxima de una línea de transmisión teniendo en cuenta tres causas principales, limitaciones térmicas, caída de voltaje y estabilidad en una relación simple, la cual permite ver el valor máximo de capacidad para estimar líneas paralelas a diferentes niveles de voltaje.

En [10], [11] despliegan las curvas de cargabilidad de la línea de transmisión considerando diferentes factores como alta temperatura, alta radiación solar, baja velocidad del viento, la longitud máxima de las líneas, resistencia y potencia reactiva y por otros factores. La curva original de St. Clair suponía que la línea de transmisión no tenía pérdidas y que no había potencia reactiva en el sistema.

Es importante mencionar que la curva de cargabilidad no reemplaza la necesidad de efectuar estudios detallados de flujo de potencia y estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia debido al aumento de la carga de las líneas de transmisión, el problema de estabilidad de voltaje se ha convertido en un problema critico [12].

Otro problema para la estabilidad del sistema son las estructuras ya que son un aspecto vital para el monitoreo de las líneas de transmisión. En [13] presenta un método novedoso para evaluar el estado estructural de la línea de transmisión basado en análisis dinámico y de estabilidad.

El fin de la investigación es realizar un estudio sobre la geometría de las líneas de transmisión en el Ecuador, para mejorar y asegurar que las líneas de transmisión

transfieran la potencia y energía de una manera segura, y con el mínimo porcentaje de perdidas, mejorando el comportamiento del sistema. En la estimación de la estabilidad del voltaje a lo largo del sistema de transmisión y de distribución se realiza un estudio para estimar los márgenes de carga [14]. Para lo cual se emplea la curva de St. Clair que es ampliamente utiliza para el desarrollo de guías sobre las capacidades de poder transmitir potencia mediante las líneas de transmisión y para una correcta planificación preliminar del sistema de transmisión [15].

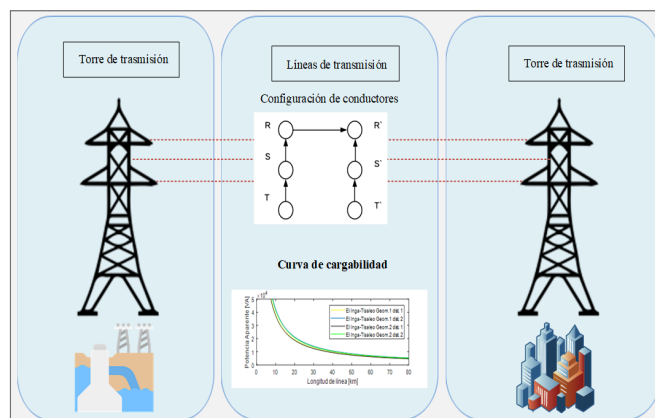


Figura 1. Estudio de transferencia de potencia en líneas de transmisión.

La figura 1 representa el modo de evaluar la transmisión de potencia en las líneas aéreas del sistema de transmisión, para diferentes modelos geométricos.

El diseño se basa en construir las curvas de cargabilidad para diferentes configuraciones geométricas y diferentes longitudes de transmisión para evaluar la estabilidad del sistema.

2. Curva de cargabilidad en líneas de transmisión

La curva de cargabilidad enlaza la longitud de las líneas de transmisión y la potencia de carga que circula por la misma, este tipo de análisis se puede tener varios aspectos que afectan a la capacidad de transferencia de energía por las líneas de transmisión que son los primeros en tomar en cuenta para la planificación de nuevos sistemas que entren en operación, como nivel de tensión, configuración geométrica de conductores, número de conductores por fase, separación entre conductores y calibre de conductores [11], [12].

La estabilidad en un sistema es una condición de igualdad entre las fuerzas de oposición. Si una perturbación produce un desequilibrio sostenido entre las fuerzas de oposición, se presenta la condición de inestabilidad, que se manifiesta de varias maneras. En un Sistema eléctrico de potencia (SEP) puede presentar cómo la pérdida de sincronismo u oscilaciones de magnitud creciente, el estudio de estabilidad se lo realiza con el fin de mejorar la firmeza del sistema.

3. Cargabilidad en sistemas eléctricos de potencia

La interpretación de la cargabilidad de una línea de transmisión real se puede simplificar al considerar en primer lugar el comportamiento de una línea de transmisión sin pérdidas para ello se introduce el concepto de impedancia característica [9].

4. Parámetros longitudinales y transversales

Las líneas de transmisión están caracterizadas por parámetros longitudinales y transversales.

A. Longitudinales

Resistencia Serie (R). - La resistencia se caracteriza por presentar una densidad de corriente distribuida a lo largo de su sección transversal (conductor) y se la puede hallar mediante la siguiente expresión [16]:

Para temperaturas iguales a 20°C:

$$R = (\rho * \text{Long}) / A \quad [\Omega] \quad (1)$$

Dónde:

ρ .- Resistividad del material conductor a 20 °C. [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]

Long.- Longitud del conductor. [m]

A.- Sección transversal del conductor. [mm^2]

Para temperaturas diferentes a 20 °C:

$$R_T = (\rho_{(20^\circ\text{C})} + \rho_{(20^\circ\text{C})} * \alpha(T - 20^\circ\text{C})) \text{ Long} / A * n \quad (2)$$

Donde:

ρ (20°C).- Resistividad del material conductor 20°C. [$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$]

α .- Coeficiente térmico del conductor. [$1/^\circ\text{C}$].

T.- Temperatura del conductor. [$^\circ\text{C}$]

Long.- Longitud del conductor. [m]

A.- Sección transversal del conductor. [mm^2]

n.- número de conductores por fase.

Inductancia serie(L). - La inductancia de línea depende de los acoplamientos de flujo parciales dentro del corte transversal de conductor y acoplamientos de flujo externos, al igual que depende de la geometría del sistema de transmisión. Se la puede hallar mediante la siguiente expresión: [17][18]

$$L = (u / (2 * n) + 2 * \ln(\text{DMG} / \text{RMG})) * 10^{-4} * \text{Long} \quad [\text{H}] \quad (3)$$

Dónde:

u.- Coeficiente de permeabilidad del conductor.

n.- Número de conductores por fase.

DMG.- Distancia media geométrica [m].

RMG.- Radio medio geométrico [m].

Long.- Longitud del conductor [km].

B. Transversales

Capacitancia en paralelo. - La diferencia de potencial entre los conductores de una línea de transmisión provoca que los conductores se carguen; la carga por unidad de diferencia de potencial es la capacitancia entre conductores [19][20].

Se la puede hallar mediante la siguiente expresión:

$$C = (24,2 * 10^{-4}) / \log_{10}(\text{DMG} / \text{RMG}) * \text{Long} \quad [\text{F}] \quad (4)$$

Dónde:

DMG.- Distancia media geométrica. [m]

RMG.- Radio medio geométrico. [m]

Long.- Longitud del conductor. [km]

Surge Impedance Loading. - Ya que G es despreciable y R es pequeña, se asume que las líneas de alto voltaje no tienen pérdidas cuando tratan con rayos y picos de conmutación. Por tanto, la impedancia característica Z_c con pérdidas despreciables es comúnmente referida como la impedancia de incremento (surge impedance), y sus dimensiones son de una resistencia pura. La potencia entregada por una línea de transmisión cuando es determinada por su surge impedance es conocida como Surge Impedance Loading[21], [22].

$$\text{SIL} = (V_0)^2 / Z_c \quad [\text{W}] \quad (5)$$

Dónde:

V_0 .- Voltaje nominal de la línea. [V]

Z_c .- Impedancia característica de la línea. [Ω]

El valor del SIL depende tanto de la inductancia serie y la capacitancia en derivación como del nivel de tensión entre fases de la línea de transmisión, como se indica en la ecuación 5. Cuanto mayor es el nivel de tensión mayor es el SIL de la línea. De igual manera, el SIL aumenta al incrementar el número de conductores por fase de la línea, ya que, disminuye su impedancia característica [15].

$$Z_c = \sqrt{L/C} \quad (6)$$

Dónde:

L.- Inductancia en serie.

C.- Capacitancia en paralelo.

5. Clasificación de las líneas

Las líneas aéreas se pueden clasificar por su longitud, basados en las aproximaciones justificadas en su modelamiento:

A. *Líneas Cortas.* –

Líneas menores a 80km. Su capacitancia es despreciable y puede ser representada por sus impedancias en serie.

B. *Líneas Medias.* –

Líneas con longitud entre 80 y 200km. Pueden ser representadas por el circuito equivalente nominal π .

C. *Líneas Largas.* –

Líneas mayores a 200km. Para dichas líneas los efectos distribuidos de los parámetros son significantes. Estos necesitan ser representados por su circuito π equivalente.

Máxima capacidad de transferencia. - es calculada al multiplicar el coeficiente de St. Clair por el SIL. El coeficiente de ST. Clair solo depende de la longitud de la línea [23], [24], [25], [26].

$$P_{\text{line}} = c(l) \cdot \text{SIL} \text{ [W]} \quad (7)$$

Donde:

$c(l)$. - Coeficiente de St. Clair.

SIL. - Surge Impedance Loading. [W].

A	Sección transversal del conductor	mm ²
n	número de conductores por fase	
L	Inductancia	Henrios
U	Coeficiente de permeabilidad del conductor	
DMG	Distancia media geométrica	metros
RMG	Radio medio geométrico	metros
C	Capacitancia	Faradios
SIL	Surge Impedance Loading	W
Vo	Voltaje nominal de la línea	V
Zc	Impedancia característica de la línea	Ω
P_line	Potencia de la línea	W
c(l)	Coeficiente de St. Clair	

6. Formulación del problema

En este contexto se percibe, evaluar la transmisión de potencia en las líneas aéreas del sistema de transmisión en el Ecuador para diferentes modelos geométricos que se proponen para analizar qué sistema es el óptimo para su posible implementación, comparándola con el sistema implementado actualmente por los organismos de regulación vigentes en el país.

El procedimiento adoptado para la investigación permite obtener los valores teóricos reales de los elementos longitudinales y transversales presentes en las líneas de transmisión, ya que de estos valores depende tanto el funcionamiento como el comportamiento del sistema, tratando así de reducir en lo posible la Potencia Reactiva (Q), que generan las líneas de transmisión ya que esta se ve representada como una pérdida en el sistema ya que el sistema es de corriente alterna y las reactancias capacitivas e inductivas producen este tipo de fenómenos.

La investigación se llevará a cabo en líneas de alta tensión específicamente en líneas de 500 y 230 kV, con líneas de transmisión cortas, medias y largas desde 5 km hasta 174 km, y todas las especificaciones de los sistemas proporcionadas por la Corporación Eléctrica del Ecuador (CELEC EP) que se pueden observar en la tabla 2, cabe especificar que el conductor a ser utilizado será Acar Aluminium Alloy Reinforced Conductor de 560 mm².

Tabla 1. Especificaciones de las variables utilizadas

Variable	Especificación	Unidades de medida
R	Resistencia Serie	Ω
P	Resistividad del material conductor	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$
Long	Longitud del conductor	Metros

Tabla 2. Especificaciones técnicas de los sistemas de transmisión del ecuador

Línea de transmisión	Voltaje (kv)	Longitud (km)	n (por fase)	Líneas	Circuito
Inga-San Rafael C.C Sinclair	500	126	4	2	Simple
San Rafael-Jivino	230	90	2	1	Doble
Jivino-Shushufindi	230	30	2	1	Doble
El Inga-Tisaleo	500	137	3	1	Simple
Tisaleo-Totoras	230	13	2	1	Doble
Tisaleo-Chorrillo	500	174	3	1	Simple
Chorrillo-Pascuales	230	5	1	3	Doble

Los datos de la tabla 2, serán utilizados dentro del algoritmo genérico, que se desarrolló específicamente para esta investigación el cual generara las curvas de cargabilidad de St.Clair, las cuales serán aprovechadas para determinar qué sistema es el ideal para su implementación dentro del país.

Los conductores están soportados en estructuras metálicas de tipo cabeza de gato, en configuración horizontal.

7. Algoritmo para el estudio de cargabilidad en líneas de transmisión

Algoritmo 1. Cargabilidad de líneas de transmisión.

- 1: Paso 1: Declaración de los parámetros del sistema de potencia.
- 2: Paso2: Hacer mientras i sea menor o igual a longitud
- 3: Paso 3: COMPROBAR CONDICIONAL.
- 4: Si longitud ≤ 80
- 5: Si longitud >80 y longitud ≤ 200
- 6: Si longitud >200
- 7: Paso 4: RESOLVER ECUACIONES.
- 8: $R=(\rho \cdot \text{Long}) / A$.
- 9: ρ .- Resistividad del material conductor
- 10: Long. - Longitud del conductor.
- 11: Paso 5:
- 12: $L=(u/(2 \cdot n)+2 \cdot \ln(DMG/RMG)) \cdot 10^{-4} \cdot \text{Long}$
- 13: A.- Sección del conductor
- 14: u.- Coeficiente de permeabilidad del conductor.
- 15: n.- Número de conductores por fase
- 16: Paso 6:
- 17: $C=(24,2 \cdot 10^{-4})/\log_{10}(DMG/RMG) \cdot \text{Long}$
- 18: DMG. - Distancia media geométrica.
- 19: RMG. -Radio medio geométrico.

20: Paso 7:

21: $SIL=(V_0)^2/Z_c$

22: Vo. - Voltaje nominal de la línea.

23: Zc. - Impedancia característica de la línea.

24: Paso 8:

25: $P_{\text{line}}=c(l) \cdot SIL$

26: c(l). - Coeficiente de St. Clair.

27: SIL. - Surge Impedance Loading

28: Paso 9: Finalizar contador i

29: Paso 10: Finalizar hacer mientras

Se procede a realizar las curvas de Potencia vs la longitud de las líneas.

Una vez encontrado los parámetros longitudinales y transversales de las líneas dependiendo del tipo de línea que se esté trabajando. Validar el funcionamiento de los valores simulados y el sistema real basándose en la comprobación de fallas del modelo y en trabajos relacionados para realizar un análisis de las gráficas resultantes con los índices obtenidos.

8. Análisis y resultados.

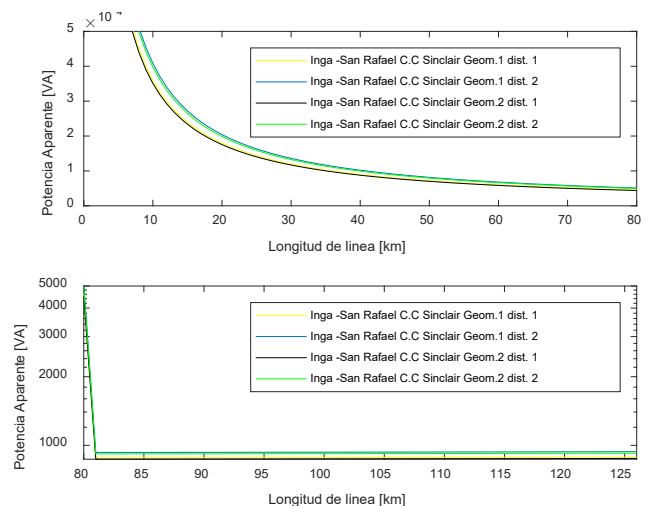


Figura 2. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se aprecia en la figura 2, la línea de transmisión Inga a San Rafael, en cualquiera de las dos geometrías y a diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse en los 70km, a partir de los 80km comienza una longitud mediana y provoca una caída de potencia aparente de una manera brusca, ese efecto se produce hasta estabilizarse en una longitud de

línea de 85km.

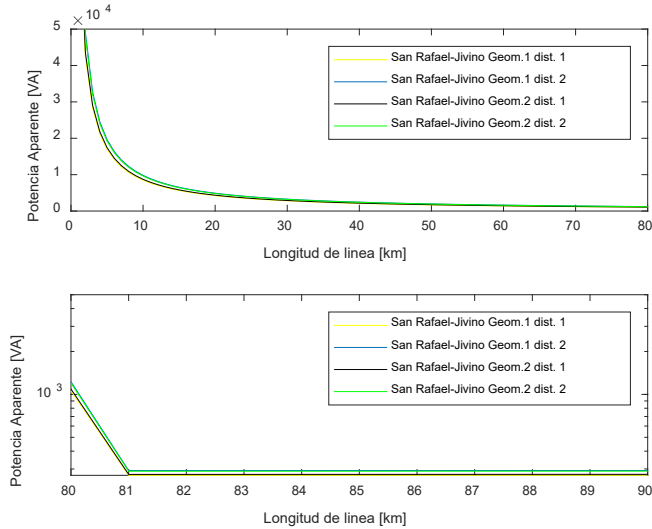


Figura 3. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se aprecia en la figura 3, la línea de transmisión San Rafaela Jivino, en cualquiera de las dos geometrías y a diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 70 Km, a partir de los 80Km hasta los 81Km es decir en una longitud mediana, provoca una caída de potencia aparente de una manera más brusca y prolongada, ese efecto se produce hasta estabilizarse en una longitud de línea mediana.

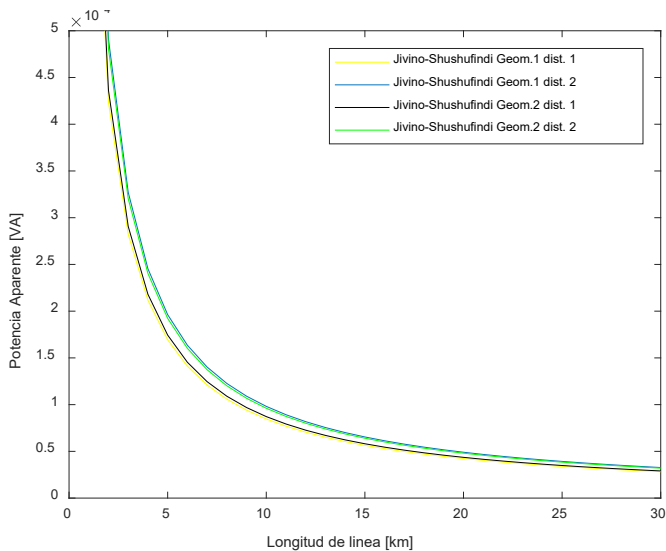


Figura 4. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

En la figura 4, la línea de transmisión Jivino a

Shushufindi, se trata de una longitud netamente corta es decir menos a los 80km, las curvas de estas líneas son más claras, pero existe mayor pérdida de la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 25km, con potencia de 500 VA.

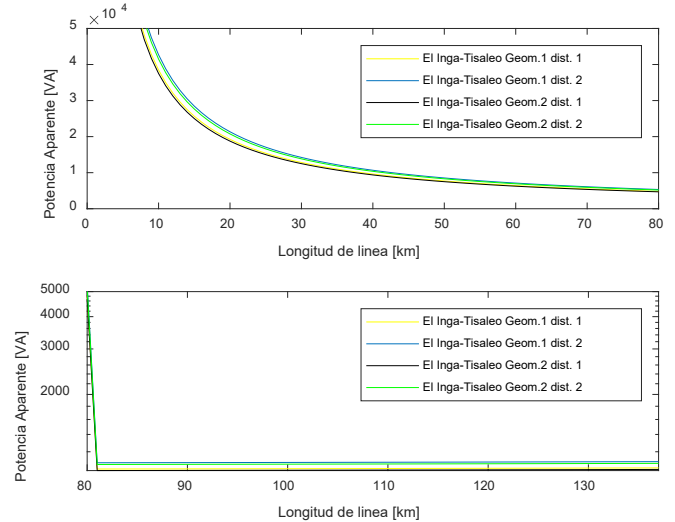


Figura 5. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

En la figura 5, se puede apreciar la línea de transmisión El Inga a Tisaleo, en cualquiera de las dos geometrías y a diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 70km, a partir de los 80km hasta los 81km es decir en una longitud mediana, provoca una caída de potencia aparente de 1KVA una manera más brusca a 500 VA en esta línea de transmisión existe una mayor pérdida de potencia aparente hasta estabilizarse a los 81km.

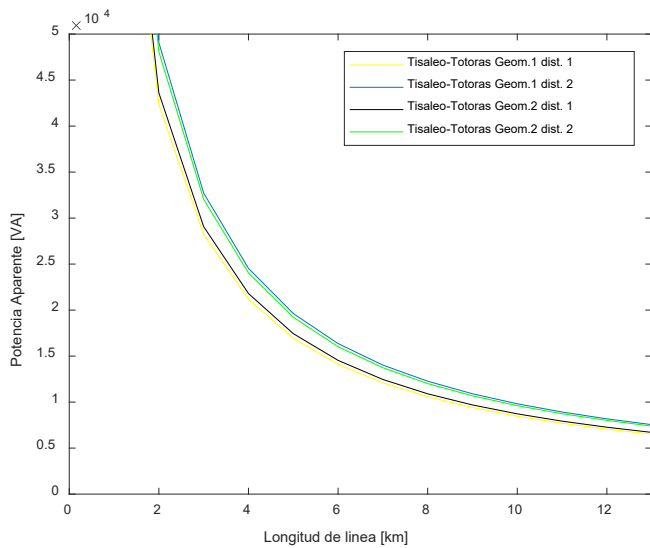


Figura 6. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se puede ver en la figura 6, la línea de transmisión Tisaleo a Totoras Shushufindi, al igual que la línea de transmisión Jivino a Shushufindi se trata de una longitud netamente corta, las curvas de estas líneas son más claras, pero existe mayor pérdida de la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 12 Km, con potencia de 500 VA.

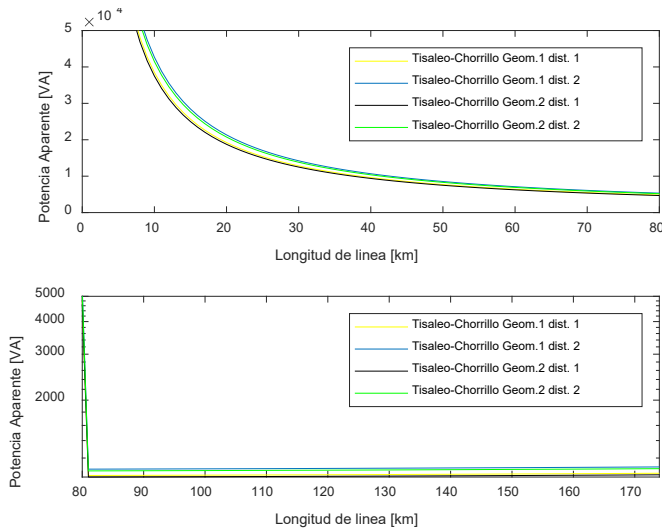


Figura 7. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se aprecia en la figura 7 la línea de transmisión Tisaleo-Chorrillos, en cualquiera de las dos geometrías y a diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y tiende a estabilizarse a los 70km, a partir de los 80km hasta los 81km es decir en una longitud mediana, provoca una caída de potencia aparente de una

manera más brusca y prolongada, ese efecto se produce hasta estabilizarse en una longitud de línea mediana.

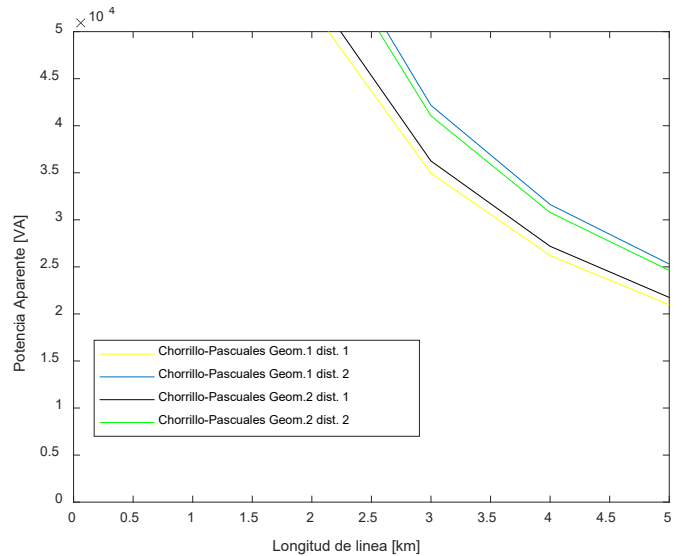


Figura 8. Resultados de la geometría de prueba 1 con las distancias de la tabla 2.

Como se aprecia en la figura 8 la línea de transmisión Chorrillo a Pascuales, en cualquiera de las dos geometrías y diferentes distancias la potencia aparente comienza en 50 KVA, y se pueden estabilizar a los 5Km además se puede afectar que no existe mayor pérdida de potencia aparente.

9. Conclusiones

Los resultados de la prueba obtenidos gracias a los diferentes distancias medias geométricas y diferentes radios geométricos, se aprecia claramente en las simulaciones, una caída tosca cuando se pasa de una longitud corta es decir menor a 80km a una longitud mediana entre 80km y 230km.

El límite de estabilidad para líneas de transmisión de longitud corta que son menor o igual a 80km se da gracias a que en un sistema de transmisión de longitud corta, el valor de la capacitancia y conductancia es igual a cero, y por otro lado cuando pasa a una longitud larga que es mayor a una longitud de 230km los límites de estabilidad cambian porque existe valor de los parámetros longitudinales.

De este análisis se aprecia que a menor distancia entre conductores y líneas es menor la capacidad de potencia que estas pueden transmitir, esto se puede constatar y recalcular gracias a las ecuaciones (2) y (3) presentadas en los parámetros longitudinales y transversales, esto se

produce ya que la longitud es directamente proporcional al valor de inductancia y capacitancia, además como se aprecia en la ecuación (5) que representa el cálculo de Surge Impedance Loading, dicha ecuación depende de los valores longitudinales y transversales de las líneas de transmisión.

REFERENCIAS

- [1] M. C. Tavares, "Enhancement the overhead transmission lines' capacity by modifying the bundle geometry using heuristics algorithms," *2016 IEEE PES Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf.*, pp. 646–650, 2016.
- [2] A. Roger *et al.*, "Lightning performance of transmission lines based upon real return-stroke current waveforms and statistical variation of characteristic parameters," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 153, pp. 46–59, 2017.
- [3] M. E. Webber, "Reduced Transmission Grid Representation using the St. Clair Curve applied to the Electric Reliability Council of Texas," *2017 14th Int. Conf. Eur. Energy Mark.*, pp. 1–5.
- [4] S. R. Ola, "Reactive power flow control using Static VAR Compensator to improve voltage stability in transmission system," *2016 Int. Conf. Recent Adv. Innov. Eng.*, pp. 1–5, 2016.
- [5] A. Fateh, M. Nor, M. Sulaiman, and R. Omar, "Study of Voltage and Power Stability Margins of Electrical Power System Using ANN," pp. 7–13.
- [6] C. Rafael, "Determinación de límites de transmisión en sistemas eléctricos de potencia Determination of Transmission Limits on Electric Power Systems," *Ing. Investig. y Tecnol.*, vol. 15, no. 2, pp. 271–286, 2014.
- [7] D. Lauria and S. Quaia, "Loadability Increase in Radial Transmission Lines through Reactive Power Injection," pp. 684–688, 2017.
- [8] A. Gas, "of Transmission Lines," pp. 1152–1157.
- [9] J. Hao and W. Xu, "Extended Transmission Line Loadability Curve by Including Voltage Stability Constrains," vol. 2, no. 4, pp. 1–5, 2008.
- [10] T. M. Papazoglou, "Maximum efficiency of interconnected transmission lines," vol. Vol. 141, pp. 353–356, 1994.
- [11] L. Dawson and A. M. Knight, "rating regime," *2016 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–6, 2016.
- [12] R. Alipio, M. H. R. Duarte, J. C. A. Dias, and A. S. De Miranda, "Lightning performance of transmission lines partially protected by surge arresters considering typical Brazilian conditions," *2017 Int. Symp. Light. Prot. XIV SIPDA 2017*, no. October, pp. 365–369, 2017.
- [13] Q. Fei, H. Zhou, X. Han, and J. Wang, "Structural health monitoring oriented stability and dynamic analysis of a long-span transmission tower-line system," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 20, pp. 80–87, 2012.
- [14] D. Duarte, L. Perro, and M. M. Fernandes, "lightning performance using a statistical approach."
- [15] M. Ntuli and R. Xezile, "Increasing the Capacity of Transmission Lines via Current Uprating: An Updated Review of Benefits, Considerations and Developments," *2016 Australas. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 1–6, 2016.
- [16] F. Koehler and J. Swingler, "Analysis of Flashover Mitigation Measures to Improve the Lightning Performance of Transmission Lines," *2018 53rd Int. Univ. Power Eng. Conf.*, pp. 1–6, 2018.
- [17] H. Bo *et al.*, "Advances in Engineering Software A method for analyzing stability of tower-line system under strong winds," vol. 127, no. September 2018, pp. 1–7, 2019.
- [18] P. Malicki, S. Papenheim, and M. Kizilcay, "Shielding failure analysis of a hybrid transmission line with AC and DC systems on the same tower," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 159, pp. 2–8, 2018.
- [19] S. Kucuk and L. F. Fernandez, "Extension of The Largest Turkish Oil Refinery's Electrical Power System: " $M = \sqrt{M} \cdot \sqrt{M} : \sim \sqrt{r} \sim I$," pp. 87–90, 2017.
- [20] Y. Du, X. Wang, and M. Chen, "Transient surge impedance of a vertical conductor over the ground," vol. 94, pp. 106–112, 2013.
- [21] K. Sheshyekani *et al.*, "The impact of the grounding system on the lightning performance of transmission lines: A sensitivity analysis," *2010 30th Int. Conf. Light. Prot.*, vol. 2010, pp. 1–6, 2010.
- [22] L. D. E. Compensaci, R. Serie, E. N. La, D. E. L. Sistema, and N. Interconectado, "Escuela politécnica nacional," 2012.
- [23] U. Mustafa, M. S. Bin Arif, H. Rahman, and M. A. B. Sidik, "Modelling and optimization of simultaneous AC-DC transmission to enhance power transfer capacity of the existing transmission lines," *ICECOS 2017 - Proceeding 2017 Int. Conf. Electr. Eng. Comput. Sci. Sustain. Cult. Herit. Towar. Smart Environ. Better Futur.*, pp. 328–332, 2017.
- [24] J. Lin, Q. Zhang, G. Sheng, Y. Yan, and X. Jiang, "Prediction System for Dynamic Transmission Line Load Capacity Based on PCA and Online Sequential Extreme Learning Machine," *2018 IEEE Int. Conf. Ind. Technol.*, pp. 1714–1717.
- [25] T. Suwada, "Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A Characteristic analysis of coupled transmission lines in stripline-type beam position monitor," *Nucl. Inst. Methods Phys. Res. A*, vol. 705, pp. 7–12, 2013.
- [26] T. Jang, S. Lee, K. Shin, and D. Lee, "Comparison of electrical-environment characteristics between two different types of EHV transmission lines," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 36, no. 20, pp. 881–886, 2003.

Recarga de vehículos eléctricos mediante una optimización entera mixta con participación de respuesta de la demanda

Recharge of electric vehicles through a mixed whole optimization with participation of the demand response

Jair Josue Salazar Lopez^{1*}, Edwin Marcelo García Torres¹, Diego Francisco Carrión Galarza¹

¹Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: jsalazarl3@est.ups.edu.ec

RESUMEN— Las micro redes de edificios comerciales jugarán un papel importante para una ciudad inteligente, al tener actividades de carga de vehículos eléctricos (EV) puede causar degradaciones del rendimiento y sobrecargas en el sistema de distribución. Se propone minimizar los costos en el consumo de energía eléctrica de un edificio tipo comercial cuando se realiza la recarga de vehículos eléctricos, se lo realizará mediante instalación de paneles fotovoltaicos para lo cual en el estudio se tomará el horario de atención del edificio cumpliendo la necesidad de la demanda, para el proceso de optimización se hará por medio de un despacho mediante asignación de recursos. Un resultado integral obtenido de las pruebas de simulación se demostró que la estrategia propuesta tiene resultados satisfactorios y alta eficiencia.

Palabras clave— Micro redes, vehículos eléctricos, edificio comercial, demanda.

ABSTRACT— The micro networks of commercial buildings will play an important role for an intelligent city, since having electric vehicle charging (EV) activities can cause performance degradation and overloads in the distribution system. It is proposed to minimize the costs in the consumption of electric energy of a commercial type building when the recharging of electric vehicles is carried out, it will be carried out by means of installation of photovoltaic panels for which in the study the opening hours of the building will be taken fulfilling the need of the demand, for the optimization process it will be done through a dispatch through allocation of resources. An integral result obtained from the simulation tests showed that the proposed strategy has satisfactory results and high efficiency.

Keywords— Micro networks, electric vehicles, commercial building, demand.

1. Introducción

Las micro redes de edificios comerciales jugarán un papel importante en una ciudad a fin de mejorar el autoconsumo de energía fotovoltaica y reducir el impacto en la red eléctrica emitida por un gran número de cargas de vehículos eléctricos (EV), para lo cual la coordinación de carga de vehículos eléctricos (EV) no solo reduce la diferencia entre el pico de carga con una mayor velocidad sino también disminuye la pérdida del sistema y mejora la calidad de la energía eléctrica (PQ) [1–3]. Con el aumento de las preocupaciones ambientales, la elección del transporte juega un papel destacado en el desarrollo sostenible. En este contexto, el vehículo eléctrico y la

respuesta a la demanda (DR, siglas en inglés “Demand Response”) tienen impactos indispensables en la futura red inteligente, sin embargo, el crecimiento actual es lento debido a la falta de infraestructuras para una carga adecuada, como es de esperar, las “estaciones de carga rápida” se ubicarían principalmente en lugares residenciales y comerciales ligeros [4–6].

En [7] se propone un enfoque probabilístico para la carga óptima de vehículos eléctricos (EV) en sistemas de distribución. Los costos de la demanda y las pérdidas de energía en el sistema se minimizan, sujetos a un conjunto de restricciones que considere las características de carga inteligente de los EV y los aspectos operativos de la red eléctrica. Sin gestión del lado de la demanda, un aumento

Citación: J. Salazar, E. García y D. Carrión, “Recarga de vehículos eléctricos mediante una optimización entera mixta con participación de respuesta de la demanda”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 21 de enero de 2020. **Recibido con correcciones:** 12 de marzo de 2020. **Aceptado:** 7 de julio de 2020.

DOI:

Copyright: 2020 J. Salazar, E. García y D. Carrión. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

en la cantidad de vehículos eléctricos (EV) podría provocar sobrecargas en alimentadores de distribución [8]. Los beneficios potenciales de las micro redes son multifacéticos, pero desde la perspectiva de los adoptantes, hay dos grandes grupos: 1) el costo, la eficiencia y los beneficios ambientales (incluidos posibles créditos de emisiones) de calor y energía combinados (CHP) y 2) los beneficios PQR de la generación y el control en el sitio [9].

En [10] se enfoca en escenarios de carga diurna para vehículos eléctricos en estacionamientos de edificios comerciales, donde la mayoría de los vehículos tienen un tiempo de estacionamiento prolongado que cobran durante el día, cuentan con importantes llegadas y salidas de vehículos estocásticos, así el precio de la electricidad altamente dinámico, aquello va de una gestión de carga de transacciones en tiempo real del sistema de gestión energética del edificio (BEMS) [11]. El modelo de optimización de costos operativos es establecido considerando las incertidumbres potenciales e índices de satisfacción del cliente [12].

El trabajo [13] implementa los EV en el primer y cuarto cuadrantes PQ, es decir, los EV inyectan / retiran potencia reactiva de la rejilla mientras se carga, [14] muestra que el enfoque óptimo de carga y descarga de EV puede ayudar a disminuir desajustes estimados en la micro red lo que es importante para aliviar las penalizaciones por falta de coincidencia de ofertas. Propone estrategias de gestión energética para la utilización económicamente viable de vehículo a la red en competencia mercados de electricidad donde las variaciones del precio de la electricidad son altas [15]. Las estrategias discutidas aún pueden complementarse con una estrategia de optimización de carga, un verdadero edificio de oficinas está equipado con un gran sistema fotovoltaico y una unidad de calefacción y suministro eléctrico (CHP) y las mediciones de la demanda eléctrica, perfiles y sistema fotovoltaico y un modelo de simulación para la unidad CHP están disponibles [9], [16].

En los siguientes artículos [17–20] se propone minimizar el costo operativo de la micro red y el costo de la protección ambiental mediante un modelo de despacho económico método para tomar diferentes variaciones temporales de producción y consumo de energía, y así determina el horario de despacho óptimo y energía contratada de la empresa de servicios públicos,

Aliviando la asimetría de información entre los propietarios de vehículos eléctricos y las agencias de distribución de la red con menores costos, reuniendo todos estos elementos discretos como parte de los EV cargadores intercambiadores-almacenamiento inteligentes estación integrada y demostración de ingeniería.

El propósito del presente artículo es minimizar los costos en el consumo de energía eléctrica de un edificio tipo comercial cuando se realiza la recarga de vehículos eléctricos, se lo realizará mediante instalación de paneles fotovoltaicos para lo cual en el estudio se tomará el horario de atención del edificio y dos diferentes tipos de cargas que son la rápida y la lenta, en el proceso se lo hará mediante un despacho por asignación para cubrir la respuesta a la demanda.

En adelante este documento se organiza de la siguiente manera. En la sección II se hace un marco teórico de lo que son vehículos eléctricos y sus tipos de carga. En la sección III se denota la formulación de un modelo basado en despacho por asignación. En la sección IV se exponen los resultados del modelo propuesto. En la sección V finalmente exponemos nuestras conclusiones.

2. Marco Teórico

2.1 Micro-Red

Es aquel sistema de generación eléctrica bidireccional que permite la distribución de electricidad desde los proveedores hasta los consumidores, mediante la integración de las fuentes de generación de origen renovable utilizando tecnología digital, con el objetivo de ahorrar energía, reducir costes e incrementar la fiabilidad, puede considerarse una red inteligente, también es vista como una pieza importante que conforma una gran red inteligente. Los elementos que conforman son: sistemas de generación distribuida; sistemas de almacenamiento de energía; técnicas para la gestión de cargas; sistemas de monitorización y control del flujo de potencia; y técnicas y procedimientos de mantenimiento preventivo.

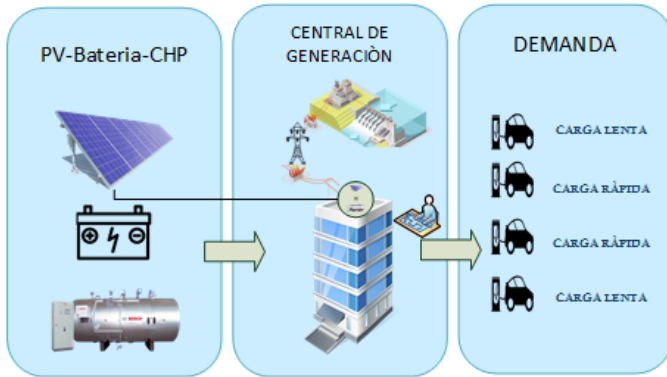


Figura 1. Estructura de una micro-red para un edificio

2.2 Panel Fotovoltaico

El punto de potencia máxima de un panel solar fotovoltaico es el parámetro que expresa el punto de funcionamiento para la cual la potencia entregada es máxima, se obtiene multiplicando el voltaje máximo V_{Pmax} por la corriente máxima I_{Pmax} por el factor de forma, dando un valor de potencia en Watts, cuando el panel opera a este punto se obtiene el mayor rendimiento posible.

$$P_{max} = V_{OC} I_{SC} FF \quad (1)$$

Dónde: V_{OC} : voltaje de circuito abierto, I_{SC} : corriente de cortocircuito, FF : factor de forma valores comunes suelen estar entre 0.7 y 0.8.

2.3 Vehículos Eléctricos

Los vehículos privados tienen una gran aleatoriedad. Sin embargo, se muestra que los hábitos de uso de vehículos eléctricos a gran escala deben seguir la distribución normal. x es el momento cuando el finaliza el último viaje del auto eléctrico. El auto con batería de litio con capacidad de aproximadamente 30kWh. Los comportamientos de carga y descarga de los vehículos eléctricos de los usuarios obedecen a una distribución normal, y el modelo es como sigue [17]:

$$f_s(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_s} * e^{\frac{-(x-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}}, & \mu_s - 12 < x \leq 24 \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_s} * e^{\frac{-(x+24-\mu_s)^2}{2\sigma_s^2}}, & 0 < x \leq \mu_s - 12 \end{cases} \quad (2)$$

Donde: valor medio = $\mu_s = 16.5$,
desviación estándar = $\sigma_s = 3.5$. El modelo de

kilometraje diario del vehículo es el siguiente:

$$f_d(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_d * x} * e^{\frac{-(\ln x - \mu_d)^2}{2\sigma_d^2}} \quad (3)$$

Donde: $\mu_d = 3.1$, $\sigma_d = 0.87$. μ_d y σ_d son las expectativas y variaciones de la función de distribución respectiva.

2.4 Estación de carga lenta

Este tipo de carga utiliza un nivel de voltaje convencional, es decir un voltaje de 240 Voltios y 16 Amperes de corriente, entregando en ese punto una potencia aproximada de 3.8 kW. Con este nivel de potencia, la batería se demora en cargar en un tiempo aproximado de 8 horas, siendo óptima para la recarga de vehículos eléctricos en la zona horaria nocturna, ubicadas en domicilios.

2.5 Estación de carga Semi- Rápida

Este tipo de carga utiliza un nivel de voltaje convencional, es decir un voltaje de 240 (VAC) y 32 Amperes de corriente, entregando en ese punto una potencia aproximada de 7.7 kW. Con este nivel de potencia, la batería se demora en cargar en un tiempo aproximado de 4 horas, siendo óptima para la recarga de vehículos eléctricos en la zona horaria nocturna, en lugares como garaje de viviendas unifamiliar o garajes comunitarios.

2.6 Estación de carga rápida

Este tipo de carga utiliza un nivel de corriente eléctricas más altas que las anteriores tiene como objetivo entregar la energía en corriente continua, obteniendo una potencia de salida aproximadamente de 50 kW. Con este nivel de potencia, la batería se carga un 60 % en un tiempo aproximado de 15 minutos, tiempo que es concedida por el cliente para su repostaje con un vehículo de combustión interna. Este tipo de carga al tener mayor potencia y exigencias, implica cambios o adecuaciones a las redes eléctricas actuales [6].

3. Planteamiento del Problema

3.1 Formulación del Problema

Para resolver el problema de consumo de energía eléctrica de un edificio comercial se propone la instalación de paneles fotovoltaicos y se aplicará un despacho óptimo simplificado por asignación de recursos el cual nos permitirá minimizar los costos al recargar

vehículos eléctricos en un sistema de distribución eléctrico con diferentes tiempos de carga. Para obtener los resultados esperados al instalar un sistema fotovoltaico para una óptima respuesta a la demanda, primero calcularemos la energía generada por el panel fotovoltaico, obteniendo estos datos se modela la inserción de cuatro vehículos eléctricos aleatorios, considerando las estaciones de recarga para baterías de los EVs, estas estaciones son capaces de entregar energía simultáneamente. Finalmente, se despacha mediante la utilización de un proceso por asignación de recursos optimizando así la respuesta a la demanda.

3.2 Aleatoriedad de lo EVs

El análisis se lo hace hora a hora durante un día de operación del edificio que cumple 14 horas al día, en la cual la estación de recarga de EVs posee cuatro islas, en las que se despacha energía de manera concurrente, es decir que la carga va a ser distinta por cada hora [21]. Existe una mínima posibilidad de que la carga sea la misma cada hora debido a que la demanda no es fija por lo cual podemos decir que podrá haber horas en las que están siendo utilizadas las cuatro islas de carga en la estación o a su vez no exista ninguna isla siendo ocupada [22].

3.3 Sistema fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es utilizado como base para la producción de energía eléctrica en los paneles solares mediante la radiación. Para nuestro estudio es necesario saber las HPS (horas pico solar) como se muestra en la ecuación (4) este cálculo depende de I y R , en donde I representa la potencia de irradiación incidente y R la irradiación.

$$HPS = \frac{R}{I} [h] \quad (4)$$

El cálculo de la energía que produce un panel fotovoltaico E_{panel} se puede conocer al utilizar ecuación (5) en la cual I_{panel} viene dado como la corriente alcanzada durante un día y r_{panel} es el rendimiento del panel fotovoltaico, en nuestro trabajo se propone un rendimiento de entre el 85% y 95%.

$$E_{panel} = I_{panel} * HPS * r_{panel} \quad (5)$$

Es muy recomendable usar el 90% de rendimiento al momento de calcular la energía del panel. Para el estudio

se utilizó en la estación de carga paneles solares de 100kW para satisfacer la demanda de EVs [23]. También podemos calcular la potencia P_{panel} generada por el panel hora a hora como podemos observar en la ecuación (6) en donde I_{panel} es la corriente máxima a una hora específica y V_{panel} es el voltaje del panel solar.

$$P_{panel} = I_{panel} * V_{panel} \quad (6)$$

3.4 Optimización entera mixta para los costos de carga

El problema de la asignación de grupos fotovoltaicos de producción de electricidad consiste en la decisión de qué grupos fotovoltaicos que hay que acoplar en cada hora del día (o semana) de manera que: se minimicen los costes variables de generación (incluyendo costes de la red), se suministre la demanda en cada hora, se mantenga un cierto nivel de reserva rodante, se respeten los parámetros de funcionamiento de los grupos fotovoltaicos (mínimos técnicos, potencia nominal).

Datos

D_h Demanda en la hora h [MW]

R coeficiente de reserva rodante con respecto a la demanda [p.u.]

a_t Término lineal del coste de mantenimiento del grupo fotovoltaico t [\$/MWh]

b_t Término fijo del coste de mantenimiento del grupo fotovoltaico t [\$/h]

ca_t Coste de arranque del grupo fotovoltaico t [\$/h]

cp_t Coste de parada del grupo fotovoltaico t [\$/h]

$\bar{P}_t$ Potencia máxima del grupo fotovoltaico t [MW]

$\underline{P}_t$ Potencia mínima del grupo fotovoltaico t [MW]

rs_t Rampa de subida del grupo fotovoltaico t [MW/h]

rb_t Rampa de bajada del grupo fotovoltaico t [MW/h]

Variables

P_{ht} Potencia producida por el grupo fotovoltaico t en la hora h [MW]

A_{ht} Acoplamiento del grupo fotovoltaico t en la hora h [0,1]

AR_{ht} Arranque del grupo fotovoltaico t en la hora h [0,1]

PR_{ht} Parada del grupo fotovoltaico t en la hora h [0,1]

$$\min \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T (a_t P_{ht} + b_t A_{ht} + ca_t AR_{ht} + cp_t PR_{ht}) \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T PR_{ht} = D_h \quad H \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^T (\bar{P}_t A_{ht} - P_{ht}) = RD_h \quad H \quad (9)$$

$$\underline{P}_t A_{ht} \leq P_{ht} \leq \bar{P}_t A_{ht} \quad 2HT \quad (10)$$

$$A_{ht} - A_{h-1t} = AR_{ht} - PR_{ht} \quad (H-1)T \quad (11)$$

$$P_{ht} - P_{h-1t} \leq rs_t \quad (H-1)T \quad (12)$$

$$P_{h-1t} - P_{ht} \leq rb_t \quad (H-1)T \quad (13)$$

$$P_{ht} \geq 0 \quad A_{ht}, AR_{ht}, PR_{ht} \in \{0,1\} \quad (14)$$

Pseudocódigo

Inicializa t (0:1:14)

Inicializa Pi, n, A, B, Carga

Paso 1: Desarrolla aleatoriedad

x=rand(n,1) *range(Pi)+min (Pi)

Paso 2: Desarrolla el tipo de carga

if(x<7.4) si no existe ningún VE

A(i,j)=0;

B(i,j)=0;

End

if (x<8)&&(x>=3.8) si es de carga lenta

A(i,j)=x;

B(i,j)=0.5;

[p,q]=find(A==0.5);

end

if(x<=150)&&(x>=50) si es de carga rápida

A(i,j)=x;

B(i,j)=1;

end

Paso 3: Desarrolla los costos de recursos

$$CR = \sum_r^h clineal(r) * generaprod(r,h) + cfijo * acopl(r,h)$$

$$CPV = \sum_p^h c(t) * P(t,h) + b(t) * A(t,h) + ca(t) * AR(t,h) + cp(t) * PR(t,h)$$

Paso 4: Función objetivo

$$\min \sum_{h=1}^H \sum_{t=1}^T (a_t P_{ht} + b_t A_{ht} + ca_t AR_{ht} + cp_t PR_{ht})$$

Paso 5: Gráfica

Gráfica (t, Carga)

Gráfica (t, potencia))

Fin

4. Análisis de resultados

El objetivo fue realizar una optimización que minimiza los costos asociados a la implementación de paneles fotovoltaicos, considerando para el efecto los criterios económicos permitiendo tener un ahorro en el consumo de energía eléctrica mediante despacho por asignación de recursos.

4.1 Casos de estudio

La carga de los vehículos eléctricos afecta de una manera muy grande a la red ya que existe un aumento en el consumo de energía incrementando costos, el trabajo presenta el estudio del despacho óptimo simplificado por medio de asignación de recursos.

La aleatoriedad para la carga de vehículos eléctricos es incierta para lo cual nuestra micro red debe estar dispuesta a cubrir la demanda, se toma en cuenta que el índice de radiación solar está en su punto más alto de tal manera que la producción de potencia que generarán los paneles fotovoltaicos sea la máxima.

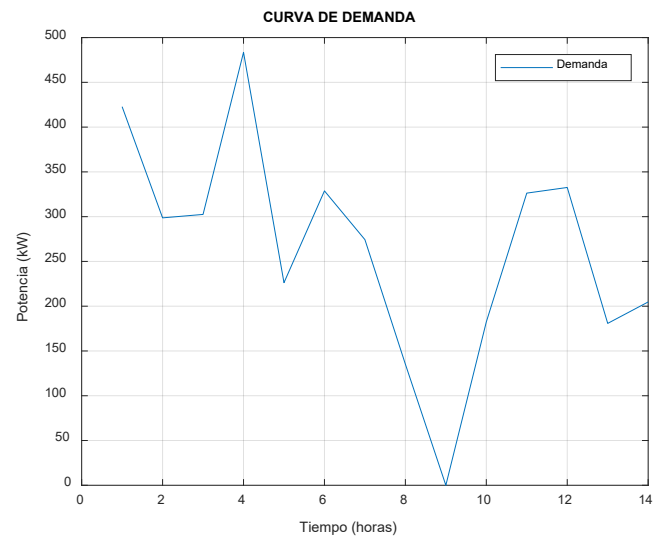


Figura 2. Curva de demanda de las cuatro estaciones

En la figura 2 se observa en cada hora la suma de demanda de las cuatro estaciones debido a la recarga de vehículos eléctricos realizándose de manera aleatoria, resultando que en la hora 9 no se produjo ningún tipo de recarga.

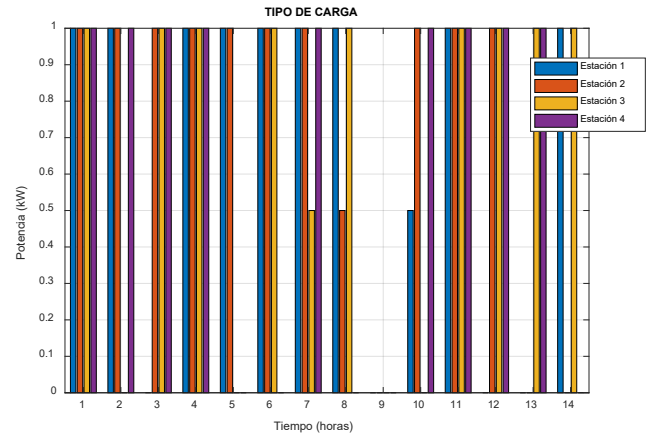


Figura 3. Tipo de carga en cada estación

En la figura 3 se puede notar en cada hora que tipo de carga se produjo de cada una de las cuatro estaciones resultando que en la hora 9 no hubo presencia de carga de vehículos eléctricos en ninguna estación.

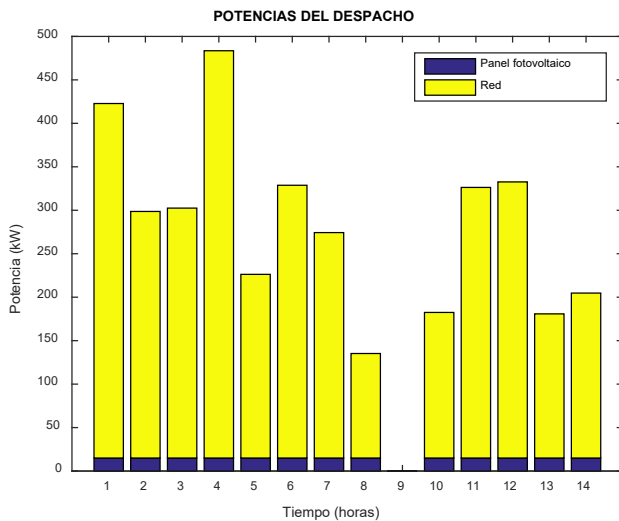


Figura 4. Valores de potencias del despacho

En la figura 4 se encuentra los valores de potencia del despacho que se realiza desde las 9 de la mañana hasta las 23 horas cumpliendo 14 horas y con el valor de demanda, al poseer recursos renovables como paneles fotovoltaicos permite tener un menor consumo a la red de energía.

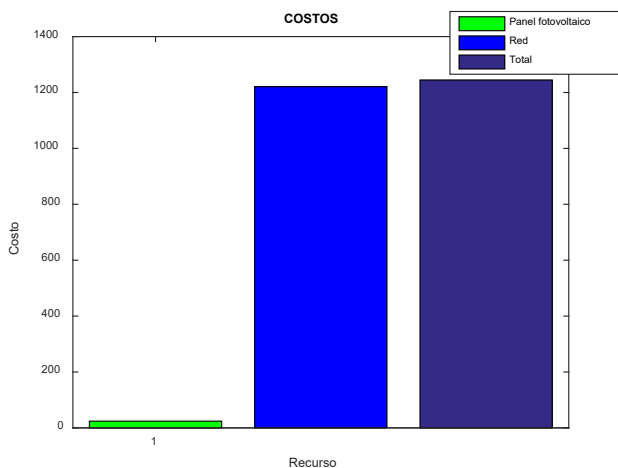


Figura 5. Costos de cada recurso.

Los costos de energía se ven reducidos tal como se muestra en la figura 5 al utilizar paneles fotovoltaicos sin afectar al sistema, estos entregan toda la capacidad que poseen para satisfacer la demanda de potencia, debido al

ingreso de vehículos eléctricos indefinidamente a su tipo de carga de energía y a la hora.

5. Conclusiones

El despacho económico por asignación de recursos verifica que el modo de gestión de energía fragmentada tiene un impacto significativo en la mejora del funcionamiento óptimo de red de distribución. Los resultados numéricos al añadir paneles fotovoltaicos para recargar EV tienen un buen efecto sobre la variación de la carga.

El nivel de voltaje para la carga rápida debe ser fuerte y se va a cumplir al ser un edificio, más acompañado de paneles fotovoltaicos se logra minimizar los costos al recargar vehículos eléctricos en un sistema de distribución eléctrico con diferentes tiempos de carga.

La asignación de recursos aplicada en este artículo se basa en el despacho de energías provenientes de la red eléctrica y el sistema fotovoltaico, este método permite cubrir la aleatoriedad en la que ingresan los vehículos eléctricos a sus estaciones de carga, logrando un aprovechamiento del 100% de este recurso, si se presenta un excedente de energía en los paneles se recarga al banco de baterías.

REFERENCIAS

- [1] N. Liu et al., "A Heuristic Operation Strategy for Commercial Building Microgrids Containing EVs and PV System," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 62, no. 4, pp. 2560–2570, 2015.
- [2] M. Zhang and J. Chen, "The energy management and optimized operation of electric vehicles based on microgrid," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 29, no. 3, pp. 1427–1435, 2014.
- [3] Y. Yang, Q. S. Jia, G. Deconinck, X. Guan, Z. Qiu, and Z. Hu, "Distributed coordination of EV charging with renewable energy in a microgrid of buildings," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 9, no. 6, pp. 6253–6264, 2018.
- [4] M. Shafie-Khah et al., "Optimal Behavior of Electric Vehicle Parking Lots as Demand Response Aggregation Agents," IEEE Trans. Smart Grid, vol. 7, no. 6, pp. 2654–2665, 2016.
- [5] A. Shukla, K. Verma, and R. Kumar, "Multi-objective synergistic planning of EV fast-charging stations in the distribution system coupled with the transportation network," IET Gener. Transm. Distrib. vol. 13, no. 15, pp. 3421–3432, 2019.
- [6] M. Etezadi-amoli, S. Member, K. Choma, J. Stefani, and S. Member, "Rapid-Charge Electric-Vehicle Stations," IEEE Trans. Power Deliv., vol. 25, no. 3, pp. 1883–1887, 2010.
- [7] A. Arias, M. Granada, and C. A. Castro, "Optimal probabilistic charging of electric vehicles in distribution systems," IET Electr. Syst. Transp., vol. 7, no. 3, pp. 246–251, 2017.

- [8] M. R. Sarker, M. A. Ortega-Vazquez, and D. S. Kirschen, "Optimal Coordination and Scheduling of Demand Response via Monetary Incentives," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 3, pp. 1341–1352, 2015.
- [9] C. Marnay, G. Venkataramanan, M. Stadler, A. S. Siddiqui, R. Firestone, and B. Chandran, "Optimal technology selection and operation of commercial-building microgrids," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 975–982, 2008.
- [10] L. Zhang and Y. Li, "Optimal Management for Parking-Lot Electric Vehicle Charging by Two-Stage Approximate Dynamic Programming," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 4, pp. 1722–1730, 2017.
- [11] Z. Liu, Q. Wu, M. Shahidehpour, C. Li, S. Huang, and W. Wei, "Transactive Real-time Electric Vehicle Charging Management for Commercial Buildings with PV On-site Generation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018.
- [12] Q. Yan, B. Zhang, and M. Kezunovic, "Optimized operational cost reduction for an EV charging station integrated with battery energy storage and PV generation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 2, pp. 2096–2106, 2019.
- [13] J. Wang, G. R. Bharati, S. Paudyal, O. Ceylan, B. P. Bhattacharai, and K. S. Myers, "Coordinated Electric Vehicle Charging with Reactive Power Support to Distribution Grids," *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 54–63, 2019.
- [14] A. T. Eseye, M. Lehtonen, T. Tukia, S. Uimonen, and R. J. Millar, "Optimal Energy Trading for Renewable Energy Integrated Building Microgrids Containing Electric Vehicles and Energy Storage Batteries," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 106092–106101, 2019.
- [15] H. S. V. S. Kumar Nunna, S. Battula, S. Doolla, and D. Srinivasan, "Energy Management in Smart Distribution Systems with Vehicle-To-Grid Integrated Microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 4004–4016, 2018.
- [16] J. Van Roy, N. Leemput, F. Geth, J. Buscher, R. Salenbien, and J. Driesen, "Electric vehicle charging in an office building microgrid with distributed energy resources," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1389–1396, 2014.
- [17] H. Jiang, S. Ning, and Q. Ge, "Multi-objective Optimal Dispatching of Microgrid with Large-scale Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 1–1, 2019.
- [18] Y. T. Liao and C. N. Lu, "Dispatch of EV Charging Station Energy Resources for Sustainable Mobility," *IEEE Trans. Transp. Electr.*, vol. 1, no. 1, pp. 86–93, 2015.
- [19] Z. Zhao, K. Wang, G. Li, X. Jiang, and X. Wang, "Economic dispatch of distribution network with inn for electric vehicles and photovoltaic," *J. Eng.*, vol. 2019, no. 16, pp. 2864–2868, 2019.
- [20] D. Xie, H. Chu, C. Gu, F. Li, and Y. Zhang, "A Novel Dispatching Control Strategy for EVs Intelligent Integrated Stations," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 2, pp. 802–811, 2017.
- [21] A. El-Zonkoly and L. Dos Santos Coelho, "Optimal allocation, sizing of PHEV parking lots in distribution system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 67, pp. 472–477, 2015.
- [22] J. F. Meza Cartagena and E. M. García Torres, "Asignación de recursos para la recarga de vehículos eléctricos en estaciones de servicios basado en la respuesta a la demanda," *I+D Tecnológico*, vol. 14, no. 2, pp. 66–73, 2018.
- [23] A. T. Davda, B. Azzopardi, B. R. Parekh, and M. D. Desai, "Dispersed generation enable loss reduction and voltage profile improvement in distribution network-case study, Gujarat, India," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 3, pp. 1242–1249, 2014.

Evaluación de la técnica de fusión de sensores para la detección de ocupación en una oficina universitaria

Assessment of the Sensor-fusion Technique for Occupancy Detection in a University Office

Miguel Chen Austin ^{1*}, Dafni Mora ¹, Gianmarco Fajilla ², Marilena De Simone ²

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

² Dept. of Environmental and Chemical Engineering, University of Calabria, 87036 Rende, Italy

*Autor de correspondencia: miguel.chen@utp.ac.pa

RESUMEN— Dado que el éxito de desarrollar edificios con mayor eficiencia energética tiene una dependencia quirúrgica del comportamiento de los ocupantes y el uso de los sistemas, la necesidad de tener en cuenta su comportamiento correcto en la simulación del diseño de los edificios en etapa inicial y la evaluación del consumo de energía, aumenta rápidamente. Para abordar esta necesidad, se está implementando ampliamente una técnica llamada fusión de sensores en el dominio del edificio, para desarrollar primero modelos descriptivos precisos para los perfiles de ocupación y, en última instancia, para poder predecir los perfiles típicos. En este contexto, una oficina está instrumentada para monitorear la calidad del aire interior, el consumo de energía y el uso de la ventana y la unidad de aire acondicionado. El estado de ocupación real fue monitoreado manualmente. El análisis de datos permitió resaltar los parámetros más relevantes asociados con el estado de ocupación, basado en el coeficiente de correlación de Spearman. El uso de histogramas permitió identificar una combinación óptima de sensores para detectar el estado de ocupación de la sala de oficina. La combinación óptima identificada agrupa los sensores de CO₂, energía y estado de la ventana, que detectaron la ocupación con un 91.5% de precisión.

Palabras clave— Ocupación, técnica de fusión de sensores, modelado de ocupación, edificio de oficinas, histogramas.

ABSTRACT— Since the success of developing more energy efficient buildings has a surgical dependence on the occupants' behavior and systems usage, the necessity of accounting for their correct behavior in the simulation of the early-stage buildings' design and energy consumption evaluation, is increasing rapidly. To board this necessity, a technique called sensor-fusion is being widely implemented in the building domain, to first develop accurate descriptive models for occupancy profiles, and ultimately, to be able to predict typical profiles. In this context, an office is instrumented to monitor the indoor air quality, the power consumption, and the use of the window, and air conditioning unit. The real occupancy state was monitored manually. The data analysis allowed to highlight the most relevant parameters associated with the occupancy state, based on the Spearman's correlation coefficient. The use of histograms allowed to identify an optimal sensor combination for detecting the occupancy state of the office room. The identified optimal combination groups the CO₂, power, and window state sensors, which detected the occupancy with 91.5% of accuracy.

Keywords— Occupancy, Sensor-fusion technique, Occupancy modeling, Office building, Histograms.

1. Introducción

According to the international energy agency [1], in 2017, buildings and appliances were responsible for around 30% of global energy use. Building energy use increased by 0.8% from 2016 and rose 20% between 2000 and 2017. Since the success of developing more energy, efficient buildings and equipment have a surgical

dependence on the occupant's behavior and systems usage.

Now with the implementation of new technologies oriented to energy saving and green building certifications, a new approach related to how they affect the use of energy due to occupant behavior has emerged [2].

Citación: M. Chen, D. Mora, G. Fajilla y M. De Simone, "Evaluación de la técnica de fusión de sensores para la detección de ocupación en una oficina universitaria", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 3 de febrero de 2020. **Recibido con correcciones:** 4 de febrero de 2020. **Aceptado:** 12 de julio de 2020.

DOI:

Copyright: 2020 M. Chen, D. Mora, G. Fajilla y M. De Simone. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

Include the occupant behavior is fundamental to quantifying the savings in energy consumption. For commercial buildings, behavioral change can reduce energy use by 5% to 30% [3].

Occupant movements and presence are fundamental to occupant behavior simulation by providing information about whether a room is occupied, the number of occupants, or the specific individual in the room, depending on the sensor or combination of sensors.

The real occupancy patterns in buildings may differ significantly from each other. Existing research includes various data collection approaches, including non-invasive occupant observations, observing occupants that have had perturbations applied, surveys, and laboratory studies [4]. Gathering data on human-building interaction is a new approach for achieving energy efficiency in the building sector, and the research groups are focusing into evaluating the impact of occupant behavior in the building design and operation as a new horizon [5].

Measurements of energy-related behavior are collected using a) physical sensing, and b) non-physical sensing methods [6]. Data gathering to investigate occupant behavior studies in thermal comfort, occupancy, windows, shades and blinds, and lighting and electrical equipment were categorized by [7]. The indoor and outdoor environmental data are in the physical sensing category, and the authors identified the most significant as air temperature, air humidity, CO₂, occupancy, window state, door state, and others. The authors in [8] monitored some environmental parameters as CO₂, carbon monoxide (CO), total volatile organic compounds (TVOC), outside temperature, dew point and small particulates (PM 2.5), air temperature, relative humidity, motion detection, and acoustic to determining which parameters have significant correlation with the occupancy level. The results show the most significant correlation for CO₂ and acoustic parameters with the number of occupants in the space.

Sensor fusion approaches are built upon the use of multiple sensors or sensing modalities in an attempt to combine their advantages while canceling out their disadvantages as much as possible [9], [10]. In general, to overcome the disadvantage of an individual detection system, a fusion of multiple sensors is encouraged in occupancy detection.

2. Experimental setup and monitoring parameters

The experimental apparatus was designed to monitor the occupancy in an office at the University of Calabria (Italy), as well as collecting data from the indoor environment such as air quality, occupancy state and behavior, and electricity usage; this data collection started in February 2016 is ongoing.

2.1 Description of the office room

Within the University building, submitted to Mediterranean climatic conditions, the instrumented office room has a surface area of 19m² and 2.50m height. This office has a Westward-facing external wall and a two-wing window of 0.68 x 0.76m² (Figure 1 (a)). The equipment within the room includes desktop computers and printers, where the heating and cooling system are autonomous (Figure 1 (b)). Normally, the office is generally used by one person, where the information about how the office is used, was collected by personal interview.

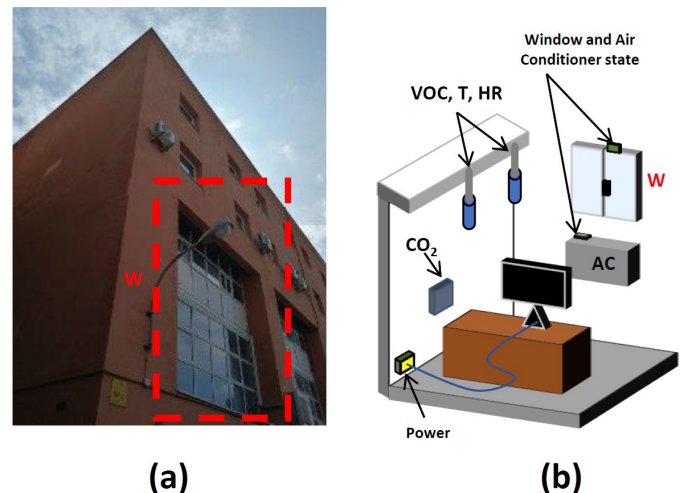


Figure 1. The university office: (a) external wall, (b) schematic with sensors location.

The detected variables for data collection were divided into two groups, binary and continuous:

- 1) Binary variables: Occupancy state (vacant = 0, present = 1), Window state (closed = 0, open = 1), Air conditioning usage (off = 0, on = 1).
- 2) Continuous variables: CO₂ (ppm), Power (W), VOC (ppm), Indoor air temperature (°C), Indoor air relative humidity (%).

2.2 Equipment for internal variables measurement

Sensors were installed to obtain information regarding user presence and absence intervals. Data were automatically queried every one-minute and stored in central embedded MySQL database.

The experimental apparatus was designed to monitor the presence and movement of the occupants in the office, as well as thermophysical properties of the internal environment and the electricity consumption connected to the use of computers [11].

The sensor's location was carefully selected to ensure that the sensors were triggered when occupants are inside the office. The indoor environment sensors were placed on internal walls at the height of 1.8m above the floor, as suggested in [12] to avoid any perturbation from direct sunlight.

The WuTility Version 4.30 tool was used for management and inventorying [13]. Indoor VOC and CO₂ sensors for concentration levels and temperature/humidity sensors were the first installed. The results were checked, and clock synchronization was set up. Preliminary tests for window/door position and air conditioning usage sensors were successively conducted before actual data collection.

The CO₂ sensor was installed near the desk at nose level (when sitting, 1.1m above the ground) [8], at this position more stable CO₂ values are ensured during the unoccupied periods. Table I shows the characteristics of the sensors used in the experimental apparatus.

3. Experimental results and data analysis

Fig. 2 and Fig. 3 show hourly data of the occupancy state in relation to CO₂, VOC, air temperature, relative humidity, window state, power, and air conditioning usage for two summer days (1st – 2nd June). As shown in the graphs, just after the first person arrives in the office, all sensors indicate a change in their measurements. In the first day, the CO₂ sensor (figure 2 (a)) seems to have a morning maximum reading around 11:00 and window closed. From about 11:30 to 14:30 (when the room is not occupied), all sensors register a decrease in their readings, except for the temperature.

When the office is left vacant after 18:00, all sensors measurements drop except for the humidity. Clearly, this behavior is strongly related to the occupancy state and also to the number of people that might have been in the room at the moments where CO₂ levels reached high

values even though windows remained open (Fig. 2 (a) with figure 3 (a), for the second day at 12:00).

Moreover, there appears to be a stable value for CO₂ concentration level and the power, when there is no occupancy. The same consideration can not be said for indoor air temperature, relative humidity, and VOC.

Table 1. Characteristics of sensors employed for data collection

Sensor	Variable	Range and accuracy
57018 ^a CO ₂ sensor	Carbon dioxide [ppm]	0–2000 ppm ±30 ppm, ±5%
57645 ^a AC Device	Electricity power	0–50 A AC, 30–6000 Hz (all waveforms)
ABUS FU7350W Abus rectangular, NC,0.2 A Reed Switch	Window/door position (open/closed) Air conditioning (on/off)	Contact sensor
57618 ^a Web-Graph Air Quality	Volatile organic compounds [ppm]	450–2000 ppm VOC as CO ₂ equivalent
	Air temperature [°C]	typ. @ 25 °C ±0.3 °C max. @ 0–50 °C ±1.2 °C
	Relative humidity [%]	typ. @ 25 °C ±3% rH max. @ 0–50 °C ±7% rH (0–100% rH)
57613 ^a Web-Thermo- Hygrobargraph	Pressure [hPa]	typ. @ 25 °C ±0.8 hPa (750 – 1100 hPa)
	Air temperature [°C]	typ. @ 25 °C ±0.3 °C max. @ -40–85 °C ±1.5 °C
	Relative humidity [%]	typ. @ -20–60 °C ±1.8% rH max. @ -20–60 °C ±4% rH (0–100% rH)

^aWieseman & Theis.

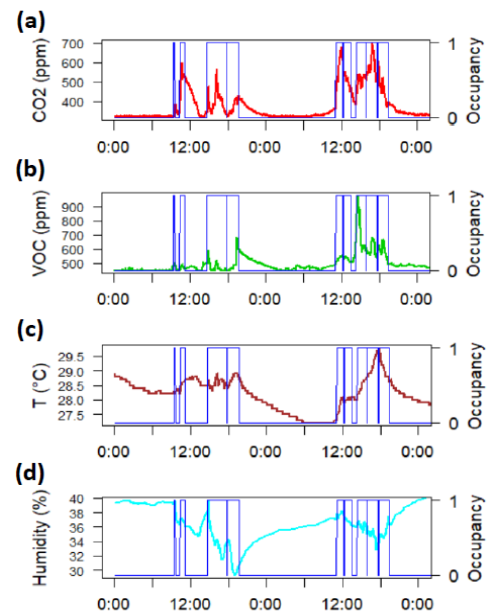


Figure 2. Real occupancy (dashed line) and measurements for two summer days (1st to 2nd June): a) CO₂ (ppm), b) VOC (ppm), c) air temperature (°C), d) relative humidity (%).

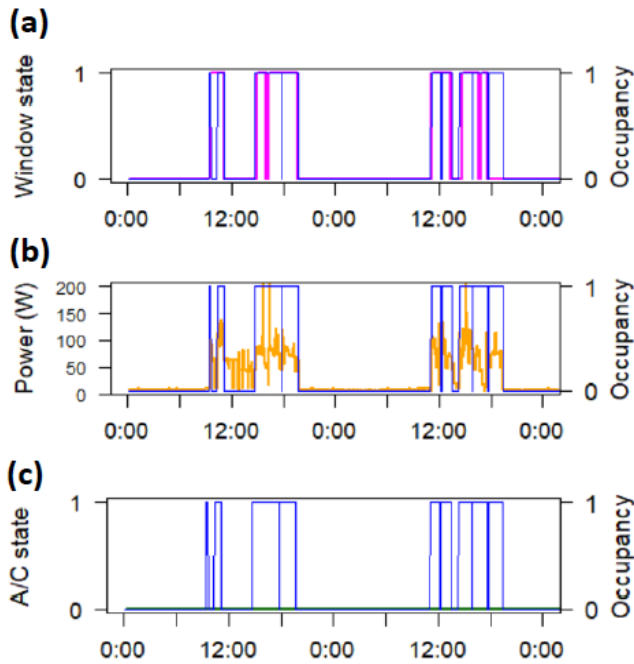


Figure 3. Real occupancy (dashed line) and measurements for two summer days (1st to 2nd June): a)) window state, b) power (W), c) air conditioning usage.

Figure 3 (a) and (c) show the relationship between occupancy and window state, and between occupancy and air conditioning usage (A/C state), respectively. In this case, the office is occupied, it can be observed that the air conditioning remained off during the presented period. Thus, it can be inferred that merely the action of opening the window is enough to maintain occupants' comfort. It seems that they are variables more related to occupant preferences than to presence.

It can be inferred from Fig. 2 (a) and Fig. 3 (b) that there is a limit value, for both CO₂ and power, when there is no occupancy: around 368ppm and 14.1 W, respectively. Therefore, the following is considered: when the CO₂ value falls below 368ppm there is no occupancy, and if the CO₂ level stays above this value, the office will be considered as occupied. The same criterion was applied concerning power. This "threshold value" for each continuous variable was obtained by calculating the average value when there is no occupancy in the office.

Regarding the window state and the air conditioning usage, it was assumed that when the air conditioning is on, then the room is occupied, in accordance with the information collected by the interview and collected data; this assumption is also valid for the window state. These

assumptions and considerations are of vital importance at the moment to decide which sensors should be combined to determine the occupancy state in the room accurately.

3.1 Determination of the significant variables

As shown in the figures above, some variables showed a stronger affinity to the occupancy state than others. Thus, to objectively determine which are these variables, a correlation study was conducted using the software R and its corplot library, based on Spearman's Correlation Coefficient (SCC). The correlation plot (or corplot) is presented in figure 4. A sample of 45 days (from February 2016 to September 2016) with a sample rate of an observation every minute was used in this correlation study, which results in 64,800 observations in total.

The highest SCC values are in agreement with the relations observed in the behavior of CO₂, power, air conditioning, and window state (figure 2 and figure 3). The SCC value between CO₂ and occupancy state resulted in 0.61. As expected, a similar SCC value is encountered for the correlation between occupancy state and power (SCC equal to 0.64). Window state and air conditioning usage presents a SCC value of 0.46 and 0.42, respectively in relation to the occupancy state. Only for the relationships between occupancy state and temperature and humidity, the Spearman's correlation coefficient returns values of negative correlation.

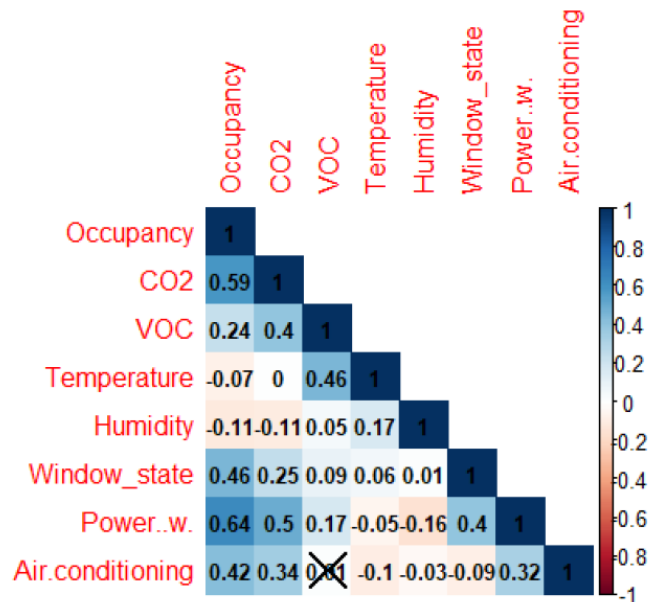


Figure 4. Correlation plot using Spearman's correlation coefficients.

3.2 Difficulty in correlating discrete and continuous variables

Since the occupancy state behaves as a discrete variable and parameters such as the CO₂ and VOC levels, temperature, humidity, and even the power consumption, all behave as continuous variables, inquiries may arise at the moment where the most relevant parameters are identified by using a simple correlation analysis based on Pearson's and Spearman's coefficients. The reason lays in the weak values presented in the correlation coefficients.

For example, the correlation between Power and Occupancy state (figure 3 (f)), compared with other plots, at a glance, it seems that the Power should present a strong correlation coefficient value with the occupancy state, just by observing these figures. In fact, the correlation analysis shows that this is indeed the case, where the correlation coefficient value equals 0.64 (figure 4), which is the highest value in the correlation plot. However, from the point of view of statistics, expected strong correlation coefficient values might lay around or higher than 0.97.

However, when plotting together occupancy state and Power, this strong correlation seems to be difficult to be perceived because, as shown in figure 5, for a range of Power between 0-20 W and 40-60 W, the occupancy state appears to indicate that the office is both occupied and unoccupied.

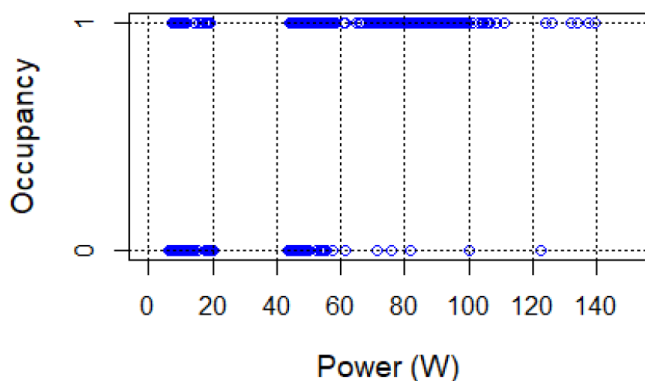


Figure 5. Occupancy state as function of the Power.

Based on the aforementioned, special treatment is procured when estimating the correlation between discrete and continuous variables. The procedure is known as the maximum likelihood estimation (MLE) is

used to estimate such correlations [14]. In this method, the discrete variable is assumed as to be a classification of an unobservable continuous variable whose joint distribution with the observed continuous variable is bivariate normal. Such formality is contemplated to be examined in this research within further modeling approaches.

In summary, the identified significant variables are two continuous variables (power and CO₂) and two binary variables (window state and air conditioning usage).

4. Identification of a suitable sensor combination for occupancy detection

After identifying the most significant variables through correlation analysis, these four selected variables are implemented to determine the best combination (or fusion) for detecting occupancy in the office room.

Regarding the window state and the air conditioning usage, it was assumed that when the air conditioning is on, then the room is occupied, in accordance with the information collected by interview and collected data; this assumption is also valid for the window state. For these two binary variables, the authors assumed 1 for occupied room and 0 for an empty room.

Before looking for an optimal sensor combination of the sensors, each of the four variables were analyze as to evaluate their performance on detecting occupancy in the office. figure 6 shows four histograms for such purpose, presenting the occurrence of occupancy when the established values for each of the four variables is reached.

In this case, figure 6 (a) presents the occurrence of occupancy in the office room. This histogram shows that the office remained unoccupied more often than (around 80%) it was occupied. figure 6 (b) shows the occupancy state only when the Power was higher than 14.1 W. This indicates that 70% of the times the office was occupied, the power consumption was higher than 14.1 W. Fig. 6 (c) shows the occupancy state only when CO₂ levels were higher than 368ppm, and finally, figure 6 (d) shows the occupancy state when the window is opened.

In figure 6 (c) it can be observed that the occupancy state of the office is ambiguous based on the CO₂ levels only since the occurrence of presence and absence is nearly 50 % each. However, from figure 6 (d), it can be observed that more than 80% of the times the window

remained open, the office was occupied. The other remaining less than 20% can be explained by the fact that sometimes the window might remain opened while the office was unoccupied.

The aforementioned indicates, first, that the occupancy in the office can be somewhat accurately detected by only the knowledge of either the power consumption or the window state (opened or closed), separately. Second, the use of merely CO₂ sensors might not be enough to detect the occupancy accurately. Therefore, it can be inferred that the occupancy state can be accurately detected by combining the power consumption and window state within the office.

The identification of the optimal sensor combination to detect occupancy is based on the Boolean logical theory through AND logical gates. The results presented here (based on an occupied office), has shown that the best arrangement or combination of sensors, is to implement together sensors for the Power consumption, the CO₂ levels and the window state (figure 7) as follows: (Power > 14.1 W) AND (CO₂ level > 368ppm) AND (Window state > 0). In other words, the fusion of only these three sensors describes the best the occupancy state, reaching an error of about 8.5%; meaning that this combination of sensors can describe the occupancy in the office with an accuracy of 91.5%.

Figure 7 also shows that 91.5% of the 20% occupancy presented in figure 6 (a) can be explained by implemented these three sensors together. Finally, since during this period of measurements, the air conditioner was not needed, the results showed that its inclusion to the analysis decreased the overall accuracy (not presented here).

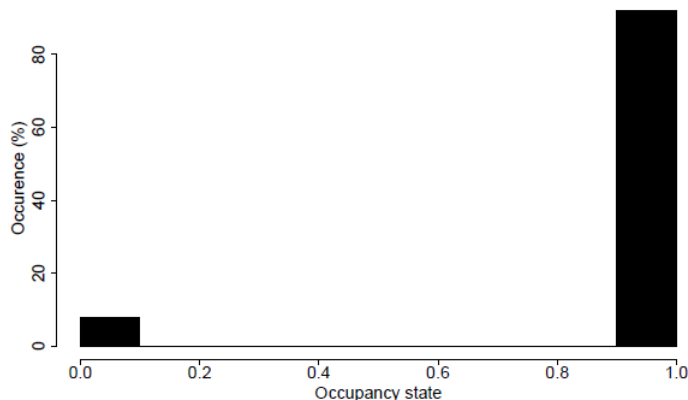


Figure 7. Representation of the descriptive model for the occupancy profile.

5. Conclusions

An experimental investigation of occupancy detection in a university office was conducted by using both human observations and sensor network data. Collected data were analyzed to explore relationships between the occupancy state and the magnitude of indoor parameters, to identify first optimal sensor combinations for accurately detect occupancy.

Seven measured variables were considered, and four demonstrated a good correlation with occupancy: electric power, carbon dioxide, window state, and air conditioning usage. These correlations were determined by using a correlation analysis based on Spearman's correlation coefficient through R software and its corplot library. The CO₂ and electric power variables were introduced as continuous variables, and window state and air conditioning usage as binary variables.

A simple statistical approach was implemented to determine the optimal combination of these four variables by using histograms. Histograms showed that the occupancy could be accurately detected when using either monitoring the power consumption or the window state. However, higher accuracy was reached (about 91.5%) in the occupancy detection when combining three variables: CO₂ levels, Power, and window state.

In conclusion, this approach shows that a simple sensor-fusion technique can accurately determine the occupancy of the office. These results encourage the development of further studies in order to verify the potential application of the investigated elaboration techniques in diverse office typologies, working schedules, and climatic conditions.

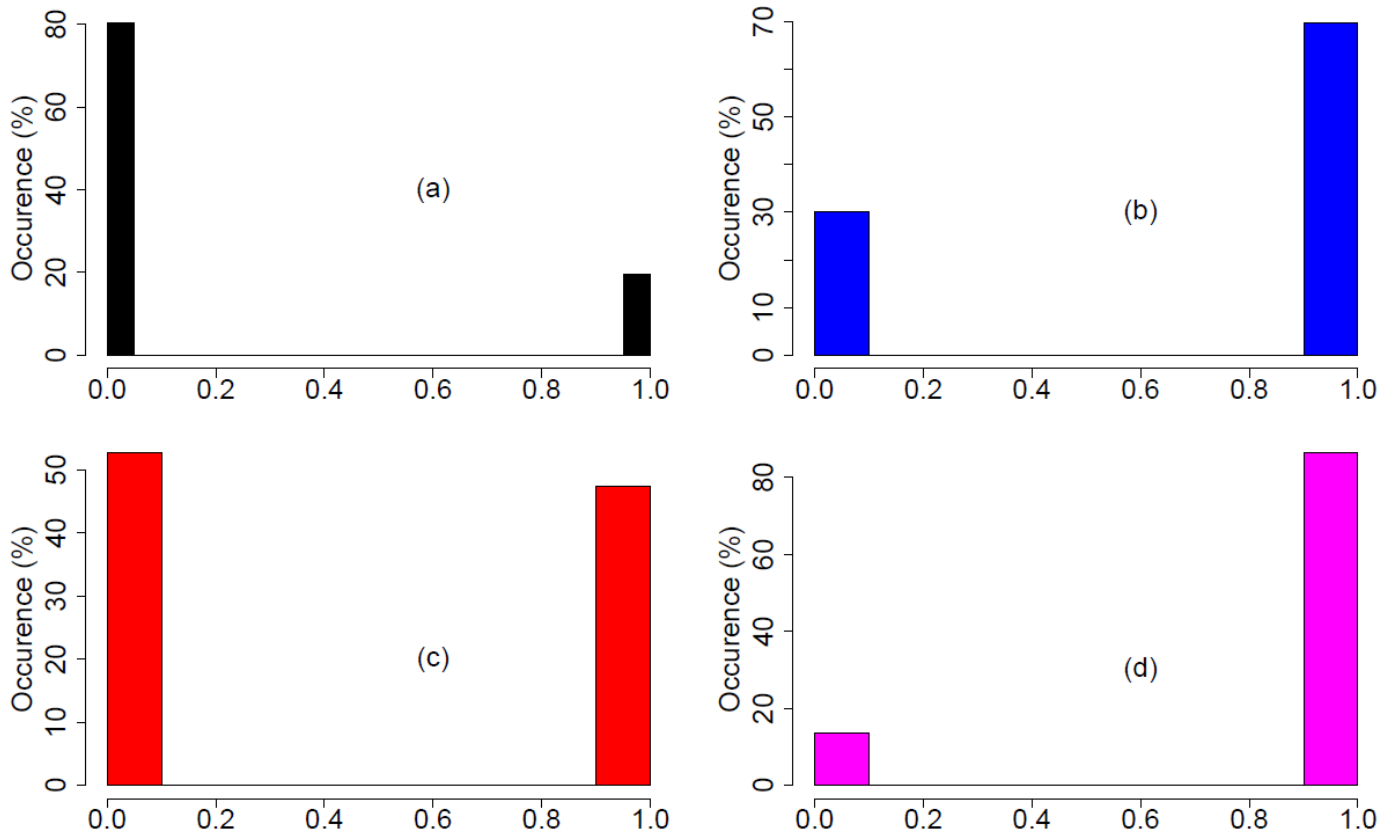


Figure 6. Occupancy state represented using histograms: (a) Real occupancy state, (b) occupancy state when Power > 14.1 W, (c) occupancy state when CO₂ > 368 ppm, and (d) occupancy state when window is opened. Occupancy state at horizontal axis: occupied = 1.

REFERENCES

- [1] The International Energy Agency (IEA), "Energy efficiency 2018," 2018.
- [2] IEA, "IEA-EBC Annex 66: Definition and simulation of occupant behavior in buildings," 2015. [Online]. Available: www.annex66.org.
- [3] T. Hong and H.-W. Lin, "Occupant behavior: impact on energy use of private offices," in *ASim IBSPA Asia Conference*, 2012.
- [4] D. Yan *et al.*, "Occupant behavior modeling for building performance simulation: current state and future challenges," *Energy and Buildings*, vol. 107, pp. 264–278, 2015, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.08.032.
- [5] A. Wagner and L. O'Brien, "Occupant behaviour-centric building design and operation EBC Annex 79," 2018.
- [6] T. Hong, D. Yan, S. D. Oca, and C. Chen, "Ten questions concerning occupant behavior in buildings: the big picture," *Building and Environment*, vol. 114, pp. 518–530, 2017, doi: 10.1016/j.buildenv.2016.12.006.
- [7] T. Hong, S. C. Taylor-Lange, S. D'Oca, D. Yan, and S. P. Corgnati, "Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 116, pp. 694–702, 2016, doi: 10.1016/j.enbuild.2015.11.052.
- [8] B. Dong *et al.*, "An information technology enabled sustainability test-bed (ITEST) for occupancy detection through an environmental sensing network," *Energy and Buildings*, vol. 42, no. 7, pp. 1038–1046, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.01.016.
- [9] K. Li *et al.*, "SenseFlow: An Experimental Study for Tracking People," *CoRR*, vol. abs/1606.0, 2016.
- [10] T. Teixeira, G. Dublon, and A. Savvides, "A survey of human-sensing: methods for detecting presence, count, location, track, and identity," *ACM Computing Surveys*, vol. 5, pp. 1–35, 2010.
- [11] D. Mora, G. Fajilla, M. Chen Austin, and M. De Simone, "Occupancy patterns obtained by heuristic approaches: cluster analysis and logical flowcharts. A case study in a university office," *Energy and Buildings*, vol. 186, pp. 147–168, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.01.023.
- [12] R. V. Andersen, "Occupant behaviour with regard to control of the indoor environment," Technical University of Denmark, 2009.

- [13] W&T, “Wiesemann & Theis GmbH,” *Technical Manual*, 2015. [Online]. Available: <https://www.wut.de/e-57618-13-apus-000.php>. [Accessed: 01-Jan-2016].
- [14] N. R. Cox, “Estimation of the Correlation between a Continuous and a Discrete Variable,” *International Biometric Society*, vol. 30, no. 1, pp. 171–178, 2014.

Optimización en manufactura mediante la experimentación y modelos de regresión logística

Optimization in manufacturing through experimentation and logistic regression models

Armando Mares Castro^{1*}

¹ Facultad de Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico Superior de Purísima del Rincón, México

*Autor de correspondencia: armando.mc@purisima.tecnm.mx

RESUMEN— En éste artículo se proponen tres esquemas de optimización para una respuesta de tipo fracción disconforme muestral en un proceso de manufactura. El diseño de experimentos es una técnica estadística que se aplica para mejorar la calidad del producto final. El uso de modelos de regresión logística se recomienda cuando se analiza la fracción disconforme muestral como parámetro de la calidad. A partir de los resultados del experimento se construye un modelo matemático con el fin de optimizar los parámetros del proceso. La metodología propuesta fue aplicada al proceso de vulcanización en la fabricación de suelas de hule. Se realiza un análisis comparativo de tres metodologías de optimización para evaluar el mejor resultado. Los niveles obtenidos en dos procedimientos fueron iguales y en el tercero se verificó una solución menos eficiente. La mejor solución se aplicó al proceso con una significativa mejora en el nivel de calidad del producto.

Palabras clave— *Algoritmos Genéticos, Función de Deseabilidad, Proceso de fabricación de suela de hule, Programación Cuadrática Secuencial, Regresión Logística.*

ABSTRACT— In this article, three optimization schemes are proposed for a response of sample non-conforming fraction type in a manufacturing process. The design of experiments is a statistical technique that is applied to improve the quality of the final product. The use of logistic regression models is recommended when analyzing the sample non-conforming fraction as a quality parameter. From the results of the experiment a mathematical model is constructed in order to optimize the process parameters. The proposed methodology was applied to the vulcanization process in the manufacture of rubber soles. A comparative analysis of three optimization methodologies is performed to evaluate the best result. The levels obtained in two procedures were the same and in the third one a less efficient solution was verified. The best solution was applied to the process with a significant improvement in the level of product quality.

Keywords— *Genetic Algorithms, Desirability Function, Rubber sole process, Sequential Quadratic Programming, Logistic Regression.*

1. Introducción

Un proceso de manufactura consiste en la transformación de materias primas en productos terminados, cuya finalidad es la de satisfacer una necesidad. Las etapas de un proceso de manufactura incluyen el diseño del producto, la selección de las materias primas y la secuencia de los procesos a través de los cuales es transformada la materia prima hasta la obtención de un producto que debe cumplir con una serie de requisitos de calidad.

La secuencia de operaciones se integra desde los métodos de manufactura, la planeación del proceso, ensamble, pruebas y aseguramiento de calidad. Actualmente, las empresas manufactureras que deseen competir deben enfocarse en el cumplimiento de las características de calidad en el producto, también llamado “Voz del cliente”. Los objetivos y responsabilidades que se deben cumplir en las áreas de manufactura se indican a continuación:

- Un producto debe cumplir con los requerimientos de diseño, especificaciones y estándares.

Citación: A Mares, “Optimización en manufactura mediante la experimentación y modelos de regresión logística”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 9 de enero de 2020. **Recibido con correcciones:** 13 de marzo de 2020. **Aceptado:** 13 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 A Mares. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

- Un producto debe realizarse de la forma más eficiente (económicamente), minimizando el uso de métodos complejos.
- La calidad debe integrarse en cada una de las etapas de manufactura del producto, desde el diseño hasta el ensamble, lo cual es preferible a tener fallas en las pruebas de calidad posteriores a la manufactura.
- Las actividades de manufactura deben cubrir varios requerimientos, ya que el producto debe ser manufacturado de la manera más económica posible y con el uso de métodos amigables con el medio ambiente.
- Deben implementarse nuevas estrategias sobre organización en manufactura, nuevos desarrollos de materiales, así como la implementación de métodos computacionales sobre producción e integración, los cuales deben ser evaluados de forma constante.
- Una organización manufacturera debe intentar alcanzar de forma consistente los más altos niveles de calidad y productividad (uso óptimo de recursos, materiales, máquinas, energía, capital, mano de obra y tecnología).

El diseño de experimentos es una técnica de estadística ampliamente utilizada para la mejora de los procesos a través de la obtención de los parámetros óptimos del proceso que generen una mejor calidad en el producto [1]. El muestreo por atributos del tipo pasa-no pasa es muy utilizado en manufactura para la clasificación del producto como conforme/no conforme. Autor [2] presentaron una propuesta de análisis para datos de tipo discreto en un proceso de manufactura de suela de poliuretano, en la cual se logró la reducción del porcentaje de defectos mediante la aplicación de un diseño experimental tipo Taguchi y la optimización de una medida de desempeño independiente de ajuste (PERMIA).

Para el modelado de la respuesta se ajusta un modelo de regresión de tipo lineal o cuadrático. El propósito de los modelos es el estudio de la relación entre k factores $X = (X_1, \dots, X_k)$ variables de control. Para el caso propuesto en éste artículo se utilizó un diseño central compuesto para modelos cuadráticos. Para el caso de dos factores y una respuesta se tiene:

$$\hat{y}_1 = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 X_1 + \hat{\beta}_2 X_2 + \hat{\beta}_{12} X_1 X_2 + \hat{\beta}_{11} X_1^2 + \hat{\beta}_{22} X_2^2 \quad (1)$$

El objetivo del esquema experimental es la reducción del porcentaje de defectos, o fracción disconforme

muestral, a partir de la obtención de la mejor combinación de los niveles para los parámetros de control en un proceso. El problema de minimización puede ser analizado desde un esquema de optimización lineal o no lineal restringida sujeta a restricciones del área experimental permitida por el proceso, por ejemplo:

$$\begin{aligned} & \text{Min } f(x) \\ & \text{s.a} \\ & x_i^{(\text{inf})} \leq x_i \leq x_i^{(\text{sup})} \\ & x_i \geq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde $f(x)$ se toma como el modelo estimado en (1), y las restricciones se definen en base al conocimiento del proceso. Un problema importante surge al analizar el modelo en (1), ya que se trata de un modelo de regresión ajustado que debe cumplir con los supuestos de independencia, normalidad y homoscedasticidad. Los supuestos no se cumplen en un modelo basado en proporciones, por lo cual se propone un análisis del modelo en el esquema de la regresión logística. El objetivo de éste artículo es la propuesta de tres esquemas de optimización aplicables al diseño experimental en manufactura. El caso de estudio trata sobre el proceso de fabricación de suela de hule y la reducción de defectos de tipo cualitativo que se detectan en la inspección del producto. La optimización se realiza mediante las técnicas de función de deseabilidad, Algoritmos Genéticos y Programación Cuadrática Secuencial.

2. Experimentación y Optimización

Las bases de la calidad mediante métodos estadísticos para la mejora y control de los procesos fueron definidas por autores como Shewhart, Fisher, Taguchi, entre otros. La ingeniería de calidad en el producto consiste en la aplicación de técnicas para la optimización de procesos en manufactura, a partir del diseño, la fabricación y el seguimiento del producto. La calidad ideal que un cliente puede esperar, es que el producto entregue el desempeño objetivo cada vez que éste sea utilizado para las operaciones destinadas a lo largo de su vida útil, sin efectos perjudiciales para el consumidor [4].

Dentro del tema de la calidad en el producto, el costo también es un factor importante. El problema de entregar un producto de calidad a bajo costo involucra a ingenieros, economistas, estadísticos y la gerencia. Se debe tomar en cuenta el costo de operación, el costo de manufactura, el costo de investigación y desarrollo del

producto. La competencia actual en el mercado indica que las empresas solamente pueden sobrevivir si reducen los costos sin descuidar la calidad. La reducción de precios sin el sacrificio de los beneficios no es posible sin la mejora y el aseguramiento de la calidad en los productos y procesos.

Es importante analizar los efectos de la Mano de obra, Materiales, Métodos, Máquinas, Medio ambiente y Mediciones sobre las características críticas de la calidad para poder garantizar la calidad en el producto, para esto se requiere realizar pruebas y generar datos que proporcionen evidencias objetivas que permitan responder a las interrogantes planeadas por el experimentador sobre algún problema relacionado a la calidad en los productos y procesos. El diseño de experimentos consiste en determinar qué pruebas deben desarrollarse y de qué manera, para resolver problemas o lograr mejoras en la calidad.

2.1 Proceso de fabricación de suela de hule

El proceso de fabricación de suela de hule (figura 1), es un proceso de manufactura que involucra una serie de procesos físicos y químicos. La parte inicial del proceso involucra el pesado y mezclado de materias primas, tales como la goma elastomérica cruda, rellenos base carbonato, silicatos, aceites, ácidos y químicos [5].

El mezclado de los materiales se realiza en un molino especial denominado “Bámbury”, que trabaja con temperaturas y cuchillas especiales, el mezclado se realiza en un tiempo específico hasta obtener una mezcla de los materiales en forma de pasta. Posteriormente, se agregan a la pasta los pigmentos de color y aceleradores, éste proceso se realiza en máquinas de rodillos giratorios a través de los cuales se ingresa la pasta para formar láminas de material. Las tiras son llevadas a un área de ventilación para bajar la temperatura del material y aquí se cortan con suajes que tienen una forma similar a la suela.

El siguiente proceso se considera el más importante: el vulcanizado de la suela, el cual se realiza en moldes que trabajan en base a 3 variables de control importantes: presión, tiempo y temperatura, con los cuáles se logra la forma final de la suela, que adquiere las propiedades características del producto. En ésta fase se realiza una inspección y selección por parte de los inspectores de calidad.

Los procesos finales se realizan en el área de preacabado, en los cuales se realiza un rebabeado de la

suela para retirar el material sobrante en los extremos de la suela. Se realiza también el cardado interno y externo para detallar el producto. El proceso final es un cepillado que mejora la vista de la suela. Aquí se realiza otra inspección de calidad antes de realizar el loteo final del producto.

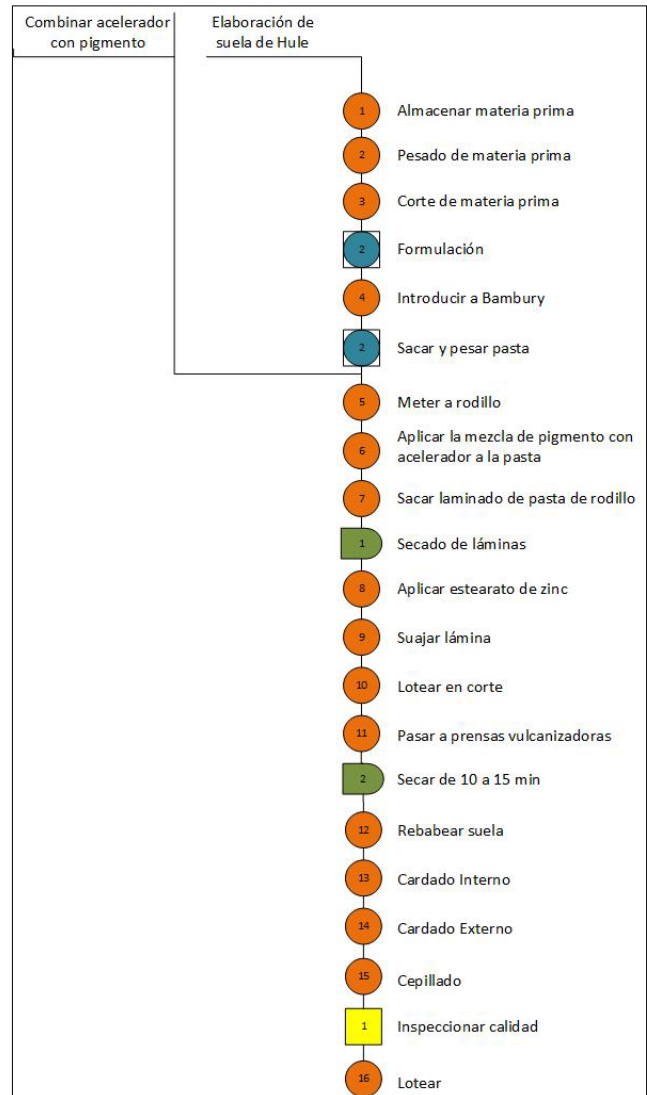


Figura 1. Proceso de manufactura de la suela de hule para calzado.

2.2 Diseño de Experimentos

El diseño de experimentos es una metodología que se utiliza para conocer, estudiar e investigar procesos y productos en la industria. En éste artículo se propone el uso del diseño central compuesto (DCC), el cual se aplica cuando se tienen tres o más factores. El diseño DCC satisface propiedades estadísticas como la ortogonalidad

y rotabilidad, lo cual lo hace un diseño eficiente en el análisis. Sus características pueden consultarse en [6-8].

El DCC (figura 2), consta de un diseño factorial con puntos centrales. Al diseño se le agregan puntos adicionales llamados axiales o estrella, los cuales permiten estimar curvatura.

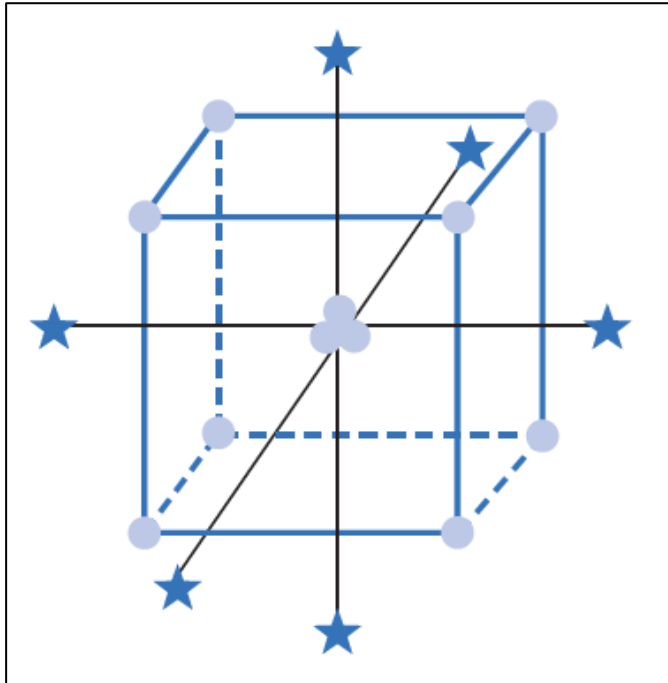


Figura 2. Representación de un DCC para 3 factores.

Con los resultados experimentales del diseño DCC se pueden ajustar modelos de regresión de segundo orden:

$$Y = \beta_0 + \mathbf{X}'\beta + \mathbf{X}'\mathbf{B}\mathbf{X} + \varepsilon \quad (3)$$

Donde $\mathbf{X}' = (x_1, \dots, x_k)$ k factores, β_0 la constante, $\beta_0 = (\beta_{11}, \dots, \beta_{kk})$ un vector de parámetros, $\mathbf{B} = (\beta_{11}, \dots, \beta_{1k}, \beta_{k1}, \dots, \beta_{kk})$ matriz simétrica de parámetros de segundo orden y $\varepsilon \sim N(0, \sigma^2)$. El análisis de los residuales en cada modelo permite verificar la falta de ajuste, así como otras características relevantes.

2.3 Modelos de Regresión Logística

El modelo (3) es un modelo de regresión ajustado que debe cumplir con los supuestos clásicos en los residuales. Cuando se trabaja con respuestas de tipo proporciones se conoce de antemano que no se cumplirán los supuestos debido a que se trata de una variable aleatoria de Bernoulli, para éste caso, se propone el uso de modelos

lineales generalizados [9], [10]. Para el caso de estudio en particular, se aplica el modelo de regresión logística, el cual tiene mejor aplicación cuando las respuestas experimentales siguen una distribución Binomial o de Bernoulli, como lo es el caso de análisis para la fracción disconforme muestral.

En un modelo de regresión logística se considera que la respuesta toma valores entre 0 y 1, suponiendo que el modelo es:

$$y_i = \mathbf{x}'\beta + \varepsilon_i \quad (4)$$

Donde $\mathbf{x}_i' = [1, x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{ik}]$, $\beta' = [\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k]$ y la variable de respuesta y_i toma valores entre 0 y 1. Se asume que la variable de respuesta y_i es una variable aleatoria de Bernoulli con distribución de probabilidad $P(y_i=1) = \pi_i$ si $y_i=1$ y $P(y_i=0) = 1 - \pi_i$ si $y_i=0$. El valor esperado de y_i es $E(y_i) = 1(\pi_i) + 0(1 - \pi_i) = \pi_i$, dado que $E(\varepsilon_i) = 0$. Así, de la ecuación (4) se tiene que $E(y_i) = \mathbf{x}_i' \beta = \pi_i$. desde esta descripción, la varianza de y_i se obtiene como ejemplo, $\sigma_{y_i}^2 = \pi_i (1 - \pi_i)$, con lo que se demuestra que la media y la varianza están relacionados. En resumen, el modelo de regresión logística está en la forma de la distribución de Bernoulli y la variable y_i es independiente en cada ensayo y valor esperado:

$$\pi = \frac{e^{(\beta_0 + \mathbf{x}'\beta + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x})}}{1 + e^{(\beta_0 + \mathbf{x}'\beta + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x})}} = \frac{1}{1 + e^{-(\beta_0 + \mathbf{x}'\beta + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x})}} \quad (5)$$

Los parámetros del modelo en (3) y (4) son estimados por el método de máxima verosimilitud. El modelo en (5) se reescribe como:

$$g(\pi) = \log\left(\frac{\pi}{1 - \pi}\right) = \beta_0 + \mathbf{x}'\beta + \mathbf{x}'\mathbf{B}\mathbf{x} \quad (6)$$

Así, la función de máxima verosimilitud se expresa como:

$$l(\pi; \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n y_i \log\left(\frac{\pi_i}{1 - \pi_i}\right) + m_i \log(1 - \pi_i) \quad (7)$$

2.4 La función de deseabilidad

La función de deseabilidad fue introducida por E.C. Harrington Jr [11] y fue modificada por George Derringer & Ronald Suich [12]. La deseabilidad

individual y la deseabilidad compuesta evalúan que tan bien una combinación de variables satisface los objetivos que se definieron para las respuestas. La deseabilidad individual evalúa la manera en la que la configuración optimiza una respuesta individual, mientras que la deseabilidad compuesta evalúa la manera en que la configuración optimiza un conjunto de respuestas en general. El rango de la deseabilidad es de 0 a 1, el valor de 1 indica la situación ideal mientras que 0 indica que una o más respuestas están fuera de los límites aceptables. La j -ésima respuesta se maximiza cuando el valor esperado $\hat{Y}_i(x)$ sea igual al valor objetivo definido M_i , por lo que el valor decrecerá conforme se aleje del valor objetivo. Definiendo V_i y V_s como los valores extremos del proceso, solamente se aceptarán soluciones dentro del rango $V_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq V_s$ y la función de deseabilidad d_i para cada una de las respuestas se define:

$$d_i(\hat{Y}_i(x)) = \begin{cases} \left[\frac{\hat{Y}_i(x) - V_i}{M_i - V_i} \right]^s & \text{si } V_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq M_i \\ \left[\frac{\hat{Y}_i(x) - V_s}{M_i - V_s} \right]^t & \text{si } M_i \leq \hat{Y}_i(x) \leq V_s \\ 0 & \text{si } \hat{Y}_i(x) < V_i \text{ ó } \hat{Y}_i(x) > V_s \end{cases} \quad (8)$$

La ecuación (8) es llamada la transformación a dos lados, la cual aplica cuando la variable de respuesta Y_i tiene restricciones tanto mínimas como máximas, las cuales representan los niveles inferior y superior respectivamente para los factores experimentales. Las deseabilidades individuales son combinadas utilizando una media geométrica:

$$D = (d_1 \times d_2 \times d_3)^{\frac{1}{k}} \quad (9)$$

El valor para D representa la asignación de la deseabilidad combinada de los niveles de respuesta y es evidente que el rango de D estará entre 0 y 1. Una de las propiedades de D es que si alguna de las $d_i=0$ es decir, que una de las respuestas es inaceptable entonces $D=0$ y por lo tanto el producto global será inaceptable y (9) se reduce a una media geométrica.

2.5 Algoritmos genéticos

Dentro de las técnicas metaheurísticas de búsqueda, los algoritmos genéticos son técnicas computacionales adaptativas ampliamente utilizadas en problemas de optimización. La principal ventaja de los algoritmos genéticos sobre técnicas de optimización numérica tradicionales, tales como la programación no lineal [13], radica en que los algoritmos genéticos tienen una mayor probabilidad de encontrar el óptimo global particularmente cuando se utilizan funciones altamente no lineales, discontinuas, no diferenciables o estocásticas. Las bases de los Algoritmos genéticos fueron establecidas por E. C. Holland [14] y han sido analizadas también por otros autores como D. E. Goldberg [15].

Los Algoritmos Genéticos pueden ser utilizados para resolver problemas de optimización restringida o no restringida. La base de la técnica es la imitación del proceso de selección natural que sucede en la evolución biológica, el algoritmo cambia repetidamente una población de soluciones individuales en un proceso iterativo que involucra técnicas de selección, reproducción, mutación, crossover y migración. En su forma matemática las poblaciones son arreglos matriciales, un individuo puede aparecer en más de un renglón de la matriz y los individuos van cambiando a medida que se producen las nuevas poblaciones llamadas generaciones.

La función de fitness es la función que se desea optimizar y equivale a la función objetivo de un esquema de optimización tradicional. El algoritmo comienza con la creación de una población inicial aleatoria, en cada iteración se crean secuencias de nuevas generaciones que van evolucionando de acuerdo a las condiciones de optimización declaradas en el problema. La creación de una nueva población se realiza a través de la evaluación en la función de fitness, la cual es llamada puntuación de aptitud. Las evaluaciones de aptitud son escaladas para convertirlas en un rango de valores más adecuados llamados valores esperados, aquí se seleccionan los mejores individuos con el mejor valor de fitness llamados elite y pasan a la nueva población.

Para mejorar las siguientes generaciones, se producen los hijos de la elite por medio de cambios aleatorios a un padre single (mutación) o mediante la combinación de entradas de una pareja de padres (crossover), la población es reemplazada con los hijos para formar la siguiente

generación. El algoritmo se detendrá cuando se cumple una condición de paro determinada por el analista.

2.6 Programación cuadrática secuencial

El algoritmo de programación cuadrática secuencial (PCS) es uno de los métodos más efectivos para la optimización no lineal restringida. Partiendo del problema de igualdad restringida:

$$\begin{aligned} \min f(x) \\ \text{sujeto a } c(x) = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Donde $c(x)$ es un conjunto de restricciones. La idea esencial del algoritmo PCS es modelar (10) en la iteración actual x_k por un subproblema de programación cuadrática basado en una aproximación cuadrática de la función Lagrangiana:

$$L(x, \lambda) = f(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot g_i(x) \quad (11)$$

Aquí se simplifica suponiendo que las restricciones se han expresado como restricciones de desigualdad. Para obtener el subproblema de Programación Cuadrática, se linealizan las restricciones no lineales. El subproblema de programación cuadrática se define:

$$\begin{aligned} \min_{d \in \mathbb{R}^n} \frac{1}{2} d^T H_k d + \nabla f(x_k)^T d \\ \nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) = 0, \quad i = 1, \dots, m_e \\ \nabla g_i(x_k)^T d + g_i(x_k) \leq 0, \quad i = m_e + 1, \dots, m_e \end{aligned} \quad (12)$$

El subproblema 12 puede ser resuelto por cualquier técnica de programación cuadrática, la solución se utiliza para una nueva iteración:

$$x_{k+1} = x_k + a_k d_k \quad (13)$$

y utilizar el minimizador de éste subproblema para definir una nueva iteración x_{k+1} . El reto es el diseño de un subproblema cuadrático que dé un buen paso para el problema de optimización restringida, y de ésta forma el algoritmo PCS presenta buena convergencia y buen desempeño práctico. El parámetro de longitud de paso a_k

se determina por un procedimiento de búsqueda para que se obtenga una disminución suficiente en una función de mérito.

La matriz H_k es una aproximación definida positiva de la matriz Hessiana de la función Lagrangiana (11), se puede actualizar con los métodos quasi-Newton, por ejemplo:

$$H_{k+1} = H_k + \frac{q_k q_k^T}{q_k^T s_k} - \frac{H_k s_k s_k^T H_k}{s_k^T H_k s_k} \quad (14)$$

Donde

$$s_k = x_{k+1} - x_k \quad (15)$$

Y

$$\begin{aligned} q_k = \left(\nabla f(x_{k+1}) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_{k+1}) \right) - \\ \left(\nabla f(x_k) + \sum_{i=1}^m \lambda_i \cdot \nabla g_i(x_k) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

Los detalles del algoritmo PCS pueden ser consultados en [16].

3. Metodología

La propuesta de análisis (Figura 3), consiste en el análisis del proceso de suela de hule. Para cada una de las corridas experimentales se revisó la producción de todo un día en un molde específico y se revisó la calidad del lote total por parte de los inspectores de calidad, quienes clasificaron las suelas como conformes/ no conformes de acuerdo a los criterios de calidad predefinidos.

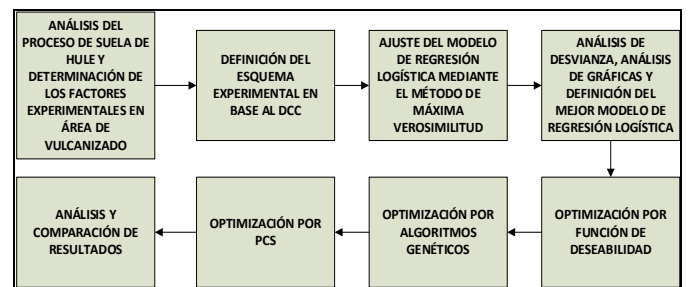


Figura 3. Metodología Propuesta.

El diseño experimental fue un DCC para tres factores con puntos estrella con 23 corridas experimentales. Se tomaron los tres factores de control en el proceso de vulcanizado de la suela (presión, temperatura y tiempo), que es el área en donde se genera la mayoría de los defectos de calidad. Los niveles del experimento (Tabla 1), fueron definidos por el personal de supervisión en base al conocimiento y experiencia del proceso.

Tabla 1. Factores experimentales y sus niveles

Nivel	Codificado	Temperatura	Presión	Tiempo
Axial	-1.68179	122.95°C	1331.82 psi	6.66 min
Bajo	-1	140°C	1400 psi	7.00 min
Medio	0	165°C	1500 psi	7.50 min
Alto	1	190°C	1600 psi	8.00 min
Axial	1.68179	207.05°C	1668.18 psi	8.34 min

La matriz experimental y los resultados para las corridas se muestran en la tabla 2. El cálculo de la fracción disconforme muestral se define como $p_i = x_i/n$, donde p es el porcentaje de defectuosos de la muestra bajo el criterio pasa/ no pasa, x son las suelas clasificadas como defectuosas y n es la producción total del día en el molde seleccionado.

Tabla 2. Matriz experimental y resultados para las corridas

No.	Temperatura (°C) X_1	Presión (psi) X_2	Tiempo (min) X_3	Y=Proporción Defectuosos (P_i)
1	0.0	0.0	0.0	0.05
2	-1.0	-1.0	1.0	0.052173913
3	1.0	-1.0	-1.0	0.120833333
4	0.0	0.0	0.0	0.040909091
5	0.0	0.0	0.0	0.057894737
6	-1.0	1.0	-1.0	0.046666667
7	0.0	0.0	1.68179	0.084
8	-1.0	-1.0	-1.0	0.054761905
9	0.0	0.0	0.0	0.058333333
10	0.0	0.0	-1.68179	0.083870968
11	0.0	0.0	0.0	0.038095238
12	1.0	1.0	1.0	0.033333333
13	1.68179	0.0	0.0	0.08
14	1.0	-1.0	1.0	0.005555556
15	-1.68179	0.0	0.0	0.074193548
16	-1.0	1.0	1.0	0.045833333
17	0.0	0.0	0.0	0.042857143
18	0.0	1.68179	0.0	0.07037037
19	0.0	0.0	0.0	0.030434783
20	0.0	0.0	0.0	0.061538462

21	0.0	0.0	0.0	0.042105263
22	0.0	-1.68179	0.0	0.042857143
23	1.0	1.0	-1.0	0.06

Una vez obtenidos los datos experimentales, se procede a realizar el análisis en el esquema de la regresión logística, como se puede observar, los valores de la respuesta están entre 0 y 1.

4. Resultados

4.1 Análisis de desviación y modelo de regresión logística

En la tabla 3 se muestra el análisis de desviación para el modelo de regresión logística, el R^2 para el modelo completo es de 48.59%, el R^2 adj es 30.75%. El valor P para la desviación es de 0.035, al ser menor a $\alpha = 0.05$ se indica que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95%.

Tabla 3. Análisis de desviación

Fuente	DF	Desv. Ajustada	Medias Ajustadas	Chi-Cuadrada	P-Valor
Regresión	9	24.5223	2.72470	24.52	0.004
X_1	1	0.1233	0.12332	0.12	0.725
X_2	1	0.1338	0.13379	0.13	0.715
X_3	1	3.4347	3.43471	3.43	0.064
X_1^2	1	2.1165	2.11649	2.12	0.146
$X_1 * X_2$	1	0.0008	0.00082	0.00	0.977
$X_1 * X_3$	1	6.3555	6.35551	6.36	0.012
X_2^2	1	0.0860	0.08598	0.09	0.769
$X_2 * X_3$	1	4.0049	4.00492	4.00	0.045
X_3^2	1	4.4794	4.47939	4.48	0.034
Error	13	25.9493	1.99610		
Total	22	50.4716			

Los estadísticos del modelo completo indican que se puede obtener un mejor modelo al eliminar términos que no son significativos, como se observa en la tabla 3, algunos términos muestran P valores mayores a $\alpha = 0.05$, se aplica la selección de términos hacia atrás con la finalidad de mantener en el modelo los términos más significativos mientras que mejore el Valor P del modelo, los resultados se muestran en la tabla 4:

Tabla 4. Análisis de desviación para el mejor modelo

Fuente	DF	Desv. Ajustada	Medias Ajustadas	Chi-Cuadrada	P-Valor
Regression	5	24.182	4.836	24.18	0.000

X_3	1	3.906	3.906	3.91	0.048
X_1^2	1	2.000	2.000	2.00	0.157
$X_1 \cdot X_3$	1	8.131	8.131	8.13	0.004
$X_2 \cdot X_3$	1	4.228	4.228	4.23	0.040
X_3^2	1	4.582	4.582	4.58	0.032
Error	17	26.290	1.546		
Total	22	50.472			

El análisis de desviación para el modelo reducido muestra un valor $P = 0.0002$, que indica que el modelo con ajuste significativamente mejor que el modelo completo, el valor de R^2 para el modelo reducido es de 47.91%, el R^2 adj es 38%, el cual aumentó con relación al del primer modelo, lo cual indica que fue conveniente la eliminación de los elementos mediante el algoritmo de selección del paso hacia atrás.

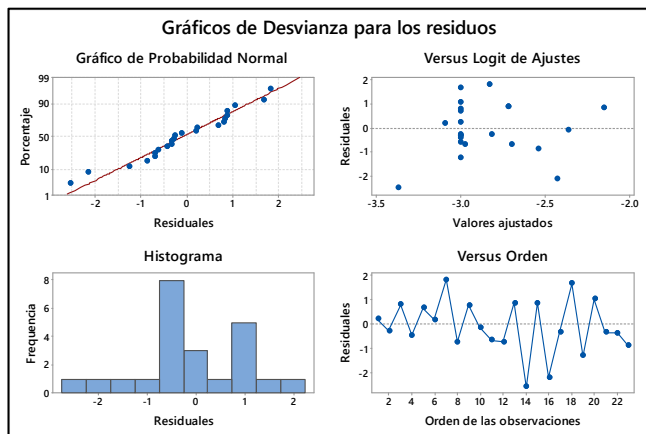


Figura 3. Análisis para los residuos en el modelo.

El análisis para los residuos en el modelo indica un buen comportamiento en cuanto a normalidad en los datos, la independencia y varianza constante muestran un comportamiento aleatorio, sin ciclicidad aparente, tendencias marcadas ni formas de embudo, por lo que se considera que se cumplen adecuadamente. Los términos X_1 y X_2 están presentes en interacciones seleccionadas por el algoritmo stepwise, con el fin de mantener un modelo jerárquico y debido a que dichos términos son necesarios en la optimización se regresan al modelo, quedando el valor $P = 0.0022$, el valor de R^2 para el modelo reducido es de 48.42%, el R^2 adj es 34.55%, quedando el modelo:

$$\hat{Y} = \frac{e^{(-3.0064 + 0.0277 X_1 + 0.0289 X_2 - 0.1351 X_3 + 0.1077 X_1^2 - 0.260 X_1 X_3 + 0.2087 X_2 X_3 + 0.1447 X_3^2)}}{1 + e^{(-3.0067 - 0.1386 X_3 + 0.1018 X_1^2 - 0.2752 X_1 X_3 + 0.1966 X_2 X_3 + 0.1437 X_3^2)}} \quad (17)$$

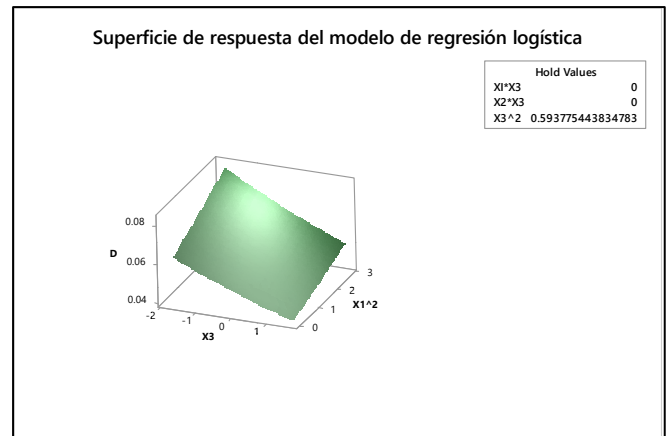


Figura 4. Superficie de respuesta del modelo de regresión logística.

En la figura 4 se muestra una vista de la superficie de respuesta para el modelo (17) para una de las parejas de elementos presente, se detecta curvatura por el efecto de los términos cuadráticos en el modelo, así como el efecto del ajuste al modelo logit.

4.2 Optimización por función de deseabilidad

Para la aplicación del esquema de optimización se busca la minimización de la respuesta fracción disconforme muestral, las restricciones se reducen al área experimental definida por los niveles codificados -1 a 1, que según la experiencia de los supervisores es la mejor región de operación para los valores reales de la temperatura, presión y tiempo definidos previamente en la tabla 1.

El esquema de optimización para la fracción disconforme muestral queda:

$$\begin{aligned} & \text{Min } \hat{Y} \\ & \text{s.a} \\ & -1 \leq X_1 \leq 1 \\ & -1 \leq X_2 \leq 1 \\ & -1 \leq X_3 \leq 1 \end{aligned} \quad (18)$$

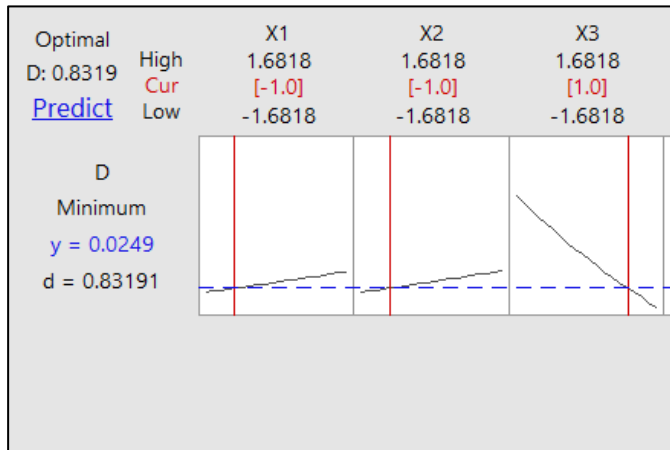


Figura 5. Gráfico de optimización por función de deseabilidad.

Tabla 5. Solución optimización por función de deseabilidad

Sol	X ₁	X ₂	X ₃	Probabilidad ajustada	Deseabilidad Compuesta
1	-1	-1	1	0.0249331	0.831909

Se observa en los resultados de la tabla 5 y figura 5 la convergencia en los niveles bajos para la temperatura y presión, lo cual significa la necesidad de trabajar la vulcanización de la suela en 140°C y 1400 psi respectivamente, mientras que el tiempo ideal de proceso se indica en nivel alto -8 minutos-.

4.3 Optimización por Algoritmos Genéticos

Para la optimización por algoritmos genéticos se toma el mismo esquema de optimización que en (18), la función de fitness a minimizar es la función en (17) y los límites del proceso son los mismos que los utilizados en la función de deseabilidad. Los parámetros de inicio para la corrida del algoritmo se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Parámetros de inicio para el algoritmo

Parámetro	Valor
Conteo de la élite	2.5
Tamaño inicial de la Población	50
Fracción crossover	0.8
Fracción de la migración	0.2
Intervalo de migración	20
Límite de generaciones	300
Tiempo límite	No
Tolerancia de la función	1x10 ⁻⁶
Tolerancia de la restricción	1x10 ⁻³

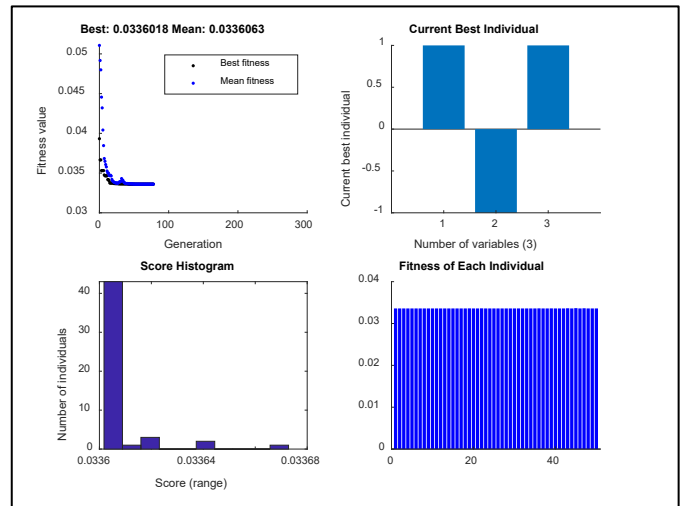


Figura 6. Gráfico de optimización por Algoritmos Genéticos.

Tabla 6. Solución por Algoritmos Genéticos

Sol	X ₁	X ₂	X ₃	Valor de la función objetivo (mejor fitness)
1	1	-1	1	0.033606

La solución para el algoritmo genético se puede observar en la figura 6 y tabla 6. El valor de la función de fitness quedó en 0.033606, los niveles óptimos para Temperatura y Tiempo fueron en nivel alto, 190°C y 8 minutos respectivamente, mientras que la presión se debe manejar en nivel bajo, 1400 psi. La convergencia del algoritmo se da en la generación 78. Se realizaron 30 corridas para verificar la convergencia del resultado, obteniéndose los mismos valores.

4.4 Optimización por Algoritmo PCS

El algoritmo PCS también se maneja dentro del esquema de optimización en (18), la función a minimizar es la misma que en 17 y el área experimental está definida por los límites de operación del proceso. La solución del algoritmo se muestra en la figura 7 y tabla 7.

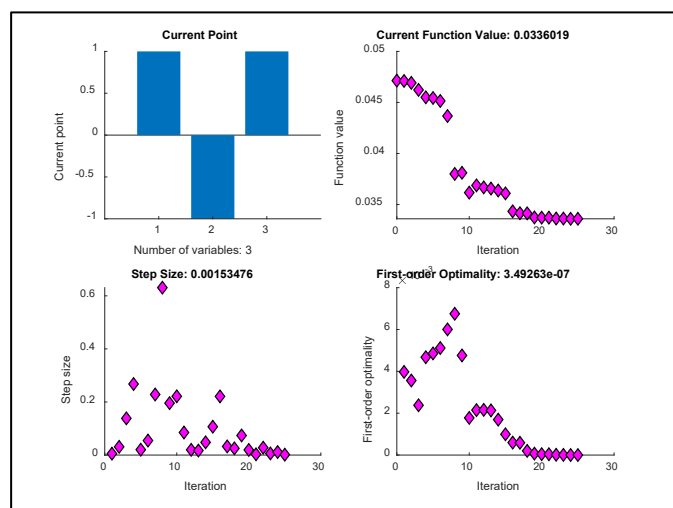


Figura 7. Gráfico de optimización por Algoritmo PCS.

Tabla 7. Solución por Algoritmo PCS

Sol	X ₁	X ₂	X ₃	Valor de la función objetivo (mejor fitness)
1	1	-1	1	0.033606

La convergencia del Algoritmo se da en la iteración 25, las soluciones son las mismas que con los Algoritmos Genéticos, así como el valor de la función = 0.033606. los niveles óptimos para Temperatura y Tiempo fueron en nivel alto, 190°C y 8 minutos respectivamente, mientras que la presión se debe manejar en nivel bajo, 1400 psi.

4.5 Comparativo de los métodos de optimización

Tabla 8. Comparativo de las soluciones por los 3 métodos

Factor	FD	AG	PCS	Comentarios
X ₁	-1	1	1	La función de deseabilidad presenta un valor extremo diferente
X ₂	-1	-1	-1	Los tres métodos obtienen el mismo resultado
X ₃	1	1	1	Los tres métodos obtienen el mismo resultado
Temp	140°C	190°C	190°C	La función de deseabilidad indica una solución trabajando con la

				temperatura en nivel bajo.
Presión	1400 psi	1400 psi	1400 psi	Los tres métodos indican trabajar la presión de los moldes en nivel bajo
Tiempo	8 min	8 min	8 min	Los tres métodos indican trabajar el tiempo en nivel alto a 8 minutos en los moldes para la vulcanización
Valor función	0.0524	0.0336	0.0336	El algoritmo genético y el PCS generan una mejor solución que la función de deseabilidad al reducir la fracción disconforme muestral hasta 0.0336.

La referencia de la fracción disconforme muestral del proceso para el modelo de suela analizado era de 9% aproximadamente, el resultado obtenido por Algoritmos genéticos y por PCS presentaron una reducción de la fracción disconforme muestral por arriba del 5%, con el fin de verificar los resultados se realizaron 10 corridas de verificación con los niveles óptimos obtenidos por Algoritmos genéticos y por PCS. Los estadísticos se muestran en la tabla 9.

Tabla 9. Intervalos de confianza para las corridas de verificación

	Media	Desv. estandar	Inferior	Superior
Intervalo para la media			0.0249221	0.0421189
Intervalo para la desviación estándar	0.0335205	0.0120197	0.0082676	0.0219434

Se observa que, en las corridas de verificación, los intervalos de confianza contienen al valor óptimo obtenido por los algoritmos.

5. Conclusiones y discusión

En el caso de estudio presentado en este artículo se presentó una comparación de la eficiencia de tres

métodos de optimización aplicables a la experimentación dentro de los procesos de manufactura, adicionalmente se propuso el uso de la regresión logística como opción para el modelado de respuestas del tipo fracción disconforme muestral.

Los tres esquemas de optimización se pueden trabajar dentro de la optimización restringida y son compatibles para los problemas que se presentan dentro de la experimentación industrial. El algoritmo genético se perfila como la mejor opción de análisis cuando se tienen respuestas altamente no lineales, debido a que se tiene una mayor probabilidad de encontrar el óptimo global. El algoritmo PCS obtuvo la misma solución que el algoritmo genético, pero se puede presentar el problema de convergencia en óptimos locales, con lo cual se puede llegar a conclusiones apresuradas sobre la mejora del proceso.

El método de la función de deseabilidad presenta una mejor aplicabilidad cuando se analizan esquemas de multirespuestas en el experimento, con la finalidad de obtener soluciones de compromiso para problemas de tipo multiobjetivo, también se tiene la posibilidad de ponderar la importancia de cada una de éstas respuestas con la finalidad de generar una solución que cumpla mejor con los objetivos de la optimización.

Las corridas de verificación con los niveles óptimos obtenidos presentaron buenos resultados. Es recomendable la aplicación del diseño experimental en los procesos de manufactura con la finalidad de lograr los objetivos de calidad en el producto final, siendo una herramienta poderosa que no representa una inversión alta para su aplicación y por el contrario, se puede obtener buena utilidad por la mejora de la calidad.

La optimización de procesos dentro del esquema experimental es un área que requiere investigación, la presente propuesta se puede expandir a otros casos multirespuesta y dentro del diseño robusto de parámetros.

REFERENCIAS

- [1] Box, G. E. P., Hunter, J. S., & Hunter, W. G. (2005). *Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery*, 2nd Edition. Book. <https://doi.org/10.1080/00401706.1979.10489788>
- [2] Autor. (2015).
- [3] Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction to linear regression analysis. Introduction to Linear Regression Analysis* (5th ed.). Wiley.
- [4] Phadke, M. S., & Shridhar, M. (1989). *Quality engineering using robust design*. Prentice Hall.
- [5] Ciesielski, A. (1999). *Castable Polyurethanes. An Introduction to Rubber Technology*.
- [6] Draper, N. R. (1982). Center Points in Second-Order Response Surface Designs. *Technometrics*, 24(2), 127. <https://doi.org/10.2307/1268490>
- [7] Box, G. E. P., & Draper, N. R. (1987). *Empirical model-building and response surfaces*. Wiley.
- [8] Khuri, A. I., Cornell, J. A., & Cornell, J. A. (2018). *Response Surfaces: Designs and Analyses*. Routledge. <https://doi.org/10.1201/9780203740774>
- [9] McCullagh, P. (Peter), & Nelder, J. A. (1989). *Generalized linear models*. Chapman and Hall.
- [10] Hamada, M., & Nelder, J. A. (1997). Generalized Linear Models for Quality-Improvement Experiments. *Journal of Quality Technology*, 29(3), 292–304. <https://doi.org/10.1080/00224065.1997.11979770>
- [11] Harrington, E. C. (1965). The desirability function. *Industrial Quality Control*.
- [12] Derringer, G., & Suich, R. (1980). Simultaneous Optimization of Several Response Variables. *Journal of Quality Technology*, 12(4), 214-219. <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>
- [13] Nocedal, J., & Wright, S. J. (2006). *Numerical optimization*. Springer.
- [14] Holland, J. H. (1984). Genetic Algorithms and Adaptation. In *Adaptive Control of Ill-Defined Systems*. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-8941-5_21
- [15] Goldberg, D. E. (David E., & E., D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning*. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Retrieved from <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=534133>
- [16] Fletcher, R. (2000). *Practical Methods of Optimization*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118723203>

Cálculo de la correlación entre la complejidad de proyectos, medida por su red de nodos y arcos, y su desempeño, medido utilizando el método de valor ganado

Correlation calculation between project complexity, measured by their arcs and nodes network, and project performance, measured using the earned value method

Hector J. Polo A.¹, Yarissa M. Palma²

¹ Dirección de Postgrado, Ingeniería de Proyectos, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

² Dirección de Gestión y Transferencia del Conocimiento, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: hjpoloa@gmail.com

RESUMEN— Se plantea la utilidad en la medición de la complejidad de un proyecto, y se realiza el análisis comparativo entre la complejidad de proyectos medida utilizando los cronogramas de obra y el desempeño de estos. Se explica la utilización de los nodos y arcos del cronograma de obra de un proyecto para evaluar su complejidad, adoptando la metodología y formulas propuestas por varios proponentes, produciendo sus respectivos índices de complejidad. A su vez se explica el sistema del valor ganado para medir el desempeño de un proyecto (índice de desempeño) y finalmente se realiza su comparación utilizando el coeficiente de correlación de Pearson.

Palabras clave— Complejidad de proyectos, valor ganado, índice de complejidad, índice de desempeño del cronograma.

ABSTRACT— The usefulness of measuring project complexity is raised, and a comparative analysis between a project's complexity, measured using the project schedules, vs a project's performance is provided. The use of nodes and arcs of the work schedule of a project to assess its complexity is explained, adopting the methodology and formulas proposed by several researchers, producing their respective complexity indexes. In turn, earned value method to measure the performance of a project (performance index) is explained and finally its comparison is made using the Pearson correlation coefficient.

Keywords - Project complexity, earned value, complexity index, schedule performance index.

1. Introducción

La definición de lo que es la complejidad de un proyecto aún no se logra consensuar [1-2]. Hay quienes lo definen como uno o una combinación de factores que afectan el resultado de un proyecto [3-2]. También lo definen como características de la complejidad misma [4]. Mientras que otros lo definen a través de un modelado de estos factores o aspectos [1] o basado en modelos de planificación (cronogramas) [2], [5].

2. Visión Holística

La complejidad de proyectos ha sido observada de manera holística en la mayor parte de la literatura disponible sobre la gestión de proyectos [1-4], [6], [11-

18]. En esta manera holística/cualitativa de ver la complejidad de proyectos es preciso sopesar o ponderar los factores cualitativos para tratar de cuantificar elementos que, de otra manera, serían muy difíciles de medir [2]. En estos casos, el investigador se ve en la difícil tarea de proponer un método estadístico que refleje el consenso y el aval de opiniones de varios profesionales [2], [6].

Dentro de estos elementos o factores se encuentran temas como: el análisis del cliente, estructura organizacional (roles, canales de comunicación, comunicación regular, la experiencia del equipo, la calidad de la toma de decisiones), resultado de arbitrajes, expectativas de los accionistas o involucrados, el tamaño del proyecto, las interdependencias del proyecto con el

Citación: H. Polo y Y. Palma, "Cálculo de la correlación entre la complejidad de proyectos, medida por su red de nodos y arcos, y su desempeño, medido utilizando el método de valor ganado", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 16, no. 2, pp. (no modificar), 2020.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 21 de febrero de 2020. **Recibido con correcciones:** 19 de marzo de 2020. **Aceptado:** 13 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2020 H. Polo y Y. Palma. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

ambiente, la interdependencia de los departamentos, la interdependencia de los sistemas de información, el contexto cultural, y la complejidad tecnológica, entre otras [2], [3]

El resultado de estos acercamientos son los diferentes métodos propuestos como lo son el método analítico por jerarquía [2] y la utilización del método Delphi [4]. Otros acercamientos se limitan al modelado como una herramienta de análisis dentro de los procesos administrativos [3], o proponen una cuantificación de procesos meta-proyectuales (más allá del análisis de un solo proyecto) [2], [6].

3. Visión de Modelado de Cronogramas

Una cantidad muy pequeña de la literatura relacionada con esta temática se centra en la obtención de un método de medición de la complejidad de proyectos [5], [7], [10], [19] basándose en modelos de los proyectos con información “concreta”. Estos métodos se basan generalmente en la teoría de grafos aplicada, y participan la mayoría de las veces los nodos, arcos, métodos gráficos de simplificación y, algunos de ellos, una combinación de lo anterior. Algunos métodos incluyen recursos, duraciones de las actividades y otros elementos que no son información de fácil acceso en todos los proyectos, y por ende de estos no se puede realizar una generalización aplicable [5].

La discusión que produce este método resulta en dos formas de definición de complejidad. Nassar y Hegab (2010) definen su método como la medición de la complejidad del cronograma del proyecto [7], o sea la medición de complejidad de un aspecto del total de la complejidad de un proyecto, mientras que Vidal et al. (2011) definen este método como mediciones del modelo de la estructura del proyecto representada como un grafo [2], [8]. Ninguno percibe este acercamiento como algo que logre definir la complejidad de un proyecto en su totalidad.

Aquí es donde la definición de un proyecto y de complejidad deben ayudar a definir justamente el alcance de esta métodos y mediciones. Al no haber un consenso de este, se presente la siguiente síntesis para obtener una definición base de esta investigación:

1. Un proyecto se define, según el PMBOK, como el esfuerzo que se lleva a cabo para crear un producto, servicio o resultado único, y tiene la característica de ser

temporal. No es ni el producto, servicio o resultado único por lo cual se hacen estos esfuerzos [9].

2. “Un sistema es un objeto, que, en un ambiente dado, intenta alcanzar un objetivo (aspecto teleológico) al realizar una actividad (aspecto funcional) mientras su estructura interna (aspecto ontológico) evoluciona con el tiempo (aspecto genético) sin perder su identidad” [2].

3. Y que “la complejidad de un proyecto es la propiedad de un proyecto que hace difícil comprender, prever y mantener en control su comportamiento general, aun cuando se haya dado información razonablemente completa sobre el sistema del proyecto” [2].

Tomando en cuenta estos 3 conceptos, se aprecia la utilidad del modelado de un cronograma de obra que abarca los siguientes elementos:

1. Se establece la estructura del proyecto (aspecto ontológico)
2. Se establece el objetivo final, incluso objetivos parciales (aspecto teleológico)
3. Se modela los esfuerzos por medio de actividades (aspecto funcional)
4. Se modela su evolución con el tiempo (aspecto genético)
5. Sus elementos están interrelacionados para tener secuencia, unidad, e identidad.
6. Contiene, si está bien realizado, la principal y mayor cantidad de información necesaria para poder administrar un proyecto.

De lo anterior, se considera que medir la complejidad de un cronograma es lo más cercano a medir, por definición, la complejidad de un proyecto.

Otros elementos externos serían meta-proyectuales o multi-proyectuales (más de un proyecto), y aunque son útiles, no serán fundamento de esta investigación.

4. La necesidad de la comparación con el desempeño de los proyectos

Una comparación entre la medición de la complejidad del cronograma, pero basándose en la morfología del proyecto vs el desempeño y/o la probabilidad de que un proyecto se atrasase fue propuesto por Nassar [7], incluso en términos predictivos. Sin embargo, a la fecha no se ha realizado este estudio. Esta investigación no usa la morfología como base, si no su estructura relacional para compararlo con el desempeño del proyecto.

En este caso, se piensa utilizar, como variable de comparación, los índices resultantes del análisis de valor

ganado, definido como el coeficiente entre el valor esperado (planificado) de un proyecto en un momento en el tiempo, y su valor ganado real (valor real/valor planificado) [9]. El método del valor ganado de los proyectos es una metodología ampliamente utilizada por la administración de proyectos y sugerida por el Instituto de Administración de Proyectos (PMI) [9]. El índice del desempeño del proyecto, o SPI por sus siglas en inglés es el que será utilizado en este comparativo.

Sin embargo, como nota aclaratoria, para tener un comparativo que haga una correlación entre los índices de complejidad desarrollados y el desempeño de los proyectos, hay que tomar en cuenta lo difícil, con la documentación actual, que es evaluar si la complejidad definida en estos métodos realmente describe la complejidad total de un proyecto, aun si fueran estos métodos preferibles en esta investigación. El determinar la complejidad de un proyecto como un factor determinante en la ejecución de un proyecto no se pone en duda. Sin embargo, la literatura actual se dedica a encontrar un método utilizable basado en los cronogramas mas no hace la comparación de estos métodos o índices propuestos con el desempeño de proyectos para así tener una estadística que permita observar esta relación. Es posible que el resultado de este estudio al final resulte en que ambas variables no tengan correlación alguna.

5. Metodología

Como primer ejercicio de la investigación, se logró procesar 9 cronogramas de obra de una empresa estatal, con su respectiva información de costo para lograr obtener las variables requeridas en el análisis. Los nombres de los proyectos se han reemplazado por una nomenclatura secuencial para proteger la confidencialidad de estos. Esta información se puede apreciar en las tablas 1 y 2.

Tabla 1. Datos de Campo - Cronogramas de Obra – Parte 1

ID del Proyecto	Inicio de Línea Base	Final de Línea Base	Fecha Final Planificada	Fecha de Corte
60001	1-Nov-11	30-Nov-12	10-Jun-13	Nov-12
60002	4-Aug-11	4-Oct-12	17-Oct-12	Oct-12
60003	31-May-11	11-Sep-12	15-Oct-12	Sep-12
60004	1-Jul-11	30-Apr-13	8-Aug-13	Apr-13
60005	3-Oct-11	17-Aug-12	29-Nov-12	Aug-12
60006	4-May-09	31-Jul-12	5-Sep-12	Jul-12

60007	1-Nov-11	12-Nov-12	16-Aug-13	Nov-12
60009	24-Oct-11	26-Oct-12	28-Nov-12	Nov-12
60013	1-Nov-11	14-Dec-12	16-Dec-13	1-Dec-12

Tabla 2. Datos de Campo - Cronogramas de Obra - Parte 2

Valor a Completar de la LB	Valor Actual a la fecha Final del BL	Valor a Completar Actual	% del Costo Total
527,185.00	405,805.00	535,420.74	75.79%
771,199.92	705,146.50	739,170.57	95.40%
3,297,066.31	325,226.31	3,311,327.36	9.82%
484,455.00	280,958.16	298,355.40	94.17%
381,000.00	285,047.97	285,047.97	100.00%
494,663.40	420,824.69	420,824.69	100.00%
658,224.50	525,306.62	716,820.60	73.28%
\$1,551,528.00	1,500,488.00	1,592,471.00	94.22%
\$526,460.00	375,542.00	454,087.00	82.70%

Luego se obtuvieron las variables SPI y los Ci (índices de complejidad del proyecto) utilizando la fórmula de Pascoe [5] y la de Nassar y Hegab[5], que se pueden apreciar en las fórmulas 1 y 2 presentadas a continuación:

La fórmula de medición de complejidad de un proyecto por Pascoe es la siguiente:

$$C_i = a/n \quad (1)$$

Donde:

Ci = índice de complejidad

a = número de arcos del cronograma

n = número de nodos del cronograma

La desarrollada por Nassar y Hegab es:

$$C_n = \begin{cases} \left\{ \frac{\log\left[\frac{a}{n^2-1}\right]}{\log\left[\frac{n^2-1}{4(n-1)}\right]} \right\} \% \text{ si } n \text{ es impar} \\ \left\{ \frac{\log\left[\frac{a}{n^2}\right]}{\log\left[\frac{n^2}{4(n-1)}\right]} \right\} \% \text{ si } n \text{ es par} \end{cases} \quad (2)$$

Donde:

Cn = Ci = índice de complejidad

a = número de arcos del cronograma

n = número de nodos del cronograma

Tabla 3. Variables - SPI, Ci Pascoe, Ci NH

	SPI	Ci Pascoe	Ci NH
ID del Proyecto	% del costo actual	Índice de Complejidad 1 - Pascoe 1966	Índice de Complejidad 2, Nassar, Hegab, 2006
60001	75.79%	1.09	3.34%
60002	95.40%	1.1	6.86%
60003	9.82%	1.33	20.03%
60004	94.17%	1.2	10.26%
60005	100.00%	1.17	8.64%
60006	100%	0.91	0.00%
60007	73.28%	1.13	14.01%
60009	94.22%	1.08	12.30%
60013	82.70%	1.08	14.09%

La tabla 3 muestra los resultados obtenidos luego de la aplicación de la fórmula No. 1 de Pascoe y la fórmula No. 2 de Nassar y Hegab.

Luego se procedió a realizar el análisis de correlación de Pearson utilizando la siguiente fórmula 3, y aplicándola solo a los resultados obtenidos utilizando la fórmula 1 de Pascoe.

$$r = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[N \sum x^2 - (\sum x)^2][N \sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad (3)$$

Donde:

- N = número de pares de datos
- $\sum xy$ = sum de los productos de los datos pareados
- $\sum x$ = suma de los datos de x
- $\sum y$ = suma de los datos de y
- $\sum x^2$ = suma de las raíces de los datos x
- $\sum y^2$ = suma de las raíces de los datos y

Tabla 4. Variables de Correlación de Pearson - Ci Pascoe vs SPI

ID del Proyecto	SPI	Ci Pascoe	Pearson de Pascoe (método Manual)		
			b-promedio (b)	a X b	b^2
60001	75.79%	1.09	-0.03	0.0015538	0.10%
60002	95.40%	1.1	-0.02	-0.0035529	0.06%
60003	9.82%	1.33	0.2	-0.1449780	4.20%
60004	94.17%	1.2	0.08	0.0112582	0.69%
60005	100.00%	1.17	0.05	0.0090224	0.22%
60006	100%	0.91	-0.21	-0.0409506	4.46%
60007	73.28%	1.13	0.01	-0.0009636	0.02%
60009	94.22%	1.08	-0.04	-0.0058915	0.19%
60013	82.70%	1.08	-0.04	-0.0007749	0.14%
promedio	80.60%	1.12	suma	-0.1752769	10.0575837%

La tabla 4 muestra las variables que fueron aplicadas a la fórmula no. 3 para obtener finalmente el resultado de la correlación de Pearson aplicada al índice de complejidad de Pascoe (fórmula 1).

6. Resultados

El resultado de la correlación dio **-0.689132888** dando una clara, con los pocos datos actuales, una correlación negativa que quiere decir que mientras más complejo el proyecto, menor el desempeño. Luego de hacer este ejercicio “manual” para obtener esta correlación utilizando Microsoft Excel, se procedió a comparar el resultado con el obtenido al utilizar la función de correlación de la aplicación. El resultado fue idéntico: **-0.689132888**.

Debido a que el resultado da igual, probando que ambos métodos, “manual” vs “función de la aplicación”, dan lo mismo, se procedió a obtener el resultado de la correlación utilizando la fórmula de Nassar y Hegab. El resultado fue muy similar con una correlación negativa de: **-0.675758918**

7. Conclusiones

Dado que, utilizando ambas fórmulas de Ci, la de Pascoe y la de Nassar/Hegab, dan resultados similares, podríamos concluir preliminarmente hasta que se consiga más información de campo, que efectivamente existe una correlación negativa entre la complejidad de un proyecto y su desempeño, o sea, a mayor complejidad, menor desempeño.

También podríamos concluir que ambos métodos para obtener el Ci de un proyecto por el momento son viables, siendo la de Pascoe una fórmula muy sencilla e intuitiva de comprender, mientras que por contraste la de Nassar y Hegab, siendo un poco más compleja, igual nos da resultados confiables. También es importante resaltar que la fórmula de Nassar y Hegab atienden problemas de redundancia [10] de las relaciones en los cronogramas de obra, mientras que la de Pascoe no lo hace.

REFERENCIAS

- [1] Vidal, Ludovic-Alexandre, Marle, Franck, Bocquet, Jean-Claude. “Modelling Project Complexity,” ICED’07/515, 2007.
- [2] Vidal, Ludovic-Alexandre, Marle, Franck, Bocquet, Jean-Claude. “Measuring Project Complexity using the Analytic Hierarchy Process,” International Journal of Project Management 29 pp.718–727, 2011

- [3] Wood, Hannah Louise, Ashton, Philip. "Modelling Project Complexity," Procs 26th Annual ARCOM Conference, pp.1111-1120, September 2010
- [4] Xia, Bo & Chan, Albert. "Measuring Complexity for Building Projects—A Delphi Study," Engineering, Construction and Architectural Management Vol. 19 No. 1, pp. 7-24, 2012
- [5] Nassar, Khaled M., Hegab, Mohamed Y. "Developing a Complexity Measure for Project Schedules," Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 132, No. 6, June 2006.
- [6] Akilesawaran, V, Hazez, G.B., Morin, T.L. "Complexity of the Project Sequencing Problem," Operations Research · August 1983
- [7] Nassar, Khaled. "Schedule Network complexity vs Project complexity," Proceedings of the International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (2010).
- [8] Trudeau, Richard J. *Introduction to Graph Theory*. Dover Publications Inc., New York, 1993 2ed.
- [9] *Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, Project Management Institute. Newtown Square, Pa., 2008, 4th Ed.
- [10] Bashir, H. A. "Removal of Redundant Relationships in an AON Project Network for Evaluating Schedule Complexity," Journal of Construction Engineering and Management © ASCE pp.787 -793, July 2010.
- [11] Weaver, Patrick. "Scheduling in the Age of Complexity," PMI COS Proceeding, 2009.
- [12] Wood, Hannah Louise, Ashton, Philip. "The Factors of Project Complexity," 18th CIB World Building Congress. Salford, UK., 2010
- [13] Castejón-Limas, Manuel, Ordieres-Meré, Joaquín, González-Marcos, Ana, González-Castro, Víctor. "Effort estimates through project complexity," Springer Science+Business Media, LLC [Online]. Available: www.researchgate.net/publication/220461783_Effort_estimates_through_project_complexity [Jul. 16, 2010].
- [14] Henriksen, JO "Taming the Complexity Dragon," Winter Simulation Conference – Titans of Simulation, 2006.
- [15] Svetlana Cicmil, Terry Cooke-Davies, Lynn Crawford, and Kurt Richardson. *Exploring the Complexity of Projects*. Project Management Institute. Newtown Square, Pa, Kindle Edition, 2009.
- [16] Obolensky, Nick. *Leading Complex Projects*. ICCPM. Kindle Ed., 2013.
- [17] Terry, Cooke-Davies. *Aspects of Complexity: Managing Projects in a Complex World*. Project Management Institute. Newtown Square, Pa. Kindle Ed., 2011
- [18] Cavanagh, Michael. *Project Complexity Assessment*. ICCPM. Kindle Ed., 2013.
- [19] Boushaala, Amer A. "Project Complexity Indices based on Topology Features," World Academy of Science, Engineering and Technology 69, pp. 49-54, 2010.

Control deslizante de un robot paralelo de tres grados de libertad para realizar actividades de mantenimiento naval

Sliding Mode Control of a parallel robot with three degrees of freedom to perform naval maintenance activities

Miguel Ângelo Dos Santos Pereira^{1*}, Ilka Arelys Banfield¹

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: miguel.dossantos@utp.ac.pa

RESUMEN— La Robótica ha experimentado una gran evolución debido a los avances tecnológicos. Uno de sus campos de estudio y desenvolvimiento es el control de sus movimientos. Este trabajo de investigación es parte importante para el aporte y desarrollo tecnológico industrial y propone el control de un robot portátil paralelo tres grados de libertad para realizar la tarea del conformado metálico por líneas de calor "Line Heating", para embarcaciones en alta mar, mejorando los costos del proceso y los tiempos de servicio de esta tarea de mantenimiento. El Robot debe cumplir con los elevados requerimientos de desempeño impuestos por la tarea; un robusto controlador ante perturbaciones externas. Se implementa un control por modos deslizantes SMC "Sliding Mode Control" para el posicionamiento de la herramienta en un robot paralelo, tipo RPS (por sus siglas en inglés, *Revolute-Prismatic-Spherical*). El método de control exige la utilización de la dinámica del sistema y su solución en tiempo real. Este trabajo presenta, la dinámica que modela el comportamiento del sistema, realizada por el método de Trabajos Virtuales que brinda un menor tiempo computacional, comparado con formulaciones dinámicas usuales, debido a ecuaciones más compactas y al menor número de operaciones aritméticas.

Palabras clave— Control por modos deslizantes, Conformado metálico por líneas de calor, Mantenimiento naval en alta mar, Principio de los trabajos virtuales, Robot paralelo, RPS, Sistema de control Robusto.

ABSTRACT— Robotics has experienced a great evolution due to technological advances. One of its fields of study and development is the control of its movements. This research work is an important part for the contribution and industrial technological development and proposes the control of a parallel portable robot with three degrees of freedom to perform the task of metal shaping at sea using heat lines "Line Heating", so decrease process costs and service times. The Robot must comply with the high-performance requirements imposed by the task, a robust controller against external disturbances. Sliding mode control SMC "Sliding Mode Control" is implemented for positioning the tool in a parallel robot, RPS (*Revolute-Prismatic-Spherical*) type. The control method requires the use of system dynamics and its solution in real-time. This work presents, the dynamics that model the behavior of the system, performed by the Virtual Works method that provides less computational time, compared to usual dynamic formulations, due to more compact equations and the lower number of arithmetic operations.

Keywords— Line Heating, Offshore Naval Maintenance, Parallel robot, Robust control system, RPS, Sliding Mode Control, Virtual work method.

1. Introducción

La industria naval actual en Panamá no cuenta con robots para las tareas de mantenimiento, y los que existen en el mercado mundial tienen su campo de aplicación restringido, son pesados y muy costosos. Estos robots son pensados para el trabajo dentro de los astilleros, desarrollados como una familia de sistemas robóticos que

realizan procesos tales como limpieza y pintura, preservando la integridad, y condiciones de la estructura.

En Japón la industria de naves ha asegurado su competitividad a través de técnicos calificados, sin embargo, dado que sus habilidades no han sido sistematizadas han surgido serias preocupaciones acerca de una rápida pérdida de habilidades como experto. A

Citación: M. Dos Santos y I. Banfield, "Control deslizante de un robot paralelo de tres grados de libertad para realizar actividades de mantenimiento naval", Revista de I+D Tecnológico, vol. 16 no. 2, pp. (), 2020

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 16 de marzo de 2020. **Recibido con correcciones:** 30 de julio de 2020. **Aceptado:** 31 de julio de 2020.

DOI.

Copyright: 2019 Primera_letra_nombre. Apellido. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

este problema en particular le denominaron “2007 Problem”, (problema 2007). Como solución a este problema, NEDO (*New Energy and industrial technology Development Organization*), desarrolló el proyecto “Digital Master Project” del 2001 al 2005, el cual tenía como objetivo ayudar a la pequeña, y mediana industria de construcción naval. Uno de estos “2007 Problem” se determinó era el “Line Heating”, conformación del metal por medio de calentamiento, el cual requiere un mínimo de 10 años de entrenamiento. Como resultado de este proyecto se desarrolló, el sistema llamado “IHI Alpha” [1], que utilizando una combinación de calentamiento en línea y formado en frío logra las curvas deseadas en placas metálicas originalmente planas.

Este proceso realizado manualmente es una labor intensa. El mantenimiento en buques todavía es una aplicación manual afuera del astillero donde se requiere movilidad y total confiabilidad. Actualmente no hay robots para esta tarea específica, lo que hace que el proceso sea más caro porque es más demorado a causa de los varios parámetros que deben ser controlados.

De ahí, el interés en desarrollar un sistema automatizado para la aplicación de conformado metálico por líneas de calor de forma rápida, precisa, y con calidad en el mantenimiento de buques fuera del astillero, substituyendo el trabajo manual que es muy difícil y arduo de hacer. La idea que cuyo estudio se inicia con este trabajo es que en la misma plataforma contenga dos tipos de control, un control clásico, y un control robusto de posición. El control clásico se encargará del posicionamiento en el plano de robot 3-RPS y el control robusto que asegurará el posicionamiento más refinado del robot paralelo con la menor sensibilidad a las perturbaciones.

El objetivo del presente trabajo es controlar con precisión los movimientos de un robot portátil paralelo de tres grados de libertad tomando las perturbaciones externas a fin de disminuir la sensibilidad del sistema de control en las reparaciones de las embarcaciones en sitio por medio del conformado metálico por líneas de calor.

A continuación, se presenta la dinámica inversa y dinámica directa por el principio de los trabajos virtuales [2] [3] [4], análisis de la estabilidad [5] y las simulaciones utilizando un sistema de control clásico PID “Proporcional Integral Derivativo” [6] [7] y el sistema de control propuesto por modos deslizantes SMC [8] [9] [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20].

2. Formulación de las ecuaciones Dinámicas del Robot Paralelo 3-RPS

En la figura 1, muestra la estructura del robots 3-RPS, se puede observar que el robot tiene una plataforma móvil con un sistema coordenado $\{P_x'y'z'\}$, unida a una plataforma fija con un sistema coordenado global definido como $\{Oxyz\}$ mediante tres eslabones, cada eslabón tiene una configuración RPS, es decir, la plataforma fija se une a los eslabones mediante uniones revolutas A_i , los eslabones se unen mediante un par prismático (cilindro y pistón) y la plataforma móvil se une a los eslabones por medio de las uniones esféricas B_i , d_i representa la medida de la distancia entre A_i , hasta B_i de cada eslabón i , h es el radio de la plataforma móvil y g es radio de la plataforma fija y ϕ_i es el ángulo de la junta de revoluta.

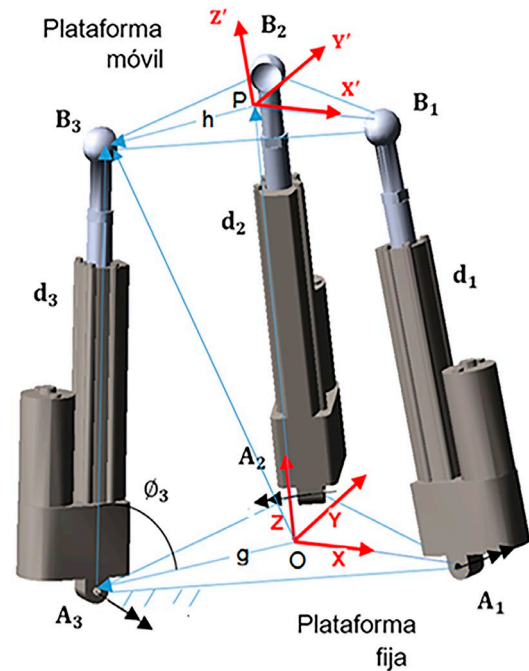


Figura 1. Representación de la estructura del 3-RPS

Para aplicar el principio de trabajos virtuales en los robots paralelos se determinan las fuerzas debido a la inercia, tanto de los eslabones como de la plataforma móvil, y se describen a continuación,

$$\hat{F}_k = \begin{bmatrix} \hat{f}_k \\ \hat{n}_k \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\hat{F}_k = \begin{bmatrix} \hat{f}_k \\ \hat{n}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_k g - m_k \dot{v}_k \\ -I_k \dot{w}_k - w_k \times (I_k w_k) \end{bmatrix} \quad (2)$$

donde $\hat{F}_k$ es el vector de fuerza expresado de manera general, $\hat{f}_k$ y $\hat{n}_k$ son las fuerzas y los pares de inercia ejercidas en el centro de masa de cada elemento, cuerpo rígido del robot (plato móvil, cilindro y pistón). m_k es la matriz de masa, I_k es la matriz de inercia, $\dot{w}_k$ es la aceleración angular y w_k es la velocidad angular. Utilizando la notación de las ecuaciones (1) y (2) se definen los vectores, $\hat{F}_p$, vector de fuerzas generalizadas del centro de masa de la plataforma móvil, y $\hat{F}_i$ vector de fuerzas generalizadas en cada enlace, cuerpo rígido del robot, en las ecuaciones (3) y (4).

$$\hat{F}_p = \begin{bmatrix} \hat{f}_p \\ \hat{n}_p \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\hat{F}_i = \begin{bmatrix} \hat{f}_i \\ \hat{n}_i \end{bmatrix} \quad (4)$$

Se incorporan las ecuaciones 3 y 4 para presentar la ecuación de la dinámica inversa del 3-RPS utilizando el principio de los trabajos virtuales en la siguiente expresión:

$$\delta q^T \tau + \delta x_p^T \hat{F}_p + \sum_i \delta x_i^T \hat{F}_i = 0 \quad (5)$$

donde δx_p es el desplazamiento virtual del vector de coordenadas generalizadas en el espacio de tareas del robot $x_p = [x, y, z, \phi, \theta, \psi]^T$, δq es el desplazamiento virtual del vector de coordenadas posición de las juntas actuadas y δx_i , es el i -ésimo desplazamiento virtual de las juntas pasivas del robot. Los desplazamientos virtuales en la ecuación 5, deben ser compatibles con las restricciones cinemáticas de las uniones. Por lo tanto, es necesario expresar los desplazamientos virtuales para un conjunto de desplazamientos virtuales independiente generalizados, δq . Por otro lado, El vector desplazamientos virtuales de las juntas actuadas, δq , está relacionado con los desplazamientos virtuales de la plataforma móvil δx_p , por la matriz Jacobiana del manipulador J_p :

$$\delta q = J_p \delta x_p \quad (6)$$

Además, el desplazamiento virtual del i -ésimo enlace pasivo, δx_i , puede ser relacionado con el desplazamiento virtual de la plataforma móvil δx_p por medio de la matriz

Jacobiana J_i que es Jacobiano de cada cuerpo rígido del actuador:

$$\delta x_i = J_i \delta x_p \quad (7)$$

Reemplazando las ecuaciones 7 y 6 en la 5, se tiene:

$$\delta x_p^T (J_p^T \tau + \hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i) = 0 \quad (8)$$

La ecuación 8, es válida para cualquier desplazamiento virtual δx_p :

$$J_p^T \tau + \hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i = 0 \quad (9)$$

La ecuación 9 según Tsai [21], se utiliza para describir la dinámica del robot paralelo presentado en este trabajo.

En general, cuando el robot no es redundante, está completamente actuado, el número de actuadores es igual al número de grados de libertad del manipulador y J_p es una matriz cuadrada. De esta manera, la ecuación 10, determina el vector de torques τ :

$$\tau = -J_p^{-T} (\hat{F}_p + \sum_i J_i^T \hat{F}_i) \quad (10)$$

Por otro lado, si el número de actuadores es mayor que el número de grados de libertad, τ tiene muchas soluciones aplicando la técnica de la pseudoinversa [22].

En la ecuación (10), el Jacobiano del Robot se implementa utilizando la relación entre las velocidades dependientes e independientes en la plataforma móvil, y para su implementación como parte de la ley de control se requiere de su linealización. Se obtiene la forma lineal de la dinámica del Robot 3-RPS, en función de los parámetros dinámicos del sistema, φ y la matriz regresora Y , como se muestra en la ecuación (11):

$$\tau = Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \varphi \quad (11)$$

La linealización se obtiene por medio del Principio de Jourdain's. Se detalla su implementación en las referencias [23] y [24].

2.1 Desarrollo del modelo Dinámico Directo

El desarrollo del modelo dinámico directo permite contar con un modelo que puede ser usado para desarrollar esquemas de control. Del modelo directo puede despejarse la aceleración y así obtener un sistema de ecuaciones diferenciales que al integrarse en el tiempo permite predecir el comportamiento de la planta para un par aplicado. El modelo directo permite ser usado como

sustituto del robot real y así, de esta manera, hacer pruebas del controlador que se requiere implementar.

Se reestructura la ecuación 2 en forma matricial [4] para determinar el vector de aceleraciones del centro del efector final, para el caso, centro la plataforma móvil,

$$\hat{F}_k = \tau_{ext,p} - M_k \ddot{x}_k - V_k \dot{x}_k - G_k \quad (12)$$

donde $\tau_{ext,p}$ representa el vector torques y momentos externos en el espacio de trabajo del robot, M_k la matriz de masa global, V_k es el vector de fuerzas de coriolis global, G_k es la matriz de gravedad global.

A continuación, se reescribe la ecuación (12) para determinar la dinámica directa del 3-RPS:

$$J_p^T \tau_{act} + \tau_{ext,p} = M_p \ddot{x}_p + V_p \dot{x}_p + G_p + \sum_i J_i^T (M_i \ddot{x}_i + V_i \dot{x}_i + G_i) \quad (13)$$

$$\dot{x}_i = J_i \dot{x}_p \quad (14)$$

$$\ddot{x}_i = J_i \ddot{x}_p + \dot{J}_i \dot{x}_p \quad (15)$$

donde M_p , V_p y G_p representan las matrices de Inercia, el vector de fuerzas de Coriolis y el vector de Gravedad de la plataforma móvil, $\tau_{ext,p}$ representa el vector de fuerzas externas, M_i , V_i y G_i representan las matrices de Inercia, vector de fuerzas de Coriolis y el vector de Gravedad de los cuerpos rígidos del robot, J_i y $\dot{J}_i$ representan el Jacobiano y derivada del Jacobiano entre cada cuerpo y la plataforma móvil.

Representando la ecuación en términos de las aceleraciones y velocidades del efector final en que se sustituye las ecuaciones 14 y 15 en la ecuación 13, se tiene:

$$J_p^T \tau_{act} = M_T \ddot{x}_p + V_T \dot{x}_p + G_T \quad (16)$$

$$\ddot{x}_p = [\dot{v}_p^T \quad \dot{w}_p^T]^T \quad (17)$$

$$\dot{x}_p = [v_p^T \quad w_p^T]^T \quad (18)$$

$$M_T = M_p + \sum_{i=1}^3 (\sum_{j=1}^2 J_{i,j}^T M_{i,j} J_{i,j}) \quad (19)$$

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 = V_p + \sum_{i=1}^3 (\sum_{j=1}^2 J_{i,j}^T V_{i,j} J_{i,j} + J_{i,j}^T M_{i,j} \dot{J}_{i,j}) \quad (20)$$

$$G_T = G_p + (\sum_{i=1}^3 (\sum_{j=1}^2 J_{i,j}^T g_{i,j})) \quad (21)$$

donde $\ddot{x}_p$ y $\dot{x}_p$ representan los vectores de aceleraciones y velocidades, del efector final. La matriz de masa total M_T representa la suma de las matrices de masa de la plataforma móvil M_p más las matrices de masa de los cilindros y pistones. El vector de fuerzas de Coriolis total V_T representa la suma del vector de fuerzas de coriolis de cada parte del robot, donde $V_1 = V_p$, y V_2, V_3 representan coriolis de plataforma móvil, cilindro y pistón. El vector de gravedad total G_T representa la suma de la matriz de gravedad de la plataforma móvil G_p más las del cilindro y pistones.

El modelo directo es usado en este trabajo como sustituto del robot real y así poder implementar controladores del tipo PID y SMC.

El problema inverso es utilizado para estudiar las fuerzas requeridas por los actuadores del robot para una trayectoria particular que vaya a ser ejecutada por el robot. El modelo permite entonces seleccionar los motores o actuadores que puedan ser capaces de que el robot ejecute la trayectoria requerida.

Por otra parte, el modelo inverso puede ser empleado para desarrollar controladores que incluyan el modelo del sistema, tales como el Control *FeedForward* o el Control de Torque Computado y SMC.

3. Diseño del controlador por modos Deslizantes para el Robot Paralelo 3-RPS

La superficie deslizante del robot 3-RPS es representada por la siguiente ecuación:

$$s = \tilde{x}_{ps} + \lambda \tilde{x}_{ps} \quad (22)$$

El propósito de definir la superficie de esta manera es buscar una acción de control que fuerce al valor de la ecuación de superficie a ser igual a cero $s = 0$. Donde el $\tilde{x}_{ps}$ es el error de velocidad entre actuadas y deseadas, λ es una matriz diagonal positiva definida y el $\tilde{x}_{ps}$ viene a ser el error de posición del centro del plato móvil.

Derivando la ecuación de la superficie de deslizamiento se tiene:

$$\dot{s} = \tilde{\dot{x}}_{ps} + \lambda \tilde{x}_{ps} \quad (23)$$

La estabilidad es determinada por la función de "Lyapunov" [14] [25]. una función escalar "V", que describe la energía del sistema.

De acuerdo con el método directo de “Lyapunov”, para que el sistema se encuentre estable debe cumplir con la siguiente ecuación:

$$\dot{V} < 0 \quad (24)$$

Lyapunov (SLOTLINE, 1991) [5]:

$$V = \frac{1}{2} s^T M_t s \quad (25)$$

Donde, “V” es definida positiva debido a M_t . Derivando la función de “Lyapunov” se tiene:

$$\dot{V} = s^T M_t \dot{s} + \frac{1}{2} s^T \dot{M}_t s \quad (26)$$

Igualando las ecuaciones 11 y 16 que también son utilizadas para un robot paralelo tipo 3-RPS y sustituyendo en la aceleración y velocidad, la derivada de la superficie deslizante y la superficie deslizante se tiene:

$$Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} = M_t(\ddot{x}_d + \lambda \tilde{x}) + C_t(\dot{x}_d + \lambda \tilde{x}) + g_t \quad (27)$$

Donde M_t que es la matriz de masa total, C_t es el vector de fuerza de Coriolis total, g_t es el vector de gravedad total, Y es la matriz regresora y $\hat{\phi}$ es el vector de parámetros del robot, $\tilde{x}$ derivada del error de posición y $\tilde{x}$ es el error de posición.

$$M_t \dot{s} = Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - C_t s - J_p^T \tau_{act} + g_t \quad (28)$$

Sustituyendo 28 en 26:

$$\dot{V} = s^T [Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - C_t s - J_p^T \tau_{act} + g_t] + \frac{1}{2} s^T \dot{M}_t s \quad (29)$$

La ley de control es definida por la ecuación 30:

$$\tau_{act} = J_p^{-T} (Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} + K s \operatorname{sgn}(s) + g_t) \quad (30)$$

Sustituyendo la ecuación 30 en la 29, se tiene la 31:

$$\dot{V} = s^T [Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - C_t s + \frac{1}{2} \dot{M}_t s - J_p^T \tau_{act} + g_t] \quad (31)$$

$$\frac{1}{2} s^T (\dot{M}_t - 2C_t) s = 0 \quad (32)$$

El término $(\dot{M}_t - 2C_t)$ de la ecuación 32 representa la matriz antisimétrica.

$$\dot{V} = s^T [Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - J_p^T \tau_{act} + g_t] \quad (33)$$

Reemplazando la ecuación 30 en la 33 se tiene:

$$\dot{V} = s^T [Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - Y(\ddot{x}_d, \dot{x}_d, \dot{x}, x) \hat{\phi} - K \operatorname{sgn}(s) - g_t + g_t] \quad (33)$$

$$\dot{V} = -s^T K \operatorname{sgn}(s) \quad (34)$$

La estabilidad del sistema en el robot 3-RPS puede ser probada utilizando Barbalat’s Lemma [5]. Para valores $\dot{V} \leq 0$, V tende a cero en el tiempo infinito.

4. Implementación del controlador SMC

Los tres grados de libertad seleccionados para esta aplicación en este robot, 3-RPS, fueron la posición en Z, altura PZ, y los ángulos, medidos alrededor el eje x, *Roll*, alrededor del eje y, *Pitch*. Su selección se basó en los requerimientos de la tarea.

Controlador MSC:

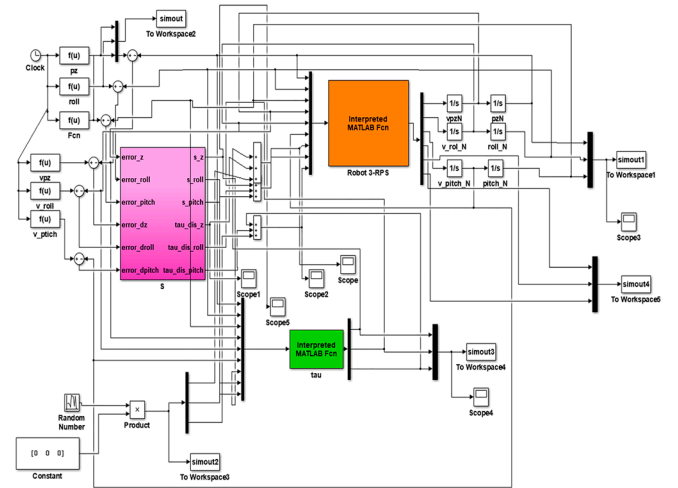


Figura 2. Diagrama de bloques en simulink para el control SMC 3-RPS.

El bloque en color naranja (MATLAB Fcn) representado en la figura 2, es la dinámica directa del mecanismo, en este mismo bloque entra un vector “MUX” de nueve variables referentes al centro del plato móvil que son: Error de posición en “PZ”, Error en *Roll*, Error en *Pitch*, Error de Velocidad en “PZ”, Error de Velocidad en *Roll*, Error de Velocidad en *Pitch*, y las fuerzas que actúan en “PZ”, *Roll*, *Pitch*. La señal de

fuerza que es entrada de la dinámica directa es la suma de las fuerzas externas de perturbación más las fuerzas generadas por la acción de control del SMC.

El bloque de color verde es la dinámica inversa linealizada que representa la parte continua de la acción de control del SMS que está siendo retroalimentado por las variables actuadas ("PZ", Roll, *Pitch*) de posición, orientación, velocidades y aceleraciones (s_z , s_{roll} , s_{pitch}).

Los errores de posición, orientación y velocidades que entran en el bloque de color morado "S" como muestra en la figura 2, representa la parte discontinua de la acción de control, donde es generado una superficie deslizante para cada una de las variables independientes como muestra la figura 3.

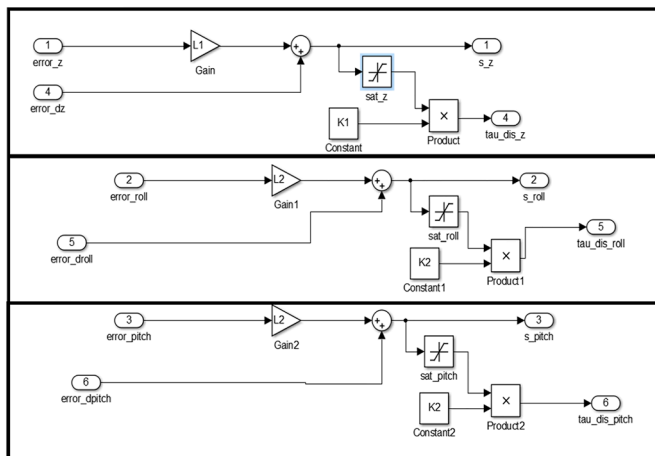


Figura 3. Bloque de Control por SMC

Se utiliza el bloque de saturación [19] para limitar los valores de alta frecuencia "Chattering" [26] posición "Z".

4.1 Simulaciones utilizando el control PID

Para las simulaciones se utilizaron las siguientes entradas en *simulink*:

$$\begin{aligned} \text{Roll} &= 0.05 + 10 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 10); \\ \text{Pitch} &= 0.05 + 10 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 10); \\ \text{PZ} &= 0.35 + \text{amplitud_z} \cdot \sin(w \cdot t); \text{mplitud_z} = 0.04 \text{m}. \end{aligned}$$

En la figura 4, muestra el comportamiento de la señal "PZ" de entrada y salida, se aprecia que la señal actuada es corregida en el tiempo de simulación de $t=20$ segundos, cuando la convergencia del error se acerca a cero, haciendo que la posición "PZ" del extremo del Robot siga la trayectoria deseada.

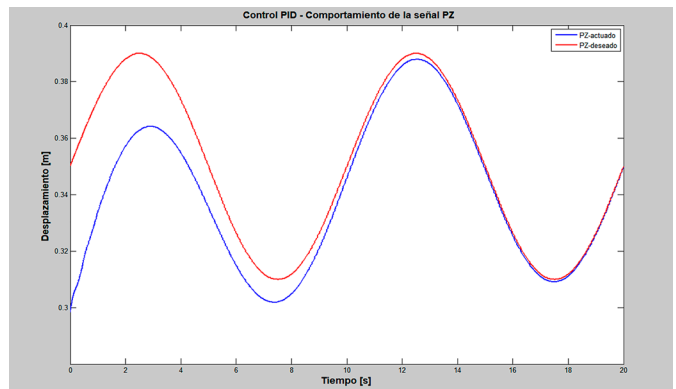


Figura 4. Control PID de la señal PZ

En las figuras 5 y 6, muestran el comportamiento de la señal de la fuerza en "PZ" y el comportamiento de la fuerza en cada actuador del robot 3RPS.

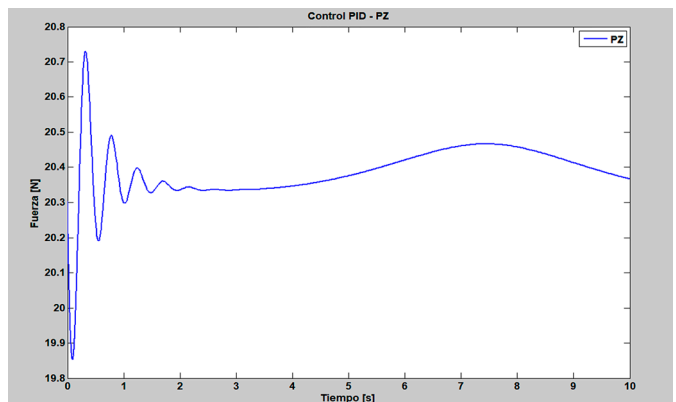


Figura 5. Control PID de la señal PZ en Newton.

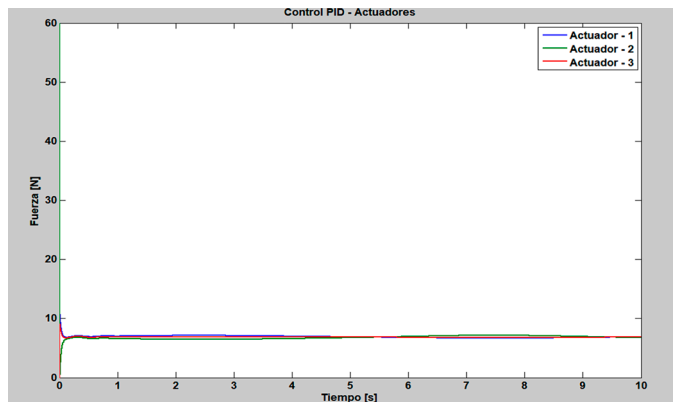


Figura 6. Control PID de la señal en cada actuador.

En las figuras 7 y 8, muestran el comportamiento de la señal *Roll* y *Pitch* de entrada y salida, en ambas gráficas se aprecia que la señal actuada es corregida a la medida que el tiempo avanza, en el tiempo de simulación de $t=0.15$ segundos en que la convergencia del error se

acerca a cero haciendo que la orientación en *Roll* y *Pitch* del extremo del Robot siga la trayectoria deseada.

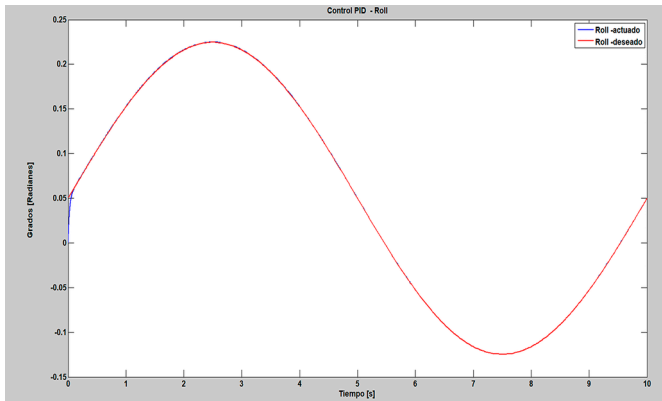


Figura 7. Control PID de la señal Roll.

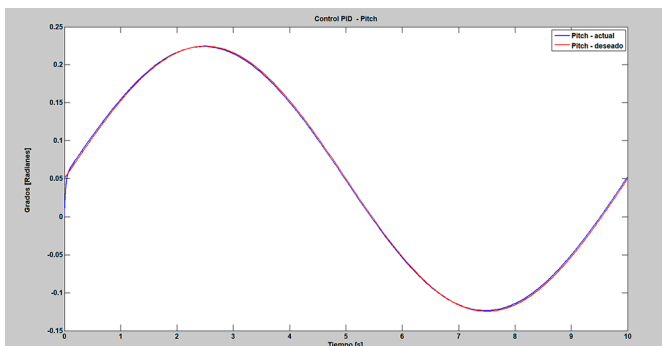


Figura 8. Control PID de la señal Pitch.

4.2 Simulaciones utilizando el control PID con perturbación externa.

Las simulaciones presentadas en esta sección para el sistema de control PID en el 3RPS, utilizaron las siguientes perturbaciones en unidades de Newton para cada variable independiente en $PZ=1$, $Roll=0.5$ y $Pitch=0.5$ representado por el bloque “constant”, el cual representan valores máximos y aleatorios.

Las figuras 9 y 10, muestran el comportamiento de la señal “PZ” de entrada y salida y su comportamiento de la fuerza, se aprecia que la señal actuada es sensible a las perturbaciones externas de magnitud máxima de $1N$ haciendo que la posición “PZ” del extremo del Robot pierda la precisión del movimiento.

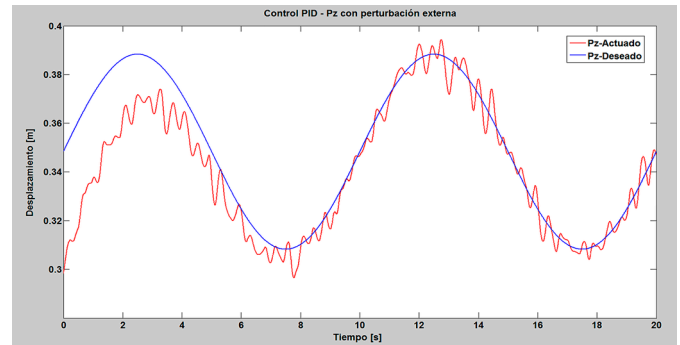


Figura 9. Control PID con perturbación en la señal PZ.

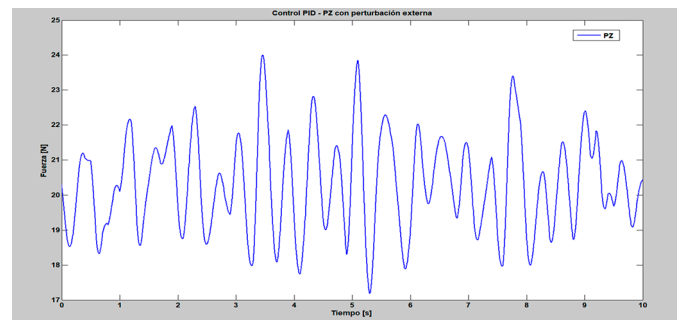


Figura 10. Comportamiento de la señal PZ en Newton con perturbación externa.

Las figuras 11 y 12, muestran el comportamiento de la señal *Roll* y *Pitch* de entrada y salida, se aprecia que la señal actuada es sensible a las perturbaciones externas de magnitud máxima de $0.5 N$ haciendo que la orientación en los ángulos *Roll* y *Pitch* del extremo del Robot pierda la precisión del movimiento.

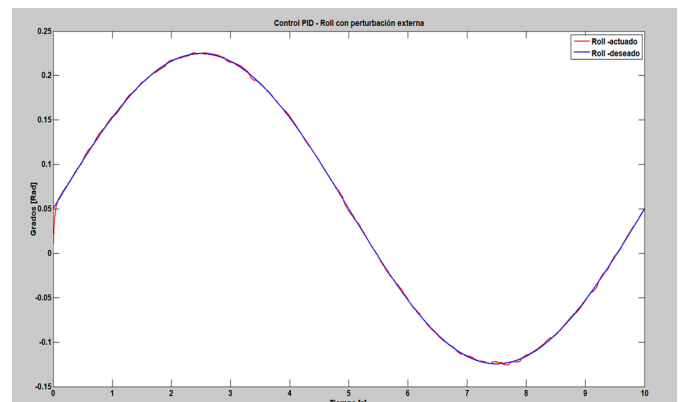


Figura 11. Control PID con perturbación en la señal Roll.

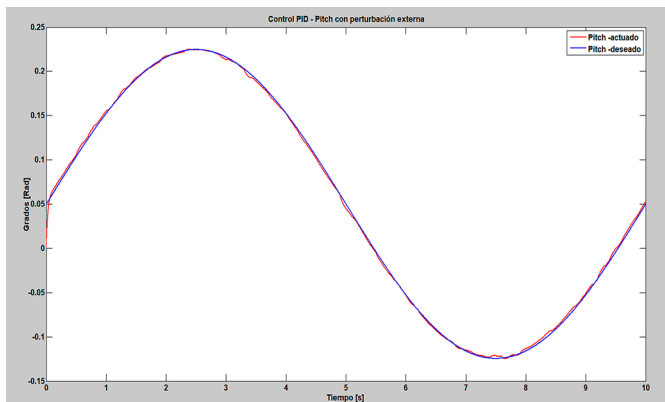


Figura 12. Control PID con perturbación en la señal Pitch.

4.3 Simulaciones utilizando el control SMC

Para las simulaciones se utilizaron las siguientes entradas en *simulink*:

$$\begin{aligned} \text{Roll} &= 0.05 + 10 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 10); \\ \text{Pitch} &= 0.05 + 10 \cdot \pi / 180 \cdot \sin(2 \cdot \pi / 10); \\ \text{PZ} &= 0.35 + \text{amplitud_z} \cdot \sin(w \cdot t); \text{mplitud_z} = 0.04 \text{m}. \end{aligned}$$

En la figura 13, se muestra el comportamiento de la señal “PZ” de entrada y salida, se aprecia que la señal actuada es corregida rápidamente, en el tiempo de simulación de $t=0.05$ segundos, la convergencia al error cero haciendo que la posición “PZ” del extremo del Robot siga la trayectoria deseada.

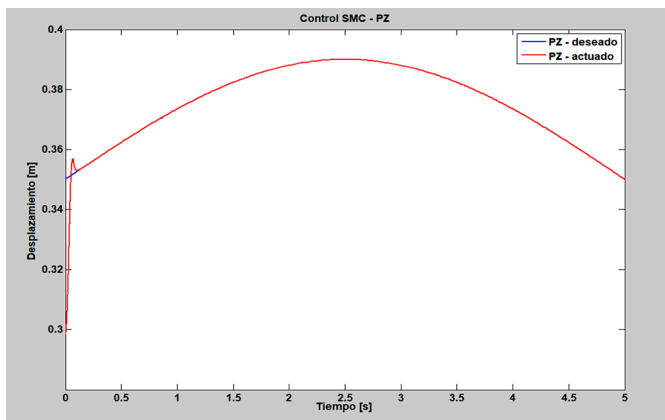


Figura 13. Control SMC de la señal PZ.

En las figuras 14 y 15, muestran el comportamiento de la señal de la fuerza en “PZ” y el comportamiento de la fuerza en cada actuador del robot 3RPS.

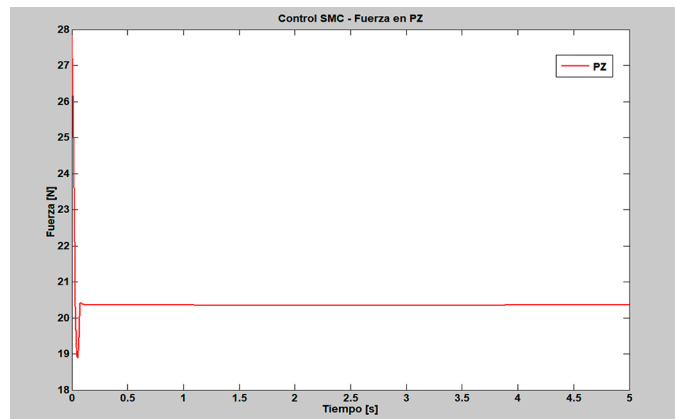


Figura 14. Control SMC de la señal de Fuerza en PZ.

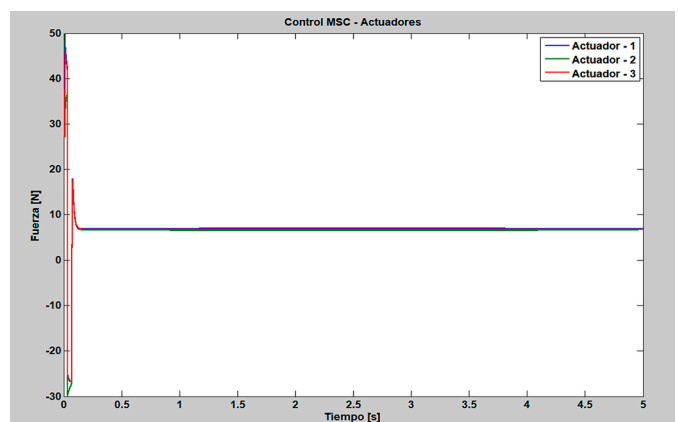


Figura 15. Control SMC de la señal en cada actuador.

La figura 16 muestra el comportamiento de la señal *Roll* y *Pitch* de entrada y salida; en ambas gráficas se aprecia que la señal actuada es corregida rápidamente, en el tiempo de simulación de $t=0.1$ segundos haciendo que la orientación en *Roll* y *Pitch* del extremo del Robot siga la trayectoria deseada.

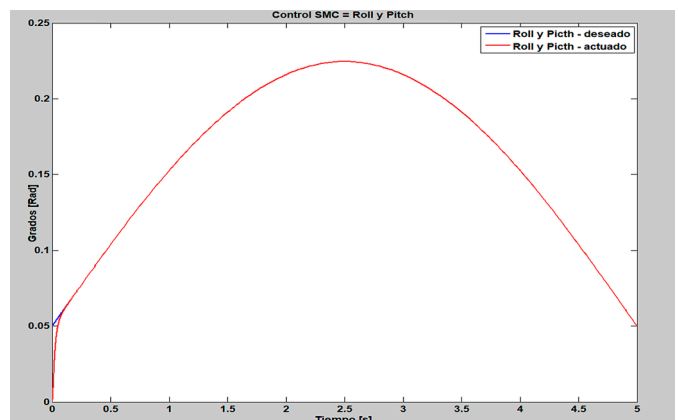


Figura 16. Control SMC de la señal Roll y Pitch.

4.4 Simulaciones utilizando el control SMC con perturbación externa.

Las simulaciones que se presentan en esta sección para el sistema de control SMC en el 3RPS utilizaron las siguientes perturbaciones en unidades de Newton para cada variable independiente en $PZ=1$, $Roll=0.5$ y $Pitch=0.5$ representado por el bloque “constant”, el cual representan valores máximos y aleatorios iguales utilizados en el PID.

Las figuras 17 y 18, muestran el comportamiento de la señal “PZ” de entrada y salida y su comportamiento de la fuerza, se aprecia que la señal actuada es insensible a las perturbaciones externas de magnitud máxima de $1N$ haciendo que la posición “PZ” del extremo del Robot no pierda la precisión del movimiento.

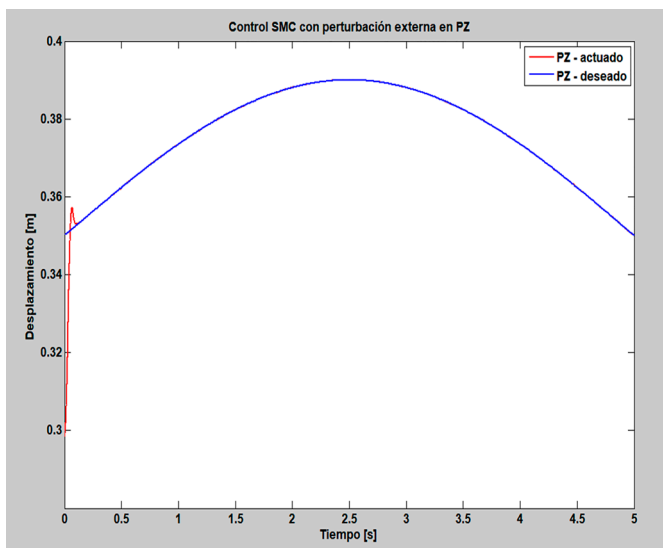


Figura 17. Control SMC con perturbación en la señal PZ.

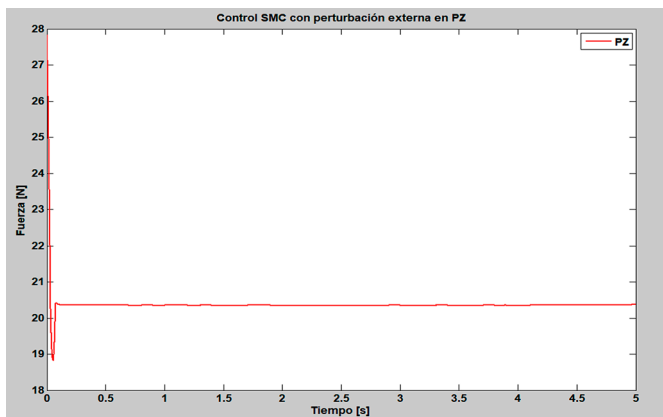


Figura 18. Comportamiento de la señal PZ en Newton con perturbación externa.

En la figura 19, muestra el comportamiento de la señal *Roll* y *Pitch* de entrada y salida, se aprecia que la señal actuada es insensible a las perturbaciones externas de magnitud máxima de 0.5 “N” haciendo que la orientación en los ángulos *Roll* y *Pitch* del extremo del Robot no pierda la precisión de la orientación movimiento.

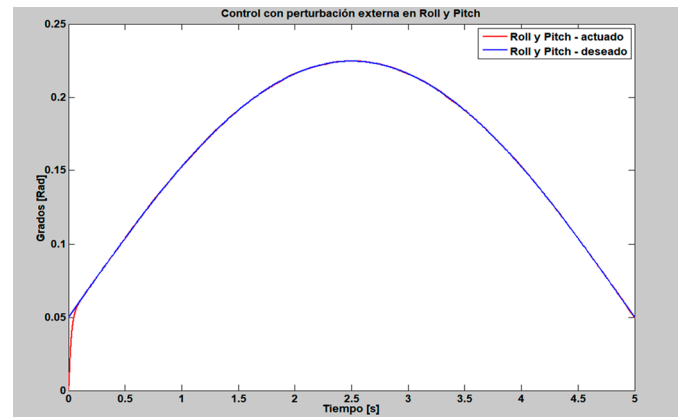


Figura 19. Control SMC con perturbación en la señal Roll y Pitch.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta el desarrollo de un controlador por modos deslizante para ser aplicado en un robot paralelo 3RPS. Para ello, se implementa las ecuaciones de la cinemática inversa del robot, mediante el principio de los trabajos virtuales, y el modelo dinámico inverso, que luego fue descrito en el modo variables de estados, utilizando el modelo linealizado. El modelo lineal fue validado utilizando otro modelo desarrollado en ADAMS. Una vez elaborado el modelo se realiza comparación entre un control clásico PID y el otro un control robusto MSC.

Para la comparación se utiliza una trayectoria tipo seno, como modelo simple de una trayectoria requerida para realizar conformación del metal por medio de línea de calentamiento. De igual forma, en la simulación se introducen perturbaciones, que pudieran representar la fuerza del viento mientras en mecanismo se utiliza en cubierta. Los resultados muestran que el control SMC provee los mejores resultados en todos los casos considerados. El modo deslizante resulta ser más rápido en su convergencia a cero, comparado con el PID. Otra ventaja vista con las gráficas es que el PID con la perturbación de máximo $1N$ en “PZ” el robot pierde la precisión de sus movimientos siendo totalmente sensible a las perturbaciones, lo que podría resultar en daños del robot, considerando que la tarea es de contacto. En las mismas condiciones, el SMC mostró que su precisión no se ve afectada.

Estos resultados muestran las grandes capacidades que tiene el control SMC para resolver problemas de control en el campo de la robótica industrial y en particular de la robótica paralela.

Este trabajo tiene como aporte la implementación del controlador por modos deslizantes en un robot paralelo de tres grados de libertad sometido a perturbaciones externas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación se ha producido gracias a la Universidad Tecnológica de Panamá y SENACYT, por darme la oportunidad de estudiar esta Maestría. También agradezco a mi Asesora de tesis "Ilka Arelys Banfield".

REFERENCIAS

- [1] M. Ishiyama, Y. Tango. "Advanced Line-Heating Process for Hull-Steel Assembly," Journal of Ship Production Vol. 16, No. 2, pp. 121-132, May 2000.
- [2] L.w. Tsay. "Solving the Inverse Dynamics of a Stewart-Gough Manipulator by The Principle of Virtual Work," ASME Journal of Mechanical Design. Vol. 122 pp. 3-9, Mar 2000.
- [3] C. D. Zhang, S.M. Song. "An Efficient Method for Inverse Dynamics of Manipulators based on the Virtual Work principle," Journal of Field Robotics, pp. 605-627, Jul 1993.
- [4] E. Yime, R. Saltaren, J. Díaz. "Forward and inverse dynamic model of the Stewart-Gough parallel robot in the task space," Proceedings of the American Control Conference. Jun 2010.
- [5] J. J. E. Slotine, W. Li. Applied Nonlinear Control. 1991, pp.70-126.
- [6] A. Koszewnik, K. Troc, M. Slowik. "Pid Controllers Design Applied to Positioning of Bal on the Stewart Platform," DOI 10.2478/ama. Jan 2014.
- [7] C. Yiqiang, Z. Dachang. "Position Analysis of 3-RPS Parallel Robot and Simulation of PID Control Based on Matlab Software," Lecture notes in Information Technology, Vol. 19, pp. 146, 2012.
- [8] M. Jafarinasab, M. Keshmiri, H. Azizan and M. Danesh. "Sliding mode control of a novel 6-DOF parallel manipulator with rotary actuators," 2011 16th International Conference on Methods & Models in Automation & Robotics, Miedzyzdroje, 2011, pp. 218-223.
- [9] V. I. Utkin. Sliding Mode Control. Control Systems, Robotics and Automation. Vol. XIII: 2009, pp.130.
- [10] C. Vecchio. "Sliding Mode Control: Theoretical Developments and Applications to Uncertain Mechanical Systems," PhD thesis, Università Degli Studi Di Pavia. 2008.
- [11] W. Lv, L. Tao, Z. Ji. "Sliding Mode Control of Cable-Driven Redundancy Parallel Robot with 6 DOF Based on Cable – Length Sensor Feedback," Volume 2017, Article ID 1928673, May 2017.
- [12] P.J. Prieto, N.R. Cazarez-Castro, L.T. Aguilar, D. Garcia. "Fuzzy Slope Adaptation for the Sliding Mode Control of a Pneumatic Parallel Platform," Int. J. Fuzzy Syst. 19, pp.167–178, Mar 2016.
- [13] H. S. Ramírez, M. Fliess. "A Sliding Mode Control APPROACH to Predictive Regulation," Control Theory and Advanced Technology, Vol.10 No.4, Part 3 pp.1297-1316, Sep. 1995.
- [14] C. I. Huang, C. Chang, M. Yu, L.Fu. "Sliding-Mode Tracking Control of the Stewart Platform," 5th Asian IEEE Control Conference. Vol. 1, pp. 562-569, 2004.
- [15] J. Huspeka. "Second Order Sliding Mode Control of The DC Motor," 17Th International Conference on Process Control, Jan.2009.
- [16] F. Moldoveanu. "Sliding Mode Controller Design for Robot Manipulator," Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Vol. 7 (56), No. 2 Series I: Engineering Sciences, 2014.
- [17] W. Perruquetti, J. P. Barbot. Sliding Mode Control in Engineering, 2002, pp. 20-42.
- [18] P.R. Ouyang, J. Acob, V. Pano. "PD with sliding mode control for trajectory tracking of robotic system," Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 30, Issue 2, pp.189-200, Apr 2014.
- [19] F. Piltan, S. Emamzadeh, Z. Hivand, F. Shahriyari, M. Mirzaei. "PUMA-560 Robot Manipulator Position Sliding Mode Control Methods Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate/Undergraduate Nonlinear Control, Robotics and MATLAB Courses," International Journal of Robotic and Automation, (IJRA), Vol (6), 2012.
- [20] F. Piltan, S. Rahmdel, S. Mehrara, R. Bayat. "Sliding Mode Methodology Vs. Computed Torque Methodology Using MATLAB/SIMULINK and Their Integration into Graduate Nonlinear Control Courses," International Journal of Engineering (IJE), Vol. (6), 2012.
- [21] L.w. Tsay, Robot Analysis. The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators. 1999, pp. 437-439.
- [22] Y. Song, Y. Li, T. Huang. "Inverse Dynamics of 3-RPS Parallel Mechanism Based on Virtual Work Principle," 12th IFToMM World Congress, Jun 2007.
- [23] M. Grotjahn, B. Heimann, H. Abdellatif. "Identification of Friction and Rigid-Body Dynamics of Parallel Kinematic Structures for Model-Based Control," Multibody System Dynamics, Vol. 11, pp 273–294, Apr 2004.
- [24] M. D. Rodriguez, V. Mata, N. Farhat, S. Provenzano. "Dynamic parameter identification of parallelrobots starting from the measurement of jointsposition and forces," Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia. Vol. 32, No. 2, Aug 2009.
- [25] E. Yime, R. Saltaren, J. Díaz. "Robust Adaptive Control of the Stewart-Gough Robot in the Task Space" Proceedings of the American Control Conference, Jun 2010.
- [26] V. Utkin, H. Lee. "Chattering Problem in Sliding Mode Control Systems," International Workshop on Variable Structure Systems, Jun 2006.

Instructivo para autores

Guide for authors

Nombre del autor principal ^{1*}, Nombre de cada coautor ^{1,...,n}

¹ Unidad a la que está adscrito, entidad a la que está afiliado, País

^{1,...,n} Unidad a la que está adscrito, entidad a la que está afiliado, País

*Autor de correspondencia: ejemplo@ejemplo.com

RESUMEN– Todo trabajo debe presentar un resumen con un aproximado no más de doscientas cincuenta (250) palabras. Esta sección va después de la información de los autores y con su respectiva traducción al inglés. Utilice las palabras “RESUMEN” (español) y “ABSTRACT” (inglés) como títulos, alineados a la izquierda, en letra Times New Roman 12 puntos, tipo negrita y seguido de un guión. Luego, inicie el resumen en letra Times New Roman 9 puntos y espacio sencillo. Finalmente, mantener un espacio en blanco de 8 puntos y empiece a desarrollar el contenido del artículo. No modificar las líneas

Palabras clave– En esta sección se deben utilizar las frases “Palabras Clave” (español) y la palabra “Keywords” (inglés), alineadas a la izquierda, en letra Times New Roman 12 puntos, tipo negrita y seguido de un guión. Finalmente, debe incluir un máximo de siete (7) palabras clave o frases clave en letra Times New Roman 10 puntos, separadas por comas y en orden alfabético.

ABSTRACT– This section provides a sample of an abstract and keywords which conform to the formatting guidelines for Revista de I+D Tecnológico.

Keywords– Abstract, guidelines for authors, keywords, Revista de I+D Tecnológico.

1. Introducción

Este instructivo es una plantilla que el autor puede modificar para estructurar fácilmente su artículo según las disposiciones establecidas por el Comité Editorial (CE) de la Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).

El documento provee reglas de estilo que explican el manejo de ecuaciones, figuras, tablas, abreviaturas y siglas. Además, el autor encontrará secciones para preparar los agradecimientos y referencias.

2. Componentes del artículo

El contenido del documento debe limitarse a un máximo de doce (12) páginas, incluyendo texto, ilustraciones, gráficos y referencias. Por página se entiende una cara de papel tamaño carta ó 21.59 cm x 27.94 cm (8.5" x 11"). El cuerpo del artículo es a dos (2) columnas, cada una con 8.79 cm de ancho y 1.0 cm de espacio entre cada columna.

La configuración de los márgenes es la siguiente: Solo la primera página superior 3 cm, inferior 2.5 cm,

izquierdo 1.5 cm y derecho 1.5 cm. Y la configuración del encabezado de página es de 2 cm y el pie página es a 1.5 cm, ambos solo aplicados en la primera página.

A continuación, se detallan los componentes del artículo y formato de presentación.

2.1 Tipos de letra y estilos

Utilice un procesador de texto con el tipo de letra Times New Roman. Por favor, evite el uso de “bit-mapped fonts”.

2.2 Título

El título debe ser breve e informativo, reflejando el hallazgo contenido en el artículo y debe estar en Times New Roman 16 puntos, negrita y centrada. La primera palabra comenzará con letra mayúscula y de ahí en adelante se utilizará la mayúscula solamente para los nombres propios y símbolos químicos. Se evitará el uso de abreviaciones y siglas en el título, así como palabras innecesarias al principio del título, como por ejemplo: un, una, sobre, el, etc.

Citación: Primera_letra_nombre. Apellido, “Título_artículo”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 1, pp. (no_modificar), 2019.

Tipo de artículo: No_modificar. **Recibido:** No_modificar. **Recibido con correcciones:** No_modificar. **Aceptado:** No_modificar.

DOI.

Copyright: 2019 Primera_letra_nombre. Apellido. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

El título debe contar con su respectiva traducción al inglés o al español, según el idioma base del artículo y tamaño de fuente a 14 puntos. Ejemplo: si el artículo está redactado en español entonces el título debe aparecer en español y luego en inglés o viceversa si es el caso contrario.

2.3 Nombre de los autores, afiliaciones y correo

Los autores y coautores deben escribir sus nombres de la misma forma como lo hacen en todas sus publicaciones y seguir el formato establecido al inicio del instructivo. Cada autor debe presentar la siguiente información: la unidad a la que está adscrito (departamento, centro de investigación, facultad, etc.); la entidad a la que está afiliado (universidad, empresa privada, etc.); el país al que corresponde y por último el correo del autor de correspondencia el cual debe estar indicado con un (*).

Los autores y coautores de la UTP deben utilizar el nombre completo de la universidad y sin traducirlo a otro idioma. En otras palabras, la entidad de afiliación es “Universidad Tecnológica de Panamá”. Esta medida contribuye positivamente en el conteo por entidad que realiza SCOPUS u otras herramientas, tales como: *Research ID*¹ y *WoS*².

2.4 Encabezado de Página de la primera página

No modificar.

2.5 Pie de página de la primera página

No modificar.

2.6 Cuerpo del manuscrito

Los componentes principales del manuscrito deben dividirse en secciones con un uso apropiado de títulos y subtítulos, según lo requiera la organización y el desarrollo lógico del material.

2.6.1 Texto principal

Escriba el texto principal en Times New Roman 11-puntos y a espacio sencillo. Los párrafos deben iniciar con una sangría de 0.5 cm. Además, el texto debe estar completamente justificado, **no** debe agregar espacios en blanco entre los párrafos de cada sección y los extranjerismos (solo aplica para artículo en español) no adaptados deben escribirse en cursiva.

2.6.2 Cabeceras de primer nivel, cabeceras de segundo nivel y viñetas

Una cabecera de primer nivel debe estar en Times New Roman 12 puntos, negrita, la letra inicial en mayúscula y a la izquierda de la columna. Ejemplo: ver el título de la sección 1 (introducción) del presente instructivo. Recuerde utilizar un punto (.) después de la numeración, no una coma (,). El texto del contenido va en la siguiente línea, recuerde mantener la sangría.

Una cabecera de segundo nivel debe estar en Times New Roman 11 puntos, negrita, la letra inicial en mayúscula y a la izquierda de la columna. Ejemplo: ver el título de la sección 2.3. El texto del contenido va en la siguiente línea, recuerde mantener la sangría.

Es importante indicar que estas especificaciones también aplican para las cabeceras de tercer nivel y su contenido. Además, la numeración de estas cabeceras no culminan con un punto. Las viñetas deben justificarse a la izquierda y a espacio sencillo. La sangría entre la viñeta y el texto es de 0.5 cm.

Nota: las secciones principales y subsecciones deben estar separadas mediante un interlineado sencillo (espacio en blanco) de tamaño 11 puntos. Además, escriba un texto entre el título de una sección y una subsección o entre subsecciones, no deje ese espacio en blanco, ver ejemplo entre las subsecciones 2.4 y 2.4.1.

2.6.3 Enumeración de páginas, encabezados y pies de páginas

Enumere sus páginas en el borde inferior derecho, ejemplo: 1, 2, 3,..., n páginas. No utilice encabezados ni pies de páginas. Si necesita pie de página, colóquelo en la parte inferior de la columna en la cual se hace referencia con el siguiente formato: Times New Roman de 9 puntos y espacio sencillo. Para facilitar la lectura, se recomienda evitar el uso excesivo de pies de página e incluir observaciones entre paréntesis, ejemplo: (como se ilustra aquí...).

2.6.4 Ecuaciones

Si está utilizando *Microsoft Word*, use *Microsoft Editor de Ecuaciones* o el complemento *MathType* (www.mathtype.com) para ecuaciones en su artículo. Las variables, números y texto deben ser en Times New Roman 11 puntos.

Pasos para insertar ecuaciones:

- Microsoft Editor de Ecuaciones: *Insert/Insertar - Object/Objeto - Create New/Crear Nuevo - Microsoft Equation/Microsoft Editor de Ecuaciones.*
- MathType: *Insert/Insertar - Object/Objeto - MathType.*

La ecuación debe estar centrada y con su correspondiente numeración alineada a mano derecha, como se muestra a continuación,

$$C = W \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad (1)$$

Enumere las ecuaciones en forma consecutiva entre paréntesis. Use paréntesis para evitar ambigüedades en los denominadores. Utilice punto al final de la ecuación cuando ellas sean parte de una oración, como

$$\int_0^2 F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma_2 / (2\mu_0)] \cdot \int_0^\infty \exp(-\lambda |z_j - z_i|) \lambda^{-1} J_1(\lambda r_2) J_0(\lambda r) d\lambda. \quad (2)$$

Los símbolos de las ecuaciones deben ser definidos antes o inmediatamente después de la ecuación; utilice letra cursiva y 11 puntos. Para la definición utilice letra normal y 11 puntos. En cuanto a la referencia de la ecuación dentro del contexto del artículo deben ir en minúscula y sin punto al finalizar el texto. Por ejemplo: “En la ecuación 1 se muestra el resultado estimado” o “En la ecuación (1) se muestra el resultado estimado”.

No se aceptan las abreviaciones de las ecuaciones como: “a ec. (1)”, “eq. #1” o “ecuación N°1”. Además, las ecuaciones extraídas de fuentes externas deberán ser citadas en el texto.

2.6.5 Imágenes y fotografías

Las imágenes y fotografías deben estar centradas en el artículo formando parte del texto. En cuanto a numeración, título y leyenda, ver la siguiente sección.

Si alguno de los elementos mencionados no puede ser ajustado en las columnas, entonces debe centrarlo en la parte superior de la página con su respectivo título y leyenda. Después, deben seguir las columnas del artículo en la parte inferior.

Las fotografías e imágenes (tablas, diagramas, gráficos y ecuaciones) deben tener una resolución mínima de 300 ppp (píxeles por pulgada) o dpi (*dots per*

inch). Procure que la resolución de las imágenes facilite el envío del artículo a través de la plataforma.

No hay un límite en cuanto a la cantidad máxima de imágenes permitidas. Sin embargo, límitese a incluir las imágenes y ecuaciones más esenciales o novedosas.

Si su artículo es aprobado por el Comité Editorial para su publicación, entonces, debe seguir las instrucciones de la sección 4.

2.6.6 Leyendas de figuras y títulos de las tablas

Las leyendas de figuras y títulos de las tablas deben ser en Times New Roman de 10 puntos. La primera palabra de la leyenda debe iniciar con letra mayúscula. Las palabras “Figura” y “Tabla” deben ser en negrita, incluyendo el número de secuencia y el punto.

Las figuras y tablas deben enumerarse separadamente y llevar su respectiva secuencia, ejemplo: “**Figura 1.** Diagrama de control” y “**Tabla 1.** Mediciones en campo”. Las leyendas de las figuras se colocan *justificadas* debajo de la imagen y los títulos de las tablas se colocan *centrados* arriba de las tablas.

2.7 Secciones usuales de un artículo

Las secciones más usuales de un artículo científico, pero NO limitantes, son las siguientes:

2.7.1 Introducción

Debe ubicar al lector en el contexto del trabajo:

- La naturaleza del problema cuya solución o información se describe en el documento.
- El estado del arte en el dominio tratado (con sus respectivas referencias bibliográficas).
- El objetivo del trabajo, su relevancia y su contribución en relación al estado del arte.
- Descripción de la estructura del artículo.

2.7.2 Materiales y métodos

Es importante presentar el diseño y tipo de investigación, pasos de la investigación, materiales y métodos. Además, el autor debe incluir los criterios de la selección del material tratado, los controles, estudios planeados y realizados.

2.7.3 Resultados

Los resultados deben presentarse en orden lógico acorde a la metodología planteada. Usar tablas y figuras cuando sea posible para presentar los resultados de forma clara y resumida. Además, las referencias de

tablas y figuras dentro del contexto del artículo deben ir en minúscula y sin punto al finalizar el texto. Ejemplo: En la figura 2 se muestran las mediciones realizadas en el período de enero a marzo.

Tenga mucho cuidado en el texto del artículo al usar porcentajes o estadísticas con un pequeño número de muestras. Incorrecto: "El 60% (3/5) de las muestras de David y el 20% (1/5) de Santiago han demostrado resistencia a los medicamentos." Correcto: "Tres de cada cinco ejemplares de David y 1 de cada 5 ejemplares de Santiago han demostrado resistencia a los medicamentos."

Cuando un número empieza una oración entonces debe escribirlo en letras. Además, utilice numerales cuando las cifras sean mayores que 10.

Posterior a la presentación de los resultados, se destacarán y discutirán los aspectos más importantes del trabajo. Toda afirmación debe estar avalada por los resultados obtenidos. Y por último, comparar los resultados obtenidos con estudios previos.

Se recomienda extremar el poder de síntesis evitando repeticiones innecesarias. Además, las unidades numéricas con su respectiva magnitud deben estar unidas. Ejemplo: 30°C o 25%.

2.7.4 Conclusiones

Deben ser enunciadas con claridad y deben cubrir:

- Las contribuciones del trabajo y su grado de relevancia.
- Las ventajas y limitaciones de las propuestas presentadas.
- Referencia y aplicaciones de los resultados obtenidos.
- Recomendaciones para futuros trabajos.
- Impacto sobre la comunidad científica.

2.7.5 Agradecimiento

Utilice el término en singular como encabezado, aun cuando sean muchos agradecimientos. En esta sección se recomiendan las siguientes expresiones: "Agradecemos a Juan Pérez por su asistencia técnica" o "Agradecemos también a nuestro colaborador Carlos Pérez de la Dirección de Investigación en la Universidad Tecnológica de Panamá". El reconocimiento a patrocinadores por el apoyo financiero se indica en esta sección, ejemplo: "Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional bajo contrato...".

2.7.6 Referencias

Las referencias se identificarán en el texto mediante números arábigos entre corchetes, alineados con la escritura. Se enumerarán por orden de aparición en el texto al final del trabajo. Las listas de referencias deben seguir el estilo de la **IEEE**. El autor tiene la libertad de utilizar un administrador de fuentes bibliográficas que incluyen los procesadores de texto o un *software* específico. La letra debe estar en Times New Roman 9 puntos.

El autor es responsable de la exactitud del contenido y citación de todas las referencias. Todas las referencias deben ser citadas en el documento. Los números de las referencias en el texto deben colocarse entre corchetes.

A continuación, se detallan algunos ejemplos de citaciones:

Citación de un artículo

- [1] G. Pevere. "Infrared Nation," The International Journal of Infrared Design, vol. 33, pp.56-99, Jan. 1979.

Citación de un libro

- [2] W.K. Chen. *Linear Networks and Systems*. Belmont, CA: Wadsworth, 1993, pp. 123-35.

Citación de un documento electrónico

- [3] A. Paul. (1987, Oct.). "Electrical properties of flying machines." Flying Machines. [Online]. 38(1), pp. 778-998. Available: www.flyingmachjournal/properties/fly.edu [Dec. 1, 2003].

2.7.7 Apéndice

El apéndice consiste en la presentación de cualquier otro material que impida el desarrollo continuo del artículo, pero puede ser importante para justificar los resultados del trabajo.

3. Normas para la recepción de los artículos

La RIDTEC es una **revista abierta** de publicación semestral, por lo tanto, extendemos una cordial invitación a todos los autores interesados en publicar artículos científicos (ver definición en la sección 4) sobre los avances y los resultados de sus proyectos de investigación.

Las áreas de investigación de interés, pero no limitantes, han sido definidas por la UTP con la finalidad de abarcar los campos del conocimiento a nivel internacional han identificado en los sectores económico, social, científico y tecnológico:

- Agricultura y Agroindustria
- Astrofísica
- Biotecnología

- Cambio climático y meteorología
- Ciencias físicas y sistemas ambientales
- Geología
- Hidrología tropical
- Infraestructura.
- Instrumentación nuclear
- Logística y Transporte
- Proceso de Manufactura y Ciencia de los Materiales
- Sistema marino costero
- Tecnologías de Energías Renovables e Ingeniería Ambiental
- Tecnologías de la Información y Comunicación.
- Robótica, Automatización e Inteligencia Artificial.

Los autores de artículos pueden ser docentes, investigadores, estudiantes universitarios de pregrado y postgrado con orientación de un profesor tutor. Además, los interesados pueden ser profesionales de entidades públicas (autónomas y semiautónomas) y entidades privadas, ya sean, nacionales e internacionales. Los estudiantes de pregrado con interés de publicar pueden enviar sus trabajos a la Revista de Iniciación Científica de la UTP (<http://revistas.utp.ac.pa/index.php/ric>).

El autor puede encontrar en el portal de la RIDTEC (<http://revistas.utp.ac.pa/index.php/id-tecnologico>) los siguientes ítems:

- Miembros del CE.
- Ediciones anteriores.
- Instructivo para autores.
- Objetivos, alcance, misión y temática.
- Política editorial de la revista.
- Declaración de ética de publicación de la revista.
- Plataforma para la recepción de artículos.
- Fechas de convocatorias para la recepciones de los artículos.

El autor debe enviar una primera versión de su artículo durante el periodo establecido, y cumplir con los siguientes criterios de preselección:

Criterio 1

El autor debe utilizar el formato establecido en el instructivo para estructurar su artículo y enviarlo a través de la plataforma para la recepción de artículos. Los artículos recibidos en la plataforma, pasada la fecha límite de la convocatoria, pasarán al estatus de “espera” para formar parte de la próxima convocatoria. El archivo del artículo debe cumplir con las siguientes

características: formato .doc o .docx y no debe superar los 65MB.

Criterio 2

El artículo emitido debe corresponder a la cobertura temática de la RIDTEC, y abarcar las áreas temáticas orientadas a las ciencias e ingenierías.

Criterio 3

El artículo debe pasar por un proceso de comprobación de originalidad, la RIDTEC hace uso de la herramienta web Paper Rater (acceso libre) y el *software* de detección de plagio, el cual permite garantizar la originalidad del trabajo escrito antes de la publicación.

No existe un límite para el envío de artículos por autor. Sin embargo, si dos o más artículos de un autor son aceptados entonces solo se publicará un artículo por número y los demás artículos en los siguientes números.

Nota: El autor solo puede modificar o retirar el artículo antes de la fecha establecida para el corte de la recepción. Esto implica que el artículo no puede ser reemplazado durante el proceso de evaluación o retirado si es recomendado para su publicación.

4. Evaluación y aceptación de artículos

Cada artículo será evaluado mediante el método de “revisión por pares doble ciego”, para garantizar un proceso de evaluación libre de sesgo o conflictos de intereses. Los criterios de evaluación son los siguientes: Originalidad, Relevancia, Calidad y Presentación (redacción y claridad de las secciones). Cada criterio será calificado como: Muy Alto, Alto, Bueno, Suficiente, Promedio, Débil o Deficiente. Dependiendo de esta calificación, el evaluador elegirá una de las siguientes alternativas: 1) se recomienda con modificaciones menores, 2) se recomienda con modificaciones mayores o, 3) no se recomienda. Además, el evaluador emite sus observaciones y recomendaciones, las cuales van dirigidas al autor y también al comité editorial. Para sustentar la evaluación del manuscrito, al artículo se le asigna un puntaje (0, 1 y 2), donde 0 representa a consideración del evaluador, que el artículo no se recomienda, 1 si el artículo se recomienda con modificaciones mayores y 2 si se recomienda con modificaciones menores. De esta manera el puntaje dado por cada evaluador se suma y divide entre la cantidad de evaluadores asignados al artículo emitido a revisión, así el resultado es un

promedio que podría variar entre 0 y 2. Este promedio determina si un artículo tendrá prioridad para ser publicado. Los artículos que fueron aprobados, pero no publicados en el actual número, pasarán al estatus de “espera” hasta el próximo número. Los dictámenes finales serán emitidos por el Comité Editorial (CE) de la RIDTEC. Esto implica que el artículo no puede ser reemplazado durante el proceso de evaluación o retirado si es recomendado para su publicación, de lo contrario se aplicará un periodo de embargo (no podrá remitir artículos en la revista dentro de seis meses “un semestre”).

Si el dictamen final (opinión de ambos evaluadores y el CE) consiste en no recomendar un artículo para su publicación, se procede con devolverlo al autor con el informe de evaluación notificándole sobre las debilidades de fondo y forma. Un dictamen final de este tipo se sustenta con los siguientes puntos: el trabajo no incorpora el componente de ingeniería, deficiencias en la redacción y claridad de las secciones, no hay una contribución original y significativa al área del conocimiento. Sin embargo, si existe una contradicción entre los evaluadores entonces se recurrirá a un tercer evaluador para definir la evaluación.

En el caso de que el artículo sea recomendado para su publicación, se procede con devolver el artículo y el informe de evaluación. El autor debe mejorar el documento y remitirlo con la información de los autores en un plazo no mayor de **15 días** al correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa

Posterior a la aceptación de los ajustes en el artículo por parte del CE, el autor principal recibirá una certificación sobre la publicación de su artículo en la RIDTEC. Además, el autor debe entregar los archivos al correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa o enviar un disco (CD o DVD) con sus respectivas imágenes o gráficos originales para la diagramación del artículo. En el caso de enviar un disco, este debe incluir los siguientes datos:

- Número de identificación del artículo (ID)
- Título del artículo
- Nombre del autor principal.

¿Qué queremos decir con una "**imagen original**"? Según nuestras experiencias con ediciones anteriores, se recomienda generar un PNG o JPG de la imagen con el *software* utilizado para crear dicha imagen y con una resolución **mínima de 300 ppp**. Ejemplos del concepto

"original": si la imagen es creada en *Autocad* entonces usted debe generar el archivo PNG o JPG de la imagen a partir del *Autocad*.

No se recomienda exportar la imagen a otra aplicación para generar el PDF porque puede afectar considerablemente la calidad de la imagen y complicar la tarea de diagramación. Ejemplo: exportar la imagen del *Autocad* e importarla en *Word* o *power point*.

Cada imagen debe aparecer en un archivo PNG o JPG por separado y debidamente identificada para facilitar el reemplazo en el artículo.

Nota: El autor es responsable de garantizar el cumplimiento de los requisitos establecidos para las imágenes. En caso contrario, el artículo quedará en cola de espera para su publicación.

5. Prioridad de publicación

La prioridad de publicación se va a regir por los siguientes criterios:

- Por impacto.
- Por tiempo de recepción del artículo.
- Enfoque de la temática.

Si un artículo tiene una mayor puntuación en base a estos criterios este tendrá prioridad para ser publicado, los otros artículos que fueron aprobados, pero no publicados en el actual número estarán en el estatus de **espera** hasta el próximo número.

6. Política de acceso y reúso

Los artículos científicos publicados en la RIDTEC son de exclusiva propiedad de sus autores. Todas las opiniones y contenidos expresados en la revista pertenecen a sus autores, siguiendo los lineamientos del documento "**Declaración de ética de publicación**", la UTP declina de toda responsabilidad por los derechos que pudiera derivarse de la lectura, interpretación y uso del contenido de los trabajos publicados.

Los autores deben acatar el principio de libre acceso en revista científicas. Por lo tanto, todos los contenidos deben estar disponibles gratuitamente al público, con el objetivo de fomentar un intercambio de conocimiento científico-académico internacional mediante nuestra plataforma Open Journal System (OJS).

7. Correspondencia o comunicaciones

Para la correspondencia, suscripciones o envío de documentación, sírvase hacerlo a siguiente dirección:

Universidad Tecnológica de Panamá

Editorial Tecnológica

Apartado 0819-07289, El Dorado, Ciudad de Panamá, República de Panamá

Además, para una comunicación directa, usted puede escribirnos al siguiente correo electrónico revista.idtecnologico@utp.ac.pa

8. Conceptos fundamentales de interés

Esta sección tiene el objetivo de ilustrar a nuestros autores y lectores sobre conceptos fundamentales de investigación y desarrollo experimental (I+D)³, y redacción científica⁴.

La I+D comprende el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos, incluido el conocimiento del hombre, la cultura y la sociedad, y el uso de esos conocimientos para crear nuevas aplicaciones.

El término I+D engloba tres actividades: investigación básica, investigación aplicada y desarrollo experimental. A continuación se definen cada una de estas actividades.

- La **investigación básica** consiste en trabajos experimentales o teóricos que se emprenden principalmente para obtener nuevos conocimientos acerca de los fundamentos de los fenómenos y hechos observables, sin pensar en darles ninguna aplicación o utilización determinada.
- La **investigación aplicada** consiste también en trabajos originales realizados para adquirir nuevos conocimientos y está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico.
- El **desarrollo experimental** consiste en trabajos sistemáticos que aprovechan los conocimientos existentes obtenidos de la investigación y/o la experiencia práctica, y está dirigido a la producción de nuevos materiales, productos o dispositivos; a la puesta en marcha de nuevos procesos, sistemas y servicios, o a la mejora de los ya existentes.

En cuanto a la redacción científica, su característica fundamental es la claridad. El éxito de la experimentación científica es el resultado de una mente clara que aborda un problema claramente formulado y llega a unas conclusiones claramente enunciadas. Idealmente, la claridad debería caracterizar todo tipo de comunicaciones; sin embargo, cuando se dice algo por primera vez, la claridad es esencial.

La mayoría de los artículos científicos publicados en las revistas de investigación primarias se aceptan

precisamente porque aportan realmente conocimientos científicos nuevos. Por ello, debe exigirse una claridad absoluta en la redacción científica. Para una mejor comprensión entre los tipos de trabajos científicos, presentamos las siguientes definiciones:

- **Artículo científico:** informe escrito y publicado que describe resultados originales de una investigación.
- **Artículo de revisión:** no es una publicación original y su estructura es diferente a la de un artículo de investigación. Ofrece una evaluación crítica de los trabajos publicados y llegan a conclusiones importantes.
- **Ensayos cortos:** son el resultado de un examen crítico de artículos de investigación científica publicados, en donde se resaltan los trabajos más importantes o los que han brindado mayor aporte al conocimiento en una área determinada.

Los conceptos fueron extraídos de los siguientes documentos:

¹<http://www.researcherid.com/>, Thomson Reuters

²<https://www.recursoescientificos.fecyt.es/>, FECYT

³"Manual de Frascati", 2003, FECYT y Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE).

⁴"Cómo escribir y publicar trabajos científicos", 2005, Roberto Day

VIII Congreso Internacional de Ingeniería, Ciencias y Tecnología-IESTEC

8th International Engineering Science and Technology Conference

**"Ciencia, Tecnología, Sostenibilidad e Innovación:
Pilares para la recuperación económica"**

19 al 21 de octubre de 2022

Wyndham Panamá Hotel Albrook Mall



    @CongresoUTP

LLAMADO A PONENCIA

ENTREGA DE ARTÍCULOS- <http://congreso.utp.ac.pa>

ÁREAS DE INTERÉS:

- ◆ Ciencia e Ingeniería de Materiales, Ciencias Básicas y Espaciales
- ◆ Biociencias, Biotecnología, Biomedicina y Agroindustrias
- ◆ Robótica, Percepción e Inteligencia Artificial
- ◆ Energía y Ambiente
- ◆ Educación en Ingeniería y Ciencias Sociales
- ◆ Infraestructura, Construcción y Edificaciones
- ◆ Logística, Innovación y Ciencias Empresariales
- ◆ Sistemas Inteligentes y TIC

FECHAS IMPORTANTES:

- | | |
|-------------------------|---|
| ◆ 18 de julio 2022 | Último día para la subida de artículo |
| ◆ 5 de septiembre 2022 | Notificación a los autores |
| ◆ 19 de septiembre 2022 | Último día para subir la versión final del artículo |
| ◆ 30 de septiembre 2022 | Último día de registro con descuento |

Para que su ponencia sea incluida en el programa de **IESTEC-2022 (International Engineering Science and Technology Conference)**, por lo menos uno de los autores, debe estar registrado y haber pagado a más tardar el 7 de octubre de 2022.

2.º Encuentro Científico Académico (ECA 2022), UTP:





Portal de REVISTAS ACADÉMICAS UTP



Bienvenido al Portal de Revistas Académicas (Investigación, Académica, Cultural, Congresos Nacionales e internacionales) de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP).

Este sitio nace como una iniciativa del proyecto UTP-Ridda² para mostrar la producción científica e investigativa desarrollado por los docentes, investigadores y estudiantes de la UTP. Este proyecto es desarrollado por la Vicerrectoría de Investigación, Postgrado y Extensión, Editorial Universitaria y la Dirección de Comunicación Estratégica, con el apoyo de las principales autoridades de nuestra Universidad.

El objetivo de esta plataforma es visibilizar la producción científica en las revistas científicas en vías de mejorar el alcance de las publicaciones a nivel nacional e internacional a través de la integración en directorios, bases de datos, catálogos e indexaciones.

A partir del 2018 las publicaciones de los volúmenes de las revistas I+D Tecnológico, Prisma Tecnológico y la Revista de Iniciación Científica (RIC) se les asignará un DOI (Digital Object Identifier).



I+D Tecnológico

ISSN: 1680-8894
E-ISSN: 2219-6714



Prisma Tecnológico

ISSN: 2076-8133
E-ISSN: 2312-637X



Revista de Iniciación Científica

ISSN: 2412-0464
E-ISSN: 2413-6786



Revista RETOS XXI

ISSN: 2524-1125
E-ISSN: 2524-1133



El Tecnológico

ISSN: 1819-9623
E-ISSN: 1819-9623

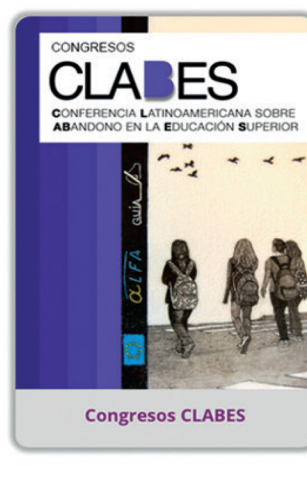


Cultural Maza

ISSN: 1018-1563
E-ISSN: 1018-1563



Memorias de Congresos UTP



Congresos CLABES

Visítenos en:

<http://www.revistas.utp.ac.pa>

No es necesario registrarse para tener acceso a los contenidos de las revistas



Universidad Tecnológica de Panamá
Campus Universitario Dr. Víctor Levi Sasso,
Edificio Administrativo
Teléfono: (507) 560-3703 | Telefax 560-3442
Correo Electrónico: editorial@utp.ac.pa
Web: www.utp.ac.pa
Apartado Postal 0819-07289 El Dorado,
Panamá, República de Panamá.