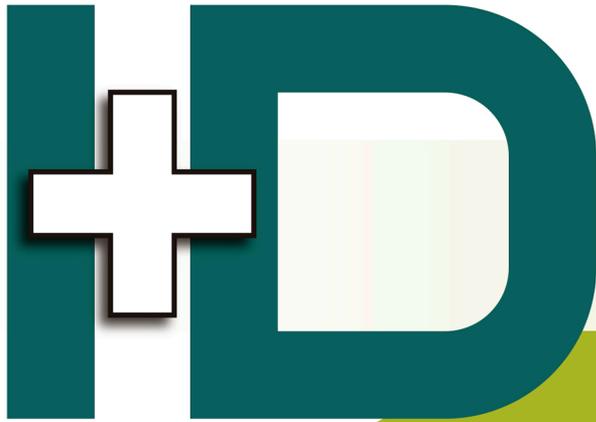


Revista de



TECNOLÓGICO

RIDTEC | Vol. 17, N.º 1, 2021, enero – julio 2021

P-ISSN 1680-8894

E-ISSN 2219-6714

Edición Semestral

Publicación Regional



PKP|INDEX



MIAR



Revista de I+D Tecnológico: revista de investigación en la Universidad Tecnológica de Panamá. - Vol. 16 , no. 2 (ene. - jun. 2021). - 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

Botasso Dr. Hugo Gerardo¹¹

Soporte técnico y bibliometría

Ing. Danny Murillo¹²

Ing. Dalys Saavedra¹²

Dirección de Comunicación Estratégica

Mgter. Danilo Toro¹³

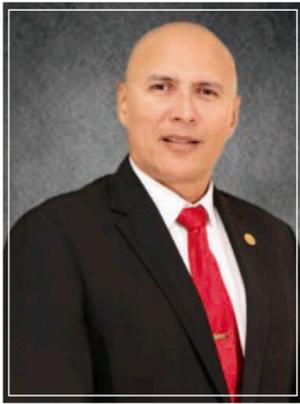
Dra. Libia Batista¹⁴

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.



Presentación

por Ing. Orlando Aguilar, Ph.D.

Editor en jefe, Revista de I+D Tecnológico
Universidad Tecnológica de Panamá
Enero, 2021

La Universidad Tecnológica de Panamá (UTP) presenta a la comunidad científica y público en general, la primera edición del año 2020, de la Revista de I+D Tecnológico (RIDTEC), volumen 17, Número 1. 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 tiene como objetivo analizar la situación ambiental y las potencialidades de aplicación de alternativas de producción más limpia (PML) en la destilería de aguardiente “Puro Puyo”, ubicada en la Finca “Santa María”.

El segundo trabajo describe las características y aplicaciones de las baterías de iones de litio y, los aspectos relevantes de un sistema de gestión de baterías, herramienta necesaria para salvaguardar el funcionamiento y vida de la batería.

El tercer artículo propone un conjunto de requisitos específicos que sintetizan las buenas prácticas de pruebas de software, diseñado para formar parte de los procesos base del Modelo de Calidad para el Desarrollo de Aplicaciones Informáticas (MCDAI), basado en las buenas prácticas de los modelos y normas de referencia.

El cuarto trabajo presenta una metodología para minimizar la desviación de las magnitudes de los perfiles de voltaje analizando el comportamiento mediante programación no lineal en los modelos de 14 y 30 barras del Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

El quinto artículo muestra como el problema de discrepancia EELS-óptica notados mediante estudios EELS en nano esferas de plata de tamaños inferiores a 10 nm, reportando resultados contradictorios a los obtenidos en décadas pasadas por la conocida técnica de absorbancia óptica.

El sexto trabajo investiga sobre la identificación de especies, genes y productos con usos actuales o potenciales en planteles mineros artesanales de Nicaragua.

El siguiente artículo muestra el diseño conceptual de la primera misión del Programa Espacial TEPEU, basada en el desarrollo de un satélite pequeño de órbita baja, con el objetivo de desarrollar modelos matemáticos y computacionales que describan fenómenos

naturales relacionados con la estimación de fenómenos geofísicos y su correlación con el comportamiento de capas atmosféricas.

El octavo trabajo muestra una evaluación de los resultados del consumo de energía eléctrica con el fin de alcanzar condiciones óptimas de confort, proponiendo el modelo Gauss T-Student, en Guayaquil-Ecuador.

El noveno artículo presenta una revisión de las metodologías para realizar una planificación de la restauración óptima de la SEP basado en criterios de calidad de energía y estabilidad después de una falla debido a problemas que causan corte parcial de energía en ciertos puntos de la red.

El décimo trabajo presenta un análisis de la utilización de materiales aislantes térmicos, en el consumo de energía durante un año, en un recinto del Centro Regional de Azuero de la Universidad Tecnológica de Panamá, contemplando dos materiales comerciales: poliestireno expandido y el gypsum con lámina de aluminio.

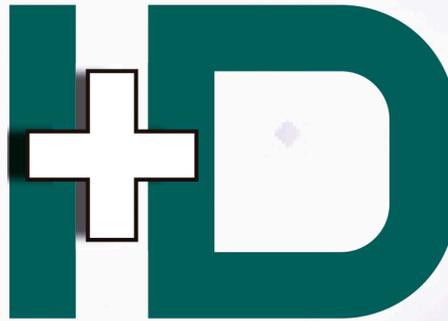
El siguiente trabajo utilizó los análisis fisicoquímicos, espectroscopía infrarroja de transformada de Fourier (FTIR) y microscopía electrónica de barrido (SEM), para visualizar la conducta del hormigón expuesto en tres estaciones en Panamá que experimentan diferencias ambientales.

El duodécimo trabajo presenta el estado del arte de un despacho óptimo de energía en plantas virtuales de generación (VPP) y metodologías para incluir este nuevo concepto dentro de los sistemas eléctricos de potencia.

El decimotercer artículo está relacionado con síntesis y caracterización de membranas piezoeléctricas en base al polímero polifluoruro de vinilideno (PVDF), utilizando la técnica de electrospinning.

El siguiente trabajo presenta un marco de referencia basado en análisis exergéticos para evaluar la eficiencia y nivel de sostenibilidad de motores de combustión interna (MCI).

Para finalizar, el último artículo presenta un estudio de la interoperabilidad de objetos de aprendizaje en la plataforma Canvas, utilizando SCORM y el estándar IEEE 1484.12.1



Contenido

5

Alternativas de producción más limpias para la destilería "Puro Puyo", Pastaza, Ecuador

Cleaner production alternatives for the "Puro Puyo" distillery, Pastaza, Ecuador

Víctor Paul Carvajal-Padilla | Robinson Rigoberto Ambuludi-Paredes | Erika Amabel Chele-Yumbo | Liliana Bárbara Sarduy - Pereira | Karel Diéguez-Santana

14

Baterías de Ion Litio: características y aplicaciones

Lithium Ion Batteries: features and applications

Vanessa Quintero | Osvaldo Che | Eleicer Ching | Orlando Auciello | Elida de Obaldía

23

Proceso de pruebas de software para un modelo de calidad en Cuba

Process of software testing for a model of quality in Cuba

Lisandra Díaz Figueredo | Yoandy Lazo Alvarado | Leanet Tamayo Oro

36

Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC

Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC

Jhon Ramirez | Diego Carrión | Esteban Inga

45

Interacción de electrones rápidos con esferas de plata sub-10 nm: resultados recientes

Interaction of fast electrons with sub-10 nm silver spheres: recent results

Alfredo Campos | Matthias Hillenkamp | Mathieu Kociak

54

Identificación molecular de microorganismos aislados en planteles mineros artesanales de Nicaragua

Molecular identification of microorganisms isolated in handmade mining plants of Nicaragua

Leandro Páramo Aguilera

65

TEPEU- I: Misión espacial latinoamericana con fines científicos y de validación tecnológica

TEPEU-I: Latin American space mission for scientific and technological validation

Mario Alberto Mendoza-Bárceñas | Rafael Prieto Meléndez | Omar Álvarez-Cárdenas | Javier Arellano-Verdejo | Alejandro Padrón-Godínez

75

Evaluación del consumo de energía eléctrica de acuerdo a la arquitectura bioclimático mediante el Modelo ASHRAE y Gauss T-Student

Evaluación del consumo de energía eléctrica de acuerdo a la arquitectura bioclimático mediante el Modelo ASHRAE y Gauss T-Student

Cristian Cristóbal Cuji Cuji | Henry David Sisa

87

Revisión para la restauración óptima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad

Review optimal restoration of the operation in electric power systems based on stability and energy quality criterion

Diego Carrión Galarza | Jaime Francisco Quinteros Flores | Paul Andres Masache Almeida

Contenido

- | | | | |
|-------------------|--|-------------------|---|
| <p>96</p> | <p>Predicción de consumo energético y su relación con la medida de conductividad térmica de materiales aislantes Energy consumption prediction and its relationship with thermal conductivity measurement of insulating materials Rolando Carvajal José Luis Solís Héctor Vergara Nacarí Marín</p> | <p>122</p> | <p>Síntesis y caracterización de membranas piezoeléctricas en base al polímero fluoruro de polivinilideno, utilizando la técnica de electrospinning Synthesis and characterization of piezoelectric membranes in based on the polyvinylidene fluoride polymer, using electrospinning technique Adrián Miranda Aurelio Boya Elida de Obaldía</p> |
| <p>103</p> | <p>Conducta del concreto reforzado bajo el efecto de diferentes microclimas Behavior of reinforced concrete under the effect of different microclimates Alda Cedeño</p> | <p>132</p> | <p>Inspección del uso de la exergía en el marco de la sostenibilidad: Un caso aplicado a la combustión interna Inspection of Exergy usage under a Sustainability Framework: A Case of Application for Internal Combustion Mariana Bencid José Delgado Dafni Mora Miguel Alejandro Chen Austin</p> |
| <p>114</p> | <p>Estado del arte despacho óptimo de energía en plantas virtuales de generación basado en flujos dinámicos de potencia State of the art optimal energy dispatch in virtual generation plants based on dynamic power flows Darwin Mesías Canacuán Quishpe Diego Fancisco Carrión Galarza</p> | <p>140</p> | <p>Interoperabilidad de objetos de aprendizaje en la plataforma Canvas, utilizando SCORM y el estándar IEEE 1484.12.1 Interoperability of learning objects on the Canvas platform, using SCORM and the IEEE 1484.12 standard Rosa López P.</p> |

Indexadores



Repositorios



Directorios



Alternativas de producción más limpias para la destilería “Puro Puyo”, Pastaza, Ecuador

Cleaner production alternatives for the “Puro Puyo” distillery, Pastaza, Ecuador

Víctor Paul Carvajal-Padilla ¹, Robinson Rigoberto Ambuludi-Paredes ¹, Erika Amabel Chele-Yumbo ¹, Liliana Bárbara Sarduy-Pereira ², Karel Diéguez-Santana ^{1*}

¹ Facultad Ciencias de la Vida, Universidad Estatal Amazónica, Ecuador

⁴ Unidad Educativa Fiscomisional Cristóbal Colón, Ecuador

*Autor de correspondencia: karel.dieguez.santana@gmail.com

RESUMEN— La provincia Pastaza tiene sembrada alrededor de 4,500 hectáreas de caña de azúcar, que corresponde al 55% del total de la Amazonia, y la fabricación de aguardiente de caña de azúcar es una importante actividad económica. El objetivo de este documento fue analizar la situación ambiental y las potencialidades de aplicación de alternativas de producciones más limpias (PML) en la destilería de aguardiente “Puro Puyo”, ubicado en la Finca “Santa María”. Se realizó un diagnóstico inicial in situ de las condiciones del proceso. Se cuantificaron entradas y salidas, se elaboró un ecomapa con los puntos críticos, y se diseñaron tres opciones de PM para ser evaluadas. Los resultados del análisis de viabilidad técnica y económica, de las opciones de PML (recirculación de agua condensada, recuperación de calor y elaboración de compost) muestran que pueden ser favorables al proceso. Las opciones de PML a implementar tienen un incremento del 13.2% en la relación beneficio costo de la Finca “Santa María”. Adicionalmente, indicadores como el consumo de agua, diésel y gas licuado de petróleo (GLP), disminuyeron en un 65%, 70% y 57%, respectivamente, con beneficios económicos y ambientales por el consiguiente ahorro de recursos y disminución de emisiones. Finalmente, la implementación de PML en la destilería puede ser un paso fundamental para alcanzar un superior desarrollo económico y ambiental de las pequeñas y medianas empresas de la región.

Palabras clave— Análisis costo-beneficio, destilería artesanal, indicadores ambientales, Producción más limpia, recirculación.

ABSTRACT— The Pastaza province has planted around 4,500 hectares of sugar cane, which corresponds to 55% of the total in the Amazon, and the manufacture of sugar cane brandy is an important economic activity. The objective of this document was to analyze the environmental situation and the potentialities of applying cleaner production (CP) in the “Puro Puyo” distillery, located in the “Santa María” farm. An initial on-site diagnosis of the process conditions was made. Inputs and outputs were quantified, an ecomap with critical points was prepared, and three CP options were designed to be evaluated. The results of the technical and economic feasibility analysis of the CP options (condensed water recirculation, heat recovery and composting) show that they can be favorable to the process. The CP options to be implemented have an increase of 13.2% in the cost benefit ratio of the “Santa María” farm. Additionally, indicators such as the consumption of water, diesel, and liquefied petroleum gas (LPG), decreased by 65%, 70% and 57%, respectively, with economic and environmental benefits due to the consequent saving of resources and decrease in emissions. Finally, the CP implementation in the distillery can be a fundamental step to achieve superior economic and environmental development for small and medium-sized companies in the region.

Keywords— Cost-benefit analysis, Artisanal distillery, environmental indicators, Cleaner production, recirculation

1. Introducción

El aguardiente, puntas, o puro es una bebida que se elabora fermentados de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) de gran consumo por parte de la cultura popular ecuatoriana, su fabricación procede según

varios historiadores desde la conquista española, ya que utilizaban esta bebida para mantener subyugados a los esclavos de la época. En la actualidad se elabora en todas las provincias que tienen sembrados de caña y en los últimos años, se ha convertido en una actividad

Citación: V. Carvajal, R. Ambukudi, E. Chele, L. Pereira y K. Dieguez, “Alternativas de producción más limpias para la destilería “Puro Puyo”, Pastaza, Ecuador”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 15,7 no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 29 de marzo de 2020 **Recibido con correcciones:** 5 de enero de 2021. **Aceptado:** 5 de enero de 2021.

DOI.

Copyright: 2021 V. Carvajal, R. Ambukudi, E. Chele, L. Pereira y K. Dieguez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

económica de gran impacto en las provincias amazónicas [1].

La provincia Pastaza según la Asociación de Cañicultores de Pastaza (ASOCAP) produce el 54.40% de toda la caña de azúcar de la Amazonia Ecuatoriana, con un total de 4500 Ha de esta un 65% se utiliza para la fabricación de panelas y el 35% para la fabricación de aguardiente destilado de caña de azúcar, una cifra elevada si se tiene en consideración que las extensiones de superficie que se toman para el cultivo de caña de azúcar corresponde al 9.3% de la superficie habitable dentro de la provincia [2]. Una de las fábricas esta bebida artesanal destilada en producido en la Finca “Santa María” famosa por su marca conocida como “Puro Puyo”.

Aunque estudios mencionan que a pequeña escala se evitan gran parte de los impactos ambientales observados en la producción a gran escala de etanol [3], dado principalmente porque las agroindustrias a pequeña escala consumen menores cantidades de agua [4], también en la etapa agronómica implica un menor uso de fertilizantes, y se preservan mejor los servicios del ecosistema [5]. Aun así, estas instalaciones presentan gran cantidad de deficiencias, en el proceso no existe controles adecuados y periódicos en las cadenas de producción y se encuentra presente pérdidas muy considerables de materia prima y energía, y pueden generar variados impactos ambientales [6]. Curbelo and Acosta [7] mencionan que el bagazo, y la vinaza son los principales residuos resultantes de la producción de alcohol artesanal.

Un instrumento importante durante los últimos 25 años ha sido la aplicación del enfoque de producciones más limpias (PML), que ha demostrado resultados positivos en la mitigación de daños ambientales y la creación de beneficios económicos y sociales. Según Severo, et al. [8], las PML permiten optimizar la producción mediante la reducción del consumo de materia prima, agua y energía. En Ecuador, desde el 2013 el Centro Ecuatoriano de Eficiencia de Recursos y Producción más Limpia (CEER), promueve el uso eficiente de recursos y la implementación de las PML en los procesos productivos [9], sin embargo, pocos estudios han sido publicados, se ha analizado, por ejemplo, pequeñas manufacturas del sector textil [10], la producción de compost de residuos de camales [11], o granjas de crías porcinas [12], pero restan varios

sectores importantes sin ser analizados, como es el caso de la industria artesanal del alcohol.

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es analizar la situación ambiental y las potencialidades de aplicación de alternativas de producciones más limpias (PML) en la destilería de aguardiente “Puro Puyo”, ubicado en la Finca “Santa María”, Pastaza, Ecuador.

2. Materiales y métodos

2.1. Localización

La finca “Santa María” se encuentra ubicada en la Parroquia Puyo a 1 ½ km vía Puyo – Diez de Agosto, Cantón y Provincia Pastaza, Ecuador. Las características climáticas son de temperatura promedio de 21°C, precipitaciones altas de 2431mm al año, humedad relativa de hasta el 96% y una altitud de 923 msnm. Los suelos son de la clasificación inceptisoles, relativamente pobres en nutrientes pero ricos en drenaje, cualidades que convierten a la finca “Santa María” en un lugar idóneo para actividades agrícolas. La figura 1 muestra, su ubicación geográfica.

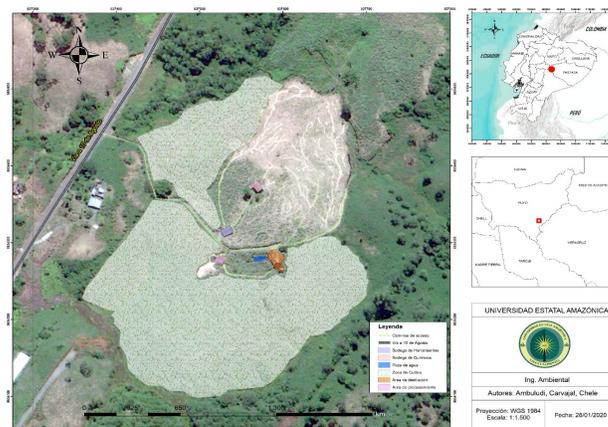


Figura 1. Mapa de ubicación de la Finca “Santa María” destilería “Puro Puyo”.

2.1 Criterios metodológicos del análisis de PML

Se analizaron las directrices del Programa de Producción más Limpia, diseñado por la Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONU DI), la guía de PML de Ecuador [13] y Bolivia [14] y otras literaturas de estudios de casos en Ecuador [10-12], y se dividió en 5 etapas.

Etapa I: Organización y definición de objetivos y metas de PML dentro de la política ambiental de la empresa: En esta parte inicial, se realiza un

acercamiento con el sector de la empresa, donde se exponen los beneficios económicos y ambientales que se pueden lograr con la aplicación de las PML, se organiza el equipo y sus funciones y se identifican los principales obstáculos y barreras. Se definen conceptos sobre la producción más limpia, las buenas prácticas en los sistemas de producción en análisis y la legislación ambiental aplicable para ese tipo de actividad económica [12].

Etapa II: Diagnóstico técnico – económico y ambiental preliminar de la empresa o proceso. En esta parte del procedimiento, se realiza el diagnóstico inicial, se obtiene información sobre la actividad, costos de materia prima e insumos, e información ambiental sobre aquellos procesos que generen impactos negativos al medio ambiente. La obtención de estos elementos se lleva a cabo mediante entrevistas, cuestionarios a los propietarios y trabajadores, etc. Se identifican puntos críticos, se cuantifican las entradas y salidas. y se contrasta con los reportes obtenidos en la primera fase de este trabajo. Posteriormente, se realiza un análisis de costo-ingreso para identificar los ingresos de la empresa y a partir de ese presupuesto incrementar medidas de mejoras al sistema productivo.

Etapa III: Evaluación técnico – económico y ambiental de la empresa. En esta etapa se elaboran los balances de materiales para las operaciones unitarias críticas, se cuantifican las condiciones del proceso mediante el registro de cantidades y costo de materiales, insumos y energía consumidos, de residuos, efluentes, emisiones, productos y subproductos generados, se estiman los costos derivados de las ineficiencias productivas. Se identifican las causas de las ineficiencias y se seleccionan las oportunidades a ser evaluadas en términos técnicos y económicos [13].

Etapa IV. Formulación de alternativas de producción más limpia: A partir de las deficiencias identificadas y las potenciales opciones de PML, estas se ponen en evaluación para valorar su implementación. Se realiza la viabilidad técnica, económica y ambiental de las mismas, así como se realiza la selección de las opciones de mejora factibles a implementar. Se evalúan la variación de los indicadores del proceso (productivo, técnico y ambiental).

3. Resultados

3.1 Etapa I Organización y definición de objetivos de PML

3.1.1 Descripción de la empresa. Política, organización

La microempresa de fabricación de aguardiente “Puro Puyo” es una empresa familiar, enfocada a que producto terminado sea de calidad para el consumidor y a asegurar el bienestar de los trabajadores. En su quehacer empresarial, se observan las variaciones de las tendencias de mercado, existe un trato justo a los clientes en cuestión de reclamos, solicitudes, etc. En el caso del personal laboral debe mantener en todo momento un comportamiento ético con sus semejantes. Mientras con relación al producto final pretende que cumpla con los estándares de calidad y normativas establecidas a nivel nacional e internacional.

La organización de la destilería de Puro Puyo está presidida por el gerente propietario, el cual tiene tres áreas fundamentales dentro del proceso de producción que son: el área marketing que está encargada de la publicidad del producto por todos los medios posibles de manera que este se dé a conocer tanto a nivel local, regional y nacional. La segunda área está conformada por el encargado de producción que tiene funciones sobre el correcto funcionamiento de las sub-áreas que son procesado, destilado, envasado y distribución para que al final de todos estos procesos se obtenga un producto de calidad. Mientras, la tercera área dentro de la empresa es el área económica, donde una especialista en contabilidad se encarga de manejar todos los recursos económicos de la destilería tanto ingresos como egresos de todo el proceso de producción.

3.1.2 Descripción del proceso

La destilería tipo artesanal “Puro Puyo” desarrolla el proceso en 4 etapas principales, que aparecen en figura 2 y se describen a continuación:

- Corte y traslado: En este proceso se selecciona la materia prima (caña de azúcar) que se encuentre en su etapa de maduración de manera que no altere la calidad y el sabor del producto final, el corte se realiza lo más bajo posible ya que el azúcar desciende por el tallo, mientras más azúcar se encuentre en la materia prima más alcohol se podrá obtener, una vez realizado el corte se traslada hasta el punto de molienda con ayuda de animales de carga.
- Molienda: La caña de azúcar se introduce en los rodillos del trapiche que son accionados por medio de

un motor, para lograr extraer toda la cantidad de jugo posible y por consiguiente obtener mayor cantidad de producto final y el bagazo resultante de este proceso se lo reutilizara con otros fines.

- **Fermentación:** En esta etapa del proceso los azúcares de la caña se transforman en alcohol etílico, para ello, el jugo de caña se dejar reposar durante 5 días, y en las condiciones del lugar, este proceso de fermentación se da de manera natural sin la adición de ningún tipo de levadura.

- **Destilación:** En este proceso se calienta el jugo de caña fermentado a altas temperaturas para que se evapore, de manera que este vapor pase por un serpentín, donde se utiliza agua fría para condensar el vapor con el objetivo de obtener el alcohol.

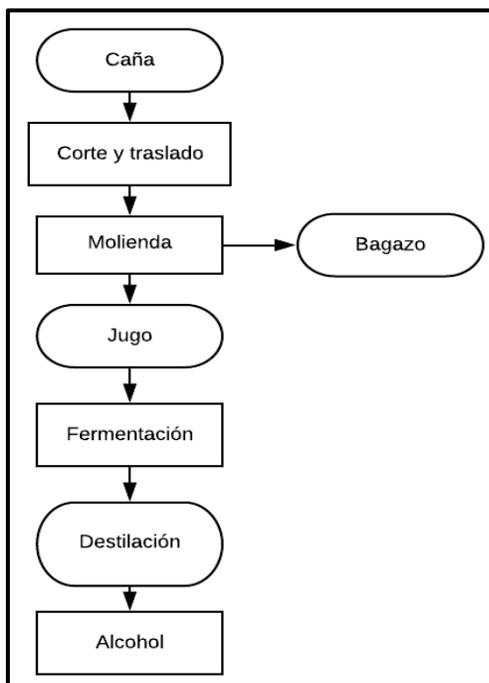


Figura 2. Proceso de elaboración de Puro Puyo.

3.2 Etapa II. Diagnóstico de Producción Más Limpia

En las visitas a la entidad se puede identificar las áreas y el personal clave que labora dentro de las instalaciones de la destilería “Puro Puyo”. Mediante encuestas, entrevistas a los responsables y trabajadores, se analizaron las diferentes actividades que se llevan a cabo dentro de la fábrica para identificar los aspectos e impactos ambientales que se generan, entre los principales tenemos a la generación de bagazo que causa contaminación al suelo y aire debido a que

al permanecer por mucho tiempo a la intemperie esta materia se descompone y producto de ello genera diferentes tipos de olores que afectan directamente al personal que se encuentra laborando en dichas instalaciones, además se pudo evidenciar otro tipo de aspectos e impactos ambientales los cuales se detallan en figura 3.

| | | | | |
|-------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|--|
| Producto/ Actividad/ Servicio | Extracción del jugo de caña | Destilación de licor | Destilación de licor | Abastecimiento de combustible a la caldera |
| Aspectos Ambientales | Generación de bagazo | Generación de agua caliente | Generación de vapor | Derrame de combustible |
| Impactos Ambientales | Contaminación de suelo y aire | Muerte de microorganismos | Contaminación atmosférica | Contaminación del suelo |

Figura 3. Principales aspectos e impactos ambientales en la producción de aguardiente Puro Puyo.

A partir de los resultados de las inspecciones y seguimiento del proceso, se lograron localizar los puntos de riesgo de la destilería de la finca “Santa María”, enfocados hacia la salud de los trabajadores, y el medio ambiente. La figura 4, muestra el ecomapa, donde los principales aspectos ambientales identificados dentro del proceso son el consumo de agua y energía, generación de residuos sólidos, ruido, generación de vapores, que pueden ser potencialmente disminuido con la implementación de estrategias de producción más limpia.

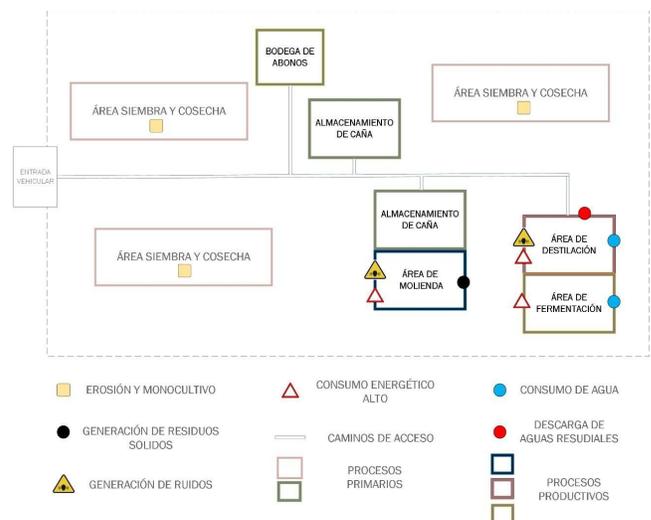


Figura 4. Ecomapa de los procesos encontrados dentro de la finca “Santa María”.

3.3 Etapa III. Evaluación técnica – económico y ambiental

Con la información previamente obtenida durante la inspección de la actividad se cuantificaron las entradas y salidas de los diferentes procesos que están inmersos en la fabricación del aguardiente, siendo los más importantes, la molienda, fermentación, destilación y condensación los cuales se reflejan en la Figura 5.

Para producir 380kg de aguardiente, se consumen 15790kg de caña, y se generan 3790kg de bagazo. Adicionalmente, en el proceso se generan cantidades elevadas de aguas residuales, pues los volúmenes de vinazas, provenientes de la destilación y algunos restos del proceso de fermentación, no están siendo dispuestas correctamente y son un problema ambiental en la finca, puesto que su vertido se hace directamente a suelos y cuerpos de agua adyacentes al lugar, donde pueden incrementar el potencial de acidificación y eutrofización [15], [16]. Aunque, resultados del monitoreo, presentaron que cumplían con los parámetros establecidos en el Acuerdo Ministerial 097-A, de descargas a cuerpos de agua dulce.

Mientras, la tabla 1, muestra las materias primas, insumos, energéticos, mano de obra, y otros gastos necesarios para un ciclo productivo semanal.

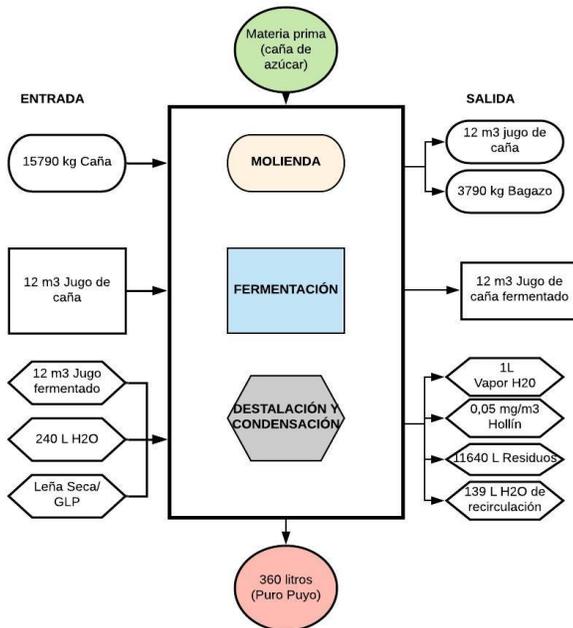


Figura 5. Análisis de procesos en la fabricación de aguardiente “Puro Puyo”.

Tabla 1. Balance de materias primas, insumos, consumos energéticos, gastos mensuales del proceso.

| Indicador | Unidad medida | Cantidad | Costo unitario, \$ | Costo Total, \$ |
|---------------------------------|----------------|----------|--------------------|-----------------|
| Consumos, gastos, productos | | | | |
| Caña de azúcar | L | 48000 | 0.05 | 2400 |
| Subtotal | | | | 2400 |
| Consumo energéticos y agua | | | | |
| Electricidad | Kwh | 320 | 0.09 | 28.8 |
| Agua | m ³ | 120 | 0.19 | 30.4 |
| Diésel | Galones | 400 | 1.48 | 592 |
| GLP | kg | 120 | 0.2 | 24 |
| Subtotal | | | | 675.2 |
| Mano de obra | | | | |
| Trabajadores | Salario | 4 | 140 | 560 |
| Seguro trabajadores/Aporte IESS | Salario | 4 | 88 | 352 |
| Subtotal | | | | 912 |
| Depreciación | | | | |
| Equipamiento | U | 1 | 84.44 | 84.44 |
| Subtotal | | | | 84.44 |
| Servicios y otros gastos | | | | |
| Permisos de funcionamiento | año | 1 | 95 | 7.92 |
| Transporte | Semanal | 4 | 25 | 100 |
| Mantenimiento | Semanal | 4 | 25 | 100 |
| Agua de beber | U | 12 | 1.5 | 18 |
| Subtotal | | | | 225.9 |
| Total egresos | | | | 4297.56 |
| Productos terminados | | | | |
| Aguardiente | L | 1520 | 3 | 4560 |
| Total ingresos | | | | 4560 |

Basado en estos valores, la ganancia mensual solamente es de \$262.44 y la relación beneficio/costo es de 1.06, es decir que la microempresa solo percibe \$0.06 de ganancia por cada dólar que se invierte en el proceso. Un valor bien pequeño, por lo que se requieren alternativas que revaloricen la actividad.

3.4 Etapa IV-Formulación de opciones PML. Viabilidad Técnico-Económica y ambiental

3.4.1 Formulación de opciones PML

Basado en los resultados se proponen 3 opciones de PML, que son descritas a continuación:

Opción 1. Recirculación de agua condensada: Esta opción incluye la implementación de un sistema de recirculación del agua condensada. El volumen del condensado es proporcional al volumen del vapor que se encuentra dentro de la caldera, es por esta razón que, al lograr la recirculación, el volumen del agua permanecerá constante, para lograr este objetivo se debe implementar un sistema de tubería que conecte a un tanque para almacenar los condensados y poder controlar el volumen de agua utilizado dentro del ciclo y posteriormente reutilizarlo en la caldera generadora. Cabe recalcar que todo este proceso va a estar acorde a las características de los equipos con que cuenta la empresa. En la figura 6 se muestra el diagrama de flujo con la instalación propuesta.

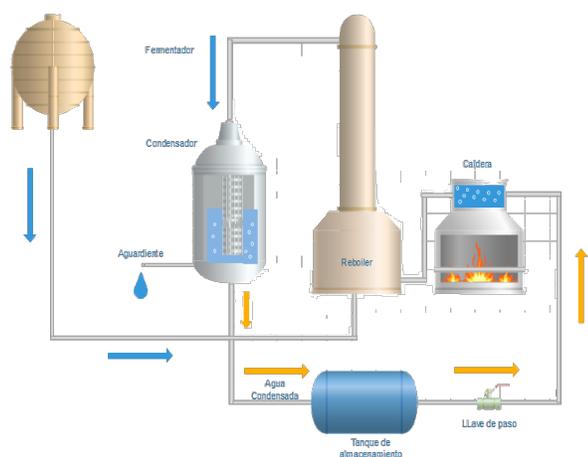


Figura 6. Diagrama de flujo para la recuperación del condensado.

Opción 2. Recuperación de calor: En esta alternativa, se propone un sistema de recuperación de calor, para reducir la utilización de agua en el proceso de enfriamiento y para aumentar la temperatura del jugo de caña antes de su ingreso en la caldera, ahorrando significativamente costos económicos en la compra de combustibles para generar calor y disminuir considerablemente la utilización de agua como refrigerante para el proceso de destilación. Este sistema de recuperación de calor, es un sistema básico y para su correcta instalación y funcionamiento se necesitan implementar 3 m de tubería de acero inoxidable desde

los tanques contenedores del jugo de caña fermentado hasta el tanque que alberga el serpentín que contiene el aguardiente en estado de vapor (1), además una tubería para la recirculación del jugo de caña que previamente estuvo un contacto directo con el serpentín y se conecta al reboiler (2), para que el jugo ingrese previamente calentado. Y finalmente, la circulación del vapor del aguardiente hacia el serpentín, donde por el intercambio con el jugo de caña frío, procederá a condensarse el aguardiente más fácilmente. La figura 7, muestra el diseño de la alternativa propuesta.

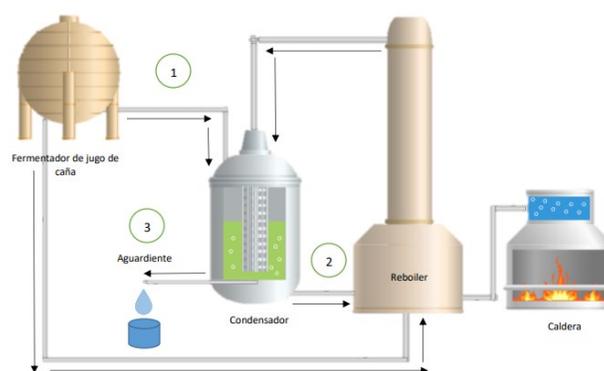


Figura 7. Diseño de alternativa para la reducción de costos energéticos en la producción de aguardiente de caña de azúcar.

Opción 3. Reutilización de los residuos orgánicos, mediante proceso de compostaje: Esta opción se desarrollará en 5 etapas como muestra la figura 8. La primera comienza con la recolección de la materia prima, en este caso el bagazo producto de la molienda de la caña de azúcar, que se complementará con el estiércol de los animales que utilizan para la recolección de la caña de azúcar proveniente de los campos de la finca. Como el bagazo se encuentra con un tamaño de partícula superior a los 20cm, es necesario triturarlo, por lo que se empleará una trituradora modelo Echo Sc3208, que es un equipo efectivo, cuenta con dos cuchillas y ocho cuchillos de destrozo reversibles y proporcionan un método eficiente en cuanto a energía, vibración, etc. Una vez triturado el bagazo, tendrá la masa una aportación de aire, porosidad y humedad adecuada [11]. Posteriormente, se comenzará la preparación del plato, donde colocará una capa de material vegetal, una capa de cachaza y estiércol, además se le adiciona cal agrícola o ceniza para enriquecer el compost. Para almacenar 1000kg de bagazo triturado, es necesario una caja de almacenamiento con de 2,5 x 5 x 0.9 metros de ancho,

largo y profundidad, respectivamente, luego, se cubrirá con plástico negro para evitar malos olores y una vez a la semana se arrojará cal en los alrededores de la cama para no atraer vectores. El proceso de recolección de lixiviados se realizará en baldes cada mañana y serán transportados a un tanque de concreto y para ser usado en humedecer las pilas, mientras que para airear la pila y reducir la temperatura de esta se efectuarán volteos semanales. Finalmente, una vez concluido el proceso y alcanzada la maduración del compost, durante 12 semanas, el producto será esparcido en un lugar seco, ventilado para ser secado, luego será molido, para reducir las partículas de mayor tamaño y empaclar para comercializar el producto final.

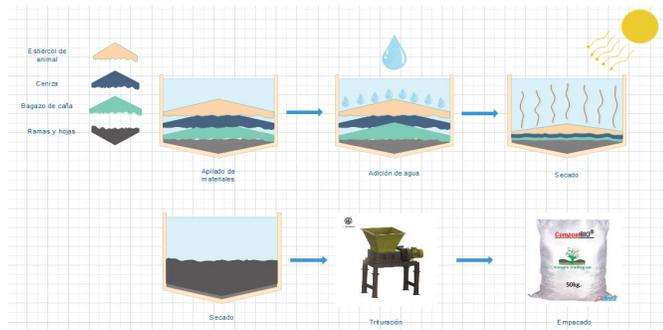


Figura 8. Diseño de alternativa de fabricación de compost con bagazo de caña.

3.4.2 Viabilidad Técnico-Económica y ambiental de las opciones PML

A partir de las tres opciones planteadas se analizó la viabilidad de la implementación desde el punto de vista técnico-económico y ambiental. La tabla 2 muestra la comparación de los indicadores de gasto del proceso sin las opciones de PML y con la implementación de las tres opciones.

Tabla 2. Comparación de los diferentes indicadores de gastos de la producción de aguardiente sin opciones PML y con la implementación de estas.

| Indicador de gasto | Sin PML, \$ | Con PML, \$ | Diferencia, USD |
|--------------------------|-------------|-------------|-----------------|
| Materia prima | 2400 | 2400 | - |
| Energéticos y agua | 675.2 | 473.17 | -202.03 |
| Mano de obra | 912 | 912 | 0 |
| Depreciación activos | 21.11 | 48.63 | 27.52 |
| Servicios y otros gastos | 225.92 | 225.92 | 0 |
| Totales | 4234.23 | 4059.72 | -174.51 |

Como se puede apreciar la incorporación de las opciones de PML, disminuye en \$174.51 los gastos totales, dado por una disminución de alrededor de un 30%, de los consumos energéticos y agua (\$202.03), los indicadores de materia prima, mano de obra y servicios se mantienen igual en los dos escenarios comparativos, puesto que las nuevas implementaciones requerirán lo mismo. Mientras, en la depreciación de activos fijos, se observa un incremento de un 30.36% (\$27.52), que es producto de los nuevos equipos y utensilios que necesitan las tres opciones planteadas. La tabla 2, muestra un desglose de las cantidades, precios de los equipos/útiles necesarios para la implementación de las tres opciones, planificados para una vida útil de 5 años (120 meses).

Tabla 3. Equipos, utensilios para la implementación de opciones PML.

| Equipo/Útiles | \$ | Cantidad | Depreciación \$/mes | Costo Total, \$ |
|---------------------------|------|----------|---------------------|-----------------|
| Tubo de acero inoxidable | 6.66 | 9 | 0.06 | 0.50 |
| Codos de acero inoxidable | 2.5 | 1 | 0.02 | 0.02 |
| Llave de paso | 10 | 1 | 0.08 | 0.08 |
| Tanque de almacenamiento | 250 | 1 | 2.08 | 2.08 |
| Trituradora Echo Sc3208 | 2980 | 1 | 24.83 | 24.83 |

En los aspectos de los equipos sobresale la trituradora Echo Sc3208, que se empleará para triturar las fracciones de gran tamaño del proceso de compost, de la opción 3. reutilización de los residuos orgánicos. Es cierto que esta opción es la que implica una inversión mayor, pero los implementos a adquirir son necesarios para la elaboración del compost y aunque su compra se realizaría al inicio del proceso del compost con una inversión de \$3000 tendría una vida útil de 5 años, por lo que la inversión será recuperable al momento de producir el abono orgánico, pues con las cantidades de bagazo, se producirán mensualmente 850kg de abono orgánico, lo que genera un ingreso económico adicional de \$297.5.

Tabla 4. Indicadores ambientales y productivos de las propuestas de PML por cada L de aguardiente producido

| Indicador | Unidad | SIN PML | CON PML |
|-----------|--------|---------|---------|
| Agua | L | 105.26 | 36.84 |
| Diésel | Galón | 0.26 | 0.113 |
| GLP | kg | 0.15 | 0.045 |
| Compost | kg | 0.00 | 2.24 |

En lo que respecta a los ahorros significativos de agua, diésel y GLP, estos están asociados a las opciones de recirculación de agua condensada y de calor (opciones 1+2), pues ambas contribuirán a disminuir el consumo de energéticos, en el caso de la primera puesto que el agua condensada ingresará a la caldera a una temperatura superior (temperatura promedio de 80°C a la salida del proceso) a la actual (temperatura ambiental de 20-25°C), por lo que la energía para ese incremento desde 25 a 80°C, no será necesaria, mientras la recuperación del calor, contribuirá pues el jugo de caña fermentado ingresara al reboiler previamente calentado alrededor de 55°C, por lo que también se evitara el consumo de diésel y gas en la fase del proceso destilación por esta alternativa. En resumen, las dos opciones generaran una reducción del 57% y 70% del diésel y GLP consumido. Adicionalmente, la opción 1 de recirculación del agua, permitirá ahorrar mensualmente 64 m³ de agua, un ahorro equivalente al 65% del proceso actual.

Estudios similares, incorporan medidas como estas, por ejemplo, el realizado por Chou Rodríguez, et al. [17] manifiesta que la recirculación del agua es viable, puesto que después de su implementación se logró un ahorro anual de \$11,386.32. Por su parte, la opción 2, también han dado resultados positivos y como expone Fundora [18] un sistema de recirculación de calor entre los condensadores y las calderas puede reducir entre un 20% y 70% la utilización de combustibles fósiles como diésel y GLP, por lo que es una opción viable tanto económica como sustentable. Sin embargo, los sistemas de aislamiento térmico influyen considerablemente al momento de calcular la eficiencia del sistema, ya que las fugas de calor son muy comunes en este tipo de alternativas.

En cuanto a las salidas, la principal diferencia está dada por el nuevo producto que se obtiene, 850kg de compost del bagazo de la caña de azúcar, que vendido a 0.35\$/kg, reportará ingresos adicionales de \$297.5, lo

que, unido a la venta del aguardiente, generará ingresos totales de \$4857.5, dando una ganancia de \$797.78. Por lo que la relación costo beneficio con las opciones PML, será de 1.2, un valor superior a sin las opciones (1.06).

4. Conclusiones

El diagnóstico realizado en la destilería "Puro Puyo" muestra varias deficiencias, consumos elevados de energéticos, pérdidas caloríficas, generación de residuos sin valorización. La microempresa tiene un margen muy pequeño de ganancia con la actividad (Relación Costo Beneficio de 1.06), por lo que propusieron tres opciones de PML a implementar en la Finca "Santa María", en este caso, la recuperación de agua, calor y el aprovechamiento del bagazo de caña de azúcar. El análisis de la viabilidad técnica económica y ambiental, muestra resultados favorables, puesto que con la implementación de las opciones de PML (recirculación de agua condensada y recuperación de calor) se logró disminuir el consumo de agua, diésel y GLP en una 65%, 57% y 70% respectivamente, con beneficios económicos y ambientales por el consiguiente ahorro de recursos y disminución de emisiones. La relación costo-beneficio con la implementación de las tres opciones, mejora en un 13.2% (1.2) y los indicadores ambientales/productivos de la producción de aguardiente "Puro Puyo". Finalmente, se recomienda considerar las buenas prácticas de manufactura y realizar investigaciones futuras sobre otras corrientes residuales de la actividad que puedan minimizar la contaminación ambiental que se genera en el proceso de la destilería

REFERENCIAS

- [1] M. A. A. Ríos and N. Ullauri Donoso, "Historia del Agroturismo en el cantón Cuenca Ecuador/History of Agrotourism in the canton of Cuenca Ecuador," *Pasos*, vol. 13, no. 5, pp. 1199-1212, 2015.
- [2] P. d. O. T. Pastaza, "Plan de Desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia de pastaza al año 2025," ed: Puyo: Equipo técnico de planificación del gad provincial encargado del ..., 2017.
- [3] M. R. Maroun and E. L. La Rovere, "Ethanol and food production by family smallholdings in rural Brazil: Economic and socio-environmental analysis of micro distilleries in the State of Rio Grande do Sul," *Biomass and Bioenergy*, vol. 63, pp. 140-155, 2014.
- [4] C. d. L. F. Pereira, "Avaliação da sustentabilidade ampliada de produtos agroindustriais, estudo de caso: suco

- de laranja e etanol," PhD, Departamento de Engenharia de Alimentos. Faculdade de Engenharia de Alimentos., Campinas University State, Campinas, SP, 2008.
- [5] A. M. Souza, "Sustentabilidade e viabilidade econômica de um projeto de microdestilaria de álcool combutível em um grupo de agricultores do assentamento gleba XV de Novembro," PhD, Laboratorio de Engenharia Ecologica e Informatica Aplicada. Departamento de Engenharia de Alimentos. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brazil, 2010.
- [6] R. García-Prado *et al.*, "Incorporación de otras materias primas como fuentes de azúcares fermentables en destilerías existentes de alcohol," *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 75, pp. 130-142, 2015.
- [7] J. M. C. Curbelo and Y. L. Acosta, "Alternativas detratamiento de las vinazas de destilería. Experiencias nacionales e internacionales," *Revista Centro Azúcar*, vol. 41, no. 2, pp. 56-67, 2014.
- [8] E. A. Severo, J. C. F. d. Guimarães, and E. C. H. Dorion, "Cleaner production and environmental management as sustainable product innovation antecedents: A survey in Brazilian industries," *Journal of Cleaner Production*, vol. 142, pp. 87-97, 2017.
- [9] CEER. (2016, 29 de julio). *Centro de Eficiencia de Recursos y Producción Más Limpia en Ecuador*. Available: <https://www.industrias.gob.ec/centro-de-eficiencia-de-recursos-y-produccion-mas-limpia/>.
- [10] N. G. G. Aguinda, L. B. S. Pereira, E. O. Crespo, and K. Diéguez-Santana, "Las producciones más limpias en el sector textil manufacturero. Un caso de estudio en Tena, Napo, Ecuador," *Mikarimin. Revista Científica Multidisciplinaria*, vol. 6, pp. 201-218, 2020.
- [11] D. Caiza, A. Chimbo, L. B. Sarduy Pereira, W. Pisco, and K. Diéguez Santanaa, "Propuesta de producción más limpia en el proceso de elaboración de abonos orgánicos con desechos del camal, realizado en el relleno sanitario del cantón Baños de Agua Santa, provincia de Tungurahua," *Revista Observatorio de la Economía Latinoamericana*, 2018.
- [12] E. V. Cárdenas Giler, J. M. Maldonado Erazo, R. A. Valdez Silva, L. B. Sarduy-Pereira, and K. Diéguez-Santana, "La producción más limpia en el sector porcino. Una experiencia desde la Amazonia Ecuatoriana," *Anales Científicos*, vol. 80, no. 1, pp. 76-91, 2019.
- [13] CEER, *Guía de producción más limpia*. Centro Ecuatoriano de Eficiencia de Recursos y Producción Más limpia CEER 2019, p. 47.
- [14] CPTS, *Guía Técnica General de Producción más Limpia*. La Paz, Bolivia: Centro de Promoción de Tecnologías Sostenibles, CPTS, USAID, 2005, p. 184.
- [15] K. Diéguez-Santana, Y. Casas-Ledón, J. A. Loureiro Salabarría, A. Pérez-Martínez, and L. E. Arteaga-Pérez, "A life cycle assessment of bread production: A Cuban case study," *Journal of Environmental Accounting and Management*, vol. 8, no. 2, pp. 125-137, 2020.
- [16] A. I. Soto-Cabrera, A. P. Panimboza-Ojeda, C. G. Ilibay-Granda, C. R. Valverde-Lara, and K. Diéguez-Santana, "Impacto ambiental de la operación del Centro de faenamamiento de la ciudad de Puyo, Pastaza, Ecuador," *Prospectiva*, vol. 18, no. 1, 2020.
- [17] E. M. Chou Rodríguez, Y. García Martínez, A. d. I. C. Bermúdez Chou, and L. Pisch Vidal, "Evaluación de producción más limpia en el proceso de leche y derivados de la soya," *Tecnología Química*, vol. 38, no. 2, pp. 428-436, 2018.
- [18] Y. G. Fundora, "Esquema de evaporación flexible para la producción integrada de azúcar y alcohol," *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, vol. 42, no. 1-3, pp. 28-36, 2008.

Baterías de ion litio: características y aplicaciones

Lithium ion batteries: features and applications

Vanessa Quintero ^{1*}, Osvaldo Che ², Eleicer Ching ², Orlando Auciello ³, Elida de Obaldía ^{2,3}
¹ Facultad de Ingeniería Eléctrica, C.R. Panamá Oeste, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
² Laboratorio Pierre y Marie Curie, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá
³ Universidad de Texas en Dallas

*Autor de correspondencia: vanessa.quintero1@utp.ac.pa

RESUMEN— Las baterías han sido parte de nuestra vida por más de 100 años. Ellas han sido utilizadas en diferentes aplicaciones desde una simple calculadora científica hasta en vehículos eléctricos, robots y satélites. A través de los años diversos tipos de baterías han sido fabricados todos con la finalidad de mejorar su rendimiento. En la actualidad las baterías de iones de litio han sido usadas con mayor frecuencia debido a su alta densidad de energía, su alta eficiencia energética y a su prolongado tiempo de vida. Este trabajo presenta un resumen de aspectos relevantes sobre las baterías de iones de litio. El artículo desarrollado introduce la terminología relacionada al mundo de las baterías. Además, estudia las características y herramientas que hacen a las baterías de iones de litio una de las baterías más utilizadas actualmente. Por otro lado, este estudio menciona aspectos relevantes de un sistema de gestión de baterías, herramienta necesaria para salvaguardar el funcionamiento y vida de la batería.

Palabras clave— *Baterías, Ion Litio, estado de carga, estado de salud*

ABSTRACT— Batteries have been part of our life for over 100 years. They have been used in different applications from a simple scientific calculator to electric vehicles, robots, and satellites. Over the years, various types of batteries have all been manufactured for better performance. At present, lithium-ion batteries have been used more frequently thanks to their high energy density, high energy efficiency, and long life. This paper presents a summary of the relevant aspects of lithium-ion batteries. The article developed introduces the terminology related to the world of batteries. Besides, it studies the characteristics and tools that make lithium-ion batteries one of the most commonly used batteries. On the other hand, this study mentions relevant aspects of a battery management system, a necessary tool to safeguard the operation and life of the battery.

Keywords— *Battery, Lithium-ion, State-of-Charge, State-of-Health*

1. Introducción

Las baterías son parte de un creciente mercado que mueve billones de dólares. Por ejemplo, se estima que el mercado de las baterías de ácido plomo alcance el orden de los 70.1 mil de millones de dólares para el 2023 mientras que las baterías de litio deberán alcanzar los 105 mil millones de dólares para el 2025 [1] [2]. En términos generales se espera que el mercado de baterías tenga un incremento del 6.63% en la tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) en los próximos 9 años [1].

Una batería puede estar compuesta por dos o más celdas conectadas en serio o en paralelo. Una celda es la unidad básica de una batería capaz de convertir energía química en energía eléctrica a través de reacciones

electroquímicas [3]. Las baterías constan de cuatro partes fundamentales que son el ánodo, el cátodo, el separador y el electrolito, ver Figura 1. El ánodo sufre una reacción de oxidación durante el proceso de descarga mientras que en el proceso de carga sufre una reacción de reducción. Para el caso de cátodo tenemos una reacción de reducción durante el proceso de descarga y una reacción de oxidación durante el proceso de carga [2].

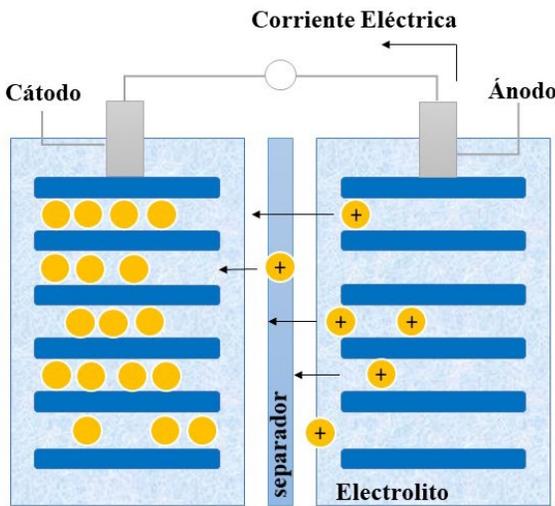


Figura 1. Partes de una batería

Durante la reacción de oxidación se presenta una pérdida de electrones mientras que en la reacción de reducción se tiene una ganancia de electrones. Ambas reacciones se complementan y podemos encontrar ejemplos de ellas en diversas actividades que se realizan diariamente como lo son la combustión de la gasolina y el proceso de respiración.

La selección del material a utilizar en el ánodo y cátodo de la batería juega un papel relevante en el rendimiento de esta. Es por ello que la selección del material del ánodo se hace considerando las características de eficiencia como agente reductor, buena conductividad, estabilidad, bajo costo y fácil implementación, mientras que el material del cátodo se selecciona considerando que sea un eficiente agente oxidante, tenga estabilidad al contactar al electrolito y que maneje una tensión de trabajo [3].

Tradicionalmente las baterías han sido clasificadas en primarias o secundarias. Las baterías primarias, también conocidas como no recargables, son aquellas donde la reacción electroquímica no puede revertirse, es decir solo pueden ser descargadas una sola vez. Las baterías secundarias o recargables como su nombre lo indica permiten cargar y descargar la batería un número considerable de veces [4]. Las baterías de zinc-carbono, alcalinas (zinc/dióxido de manganeso), zinc/óxido de plata, zinc-aire y litio son consideradas baterías no recargables mientras que las baterías de ácido plomo, níquel-cadmio (Ni-Cd), níquel-metal hidruro (Ni-MH), ion de litio (Li-Ion) y polímero de litio (LIPo) son

consideradas baterías recargables [4]. La Figura 2 muestra la clasificación de las baterías en primarias y secundarias, así como el periodo de tiempo en el que entraron en el mercado.

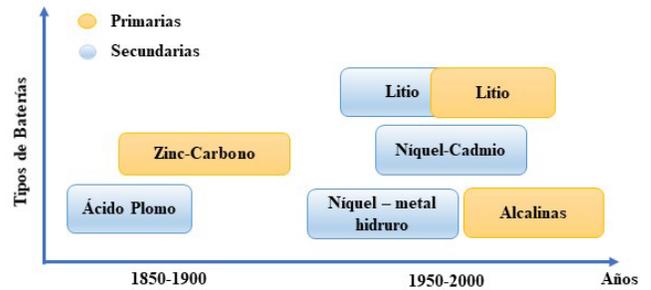


Figura 2. Años de Comercialización de los diferentes tipos de baterías.

Las baterías han sido utilizadas en dispositivos portátiles (computadoras, celulares), cámaras fotográficas, radios, calculadoras, relojes, juguetes, reproductores, dispositivos de iluminación, entre otros. Además, han sido empleadas en aplicaciones de mayor complejidad como lo son los vehículos eléctricos, las aeronaves, las máquinas industriales, los satélites, los robots, entre otros [5]. La selección del tipo de batería depende exclusivamente de los requerimientos de la aplicación donde son utilizadas. Por ejemplo, las baterías de ion-litio han sido empleadas con mayor frecuencia en aplicaciones para el cuidado de la salud, vehículos eléctricos y aeronaves debido a las características que presentan [6]. La Figura 3 muestra la versatilidad de las baterías de Litio para algunas aplicaciones al presentar un menor peso (densidad de energía gravimétrica) y mayor capacidad de energía por unidad de volumen (densidad de energía volumétrica) cuando son comparadas con otros tipos de baterías.

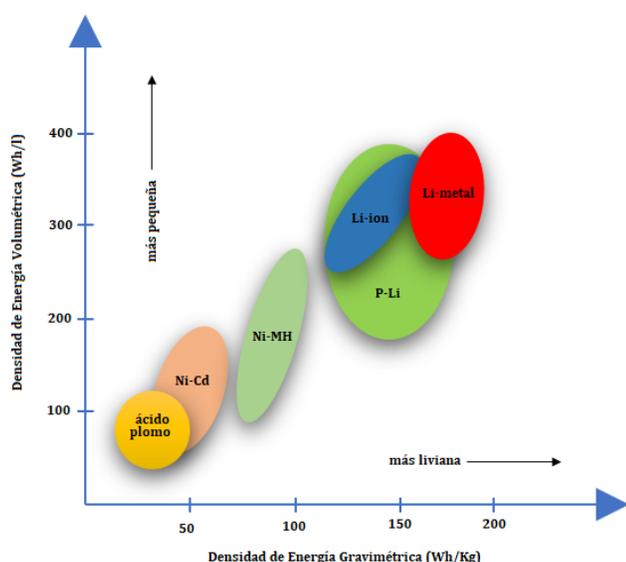


Figura 3. Densidad de energía gravimétrica y volumétrica para diferentes tipos de baterías [5].

La principal contribución de este trabajo es instruir al lector sobre conceptos, características y funcionamiento de las baterías de iones de litio. En la primera parte de este artículo se presenta la importancia que han tenido las baterías a lo largo de la historia. En la segunda sección se introduce los conceptos relacionados a las baterías. La tercera sección se enfoca en estudiar las áreas de aplicación de las baterías de litio, así como de detallar los actuales materiales usados en su confección. La cuarta sección desarrolla los aspectos del sistema de gestión de batería permitiendo al usuario comprender cuales son los parámetros que se pueden monitorear y que permiten preservar el tiempo de vida de la batería. La última sección presenta las conclusiones de este trabajo.

2. Terminología usada en las baterías

Para comprender el funcionamiento de las baterías, así como los métodos y herramientas utilizados para conocer su estado es necesario manejar algunos conceptos y la definición de estos. En las dos siguientes subsecciones definiremos los principales conceptos relacionados a la batería, así como la información que puede obtenerse de las hojas técnicas de los fabricantes. A continuación, se detallan más relevantes en el ámbito de las baterías.

2.1 Conceptos básicos

A continuación, se detalla la terminología usada en el ámbito de las baterías.

- **Capacidad:** es la cantidad de corriente que puede suministrar una batería en tiempo específico. Suele medirse en Amperios - horas.
- **Ciclo:** se define como el proceso de descargar una batería que ha sido cargada completamente [7].
- **Degradación:** se define como el proceso en el que se disminuye la capacidad de almacenamiento de energía de la batería [8].
- **Electrodo Negativo:** se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de oxidación [9].
- **Electrodo Positivo:** se define como el lugar donde un elemento o componente químico se somete a una reacción electroquímica de reducción [9].
- **Electrolito:** Es una solución acuosa o no acuosa de sales, bases y ácidos que permite el flujo de electrones [9].
- **Estado de Carga (SOC):** se define como la energía que está disponible en la batería [10].
- **Estado de Salud (SOH):** se define como el porcentaje de degradación sufrida por la batería [10].
- **Impedancia Interna:** se define como la medida de oposición al paso de la corriente en un circuito cuando se aplica un voltaje.
- **Proceso de Carga:** se define como el proceso inverso donde la reacción de oxidación ocurre en el electrodo positivo y la reacción de reducción ocurre en el electrodo negativo [4].
- **Proceso de Descarga:** se define como el flujo de electrones desde el ánodo (reacción de oxidación) hasta el cátodo (reacción de reducción) a través de una carga externa [4].
- **Profundidad de Descarga (DoD):** se define como el porcentaje de cuanta energía se ha usado [7].
- **Vida útil Remanente:** se define como la capacidad máxima de energía remanente en la batería [11].
- **Voltaje Nominal:** se define como el voltaje de operación del dispositivo o instrumento.
- **Voltaje de Corte de descarga:** se define como el voltaje mínimo al cual que puede llegar la batería durante el proceso de descarga. Se utiliza como medida de protección para evitar daños irreversibles en la batería.

2.2 Hoja técnica

La hoja técnica es un documento emitido por los fabricantes para conocer las características de funcionamiento de las baterías. Estos datos juegan un papel relevante al momento de monitorear y controlar diversos parámetros de la batería. Dichos parámetros son cruciales para conocer el tiempo de vida de la batería. Para comprender la información suministrada por las hojas técnicas se presenta la información técnica de la batería LIR2032 [12], ver Tabla 1. Dentro de los datos enunciados en la Tabla 1 se observan las máximas corrientes que pueden ser utilizadas para cargar y descargar la batería (45mA y 90mA). Además, de establecer los voltajes de carga (4.20 V) y de corte (2.75 V). Por otro lado, se menciona la cantidad de ciclos de operación que puede manejar la batería (500 ciclos) y el método de carga de la batería (Corriente Constante - Voltaje Constante CC/CV). La información de las corrientes utilizadas para cargar y descargar la batería se hace con referencia a la capacidad de esta, por ejemplo, si se enuncia que la corriente de carga es 0.5C para la LIR2032 eso equivale a 22.5mA.

Además de los datos mencionados anteriormente, las hojas técnicas de fabricantes proveen una serie de gráficos que permiten verificar el comportamiento y rendimiento de la batería para ciertas condiciones específicas. Por ejemplo, presentan gráficos con información sobre el comportamiento de la batería cuando es descargada a corriente constante. Además, incluyen datos sobre el efecto que tiene la temperatura sobre la batería. Es de suma importancia saber que rangos de temperaturas extremos pueden ocasionar daños considerables en la química de la batería disminuyendo así el tiempo de vida de esta.

Tabla 1. Especificaciones Técnicas de la Batería LIR2032

| | | |
|------------------------------|----------|--|
| Voltaje Nominal | | 3.6 V |
| Capacidad Nominal | Típica | 45mAh |
| | Mínima | 40mAh |
| Método de Carga | | CC/CV Corriente:0.5C Voltaje:4.2 V Corriente Final:0.02 C |
| Voltaje de Carga | | 4.20 V |
| Corriente Estándar de Carga | | 0.5 C |
| Máximas corrientes | Carga | 1 C |
| | Descarga | 2 C |
| Voltaje de Corte de Descarga | | 2.75 V |
| Impedancia Interna | | ≤600Ω |
| Número de ciclos | | 500 |

Siguiendo con la línea de información suministrada por las hojas técnicas un punto relevante es el número de ciclos de operación de la batería. En forma general para los fabricantes un ciclo de operación corresponde a una descarga completa de la batería a un valor específico de corriente constante, por ejemplo 22.5mA para el caso de la batería LIR2032. Con esta información el fabricante da un punto de referencia, ya que dependiendo del tipo de perfil de corriente que se utilice los ciclos de operación de la batería pueden aumentar o disminuir y por ende el tiempo de vida de la batería puede ser mayor o menor a lo establecido por los fabricantes. Esta situación es presentada en la Figura 4 donde se observa la pérdida de capacidad o degradación que puede sufrir la batería a medida que aumentan los ciclos de operación de la batería cuando se descarga la batería utilizando diferentes niveles de corriente. En el gráfico se observa que cuando se descarga a una corriente tres veces superior a la de referencia el proceso de degradación se presenta con un número menor de ciclos de operación.

Otra situación que debe considerarse al momento de evaluar el número de ciclos de operación de la batería es cuando se descarga utilizando diferentes niveles de corriente, tal como se muestra en la Figura 5. En este caso la batería LIR2032 fue descargada utilizando una variación de corriente entre 14mA y 22 mA.

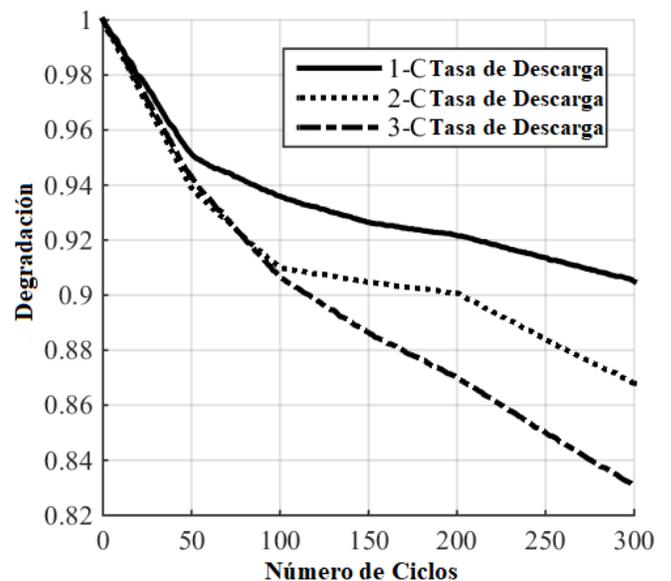


Figura 4. Degradación sufrida por la batería de acuerdo con la corriente utilizada [8].

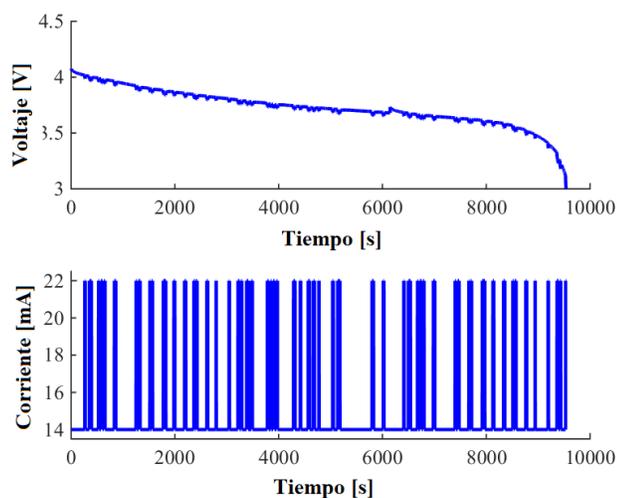


Figura 5. Curva de descarga de la batería LIR2032 [13]

3. Baterías de litio

La comercialización de las baterías de litio inicia en el año 1991 y desde entonces han tenido un rápido crecimiento en sus ventas. La creciente preferencia por vehículos híbridos y eléctricos libres de contaminación, junto con los rápidos desarrollos tecnológicos, son algunos de los factores que han influido en la penetración en el mercado de este tipo de baterías [14]. Esta situación se observa en las ventas de baterías en Japón para el año 2018, donde del 57% de baterías primarias vendidas, el 18% corresponde a baterías de litio. En el caso de las baterías secundarias del 43% de las ventas, el 31% corresponde a baterías de litio [15].

El auge en el uso de las baterías de litio se debe principalmente a su alta densidad de energía, su alta eficiencia energética y a su prolongado tiempo de vida [6]. Por ejemplo, comparado con las baterías de ácido plomo la densidad de energía en las baterías de iones de litio puede triplicarse. Por otro lado, las baterías de iones de litio pueden alcanzar un máximo de 1000 ciclos de operación mientras que las de Ni-MH un máximo de 500 ciclos. Si se realiza una comparación de la eficiencia energética de las baterías de ácido plomo, Ni-MH y batería de iones de litio su comportamiento es similar [6].

3.1 Aplicaciones

Como se mencionó anteriormente las baterías de iones de litio presentan características superiores comparadas con otras. Es por ello por lo que su uso se ha

incrementado considerablemente en los últimos años. Por ejemplo, el uso de este tipo de baterías ha sido significativo en el mercado de dispositivos electrónicos, específicamente en celulares, tablets y computadoras portátiles. Actualmente se tiene que el 31% de la población mundial utiliza teléfonos inteligentes, por lo que representa un mercado de relevancia para las baterías de iones de litio [16]. Durante muchos años el Mercado principal de las baterías de iones de litio han sido los dispositivos electrónicos, pero esta situación se encuentra en proceso de cambio al utilizarse cada vez más las baterías de iones de litio en dispositivos para el cuidado de la salud, vehículos eléctricos y los UAV [17].

Debido a su reducido tamaño, peso, alta densidad de energía y prolongado tiempo de vida, las baterías de iones de litio han sido seleccionadas como principales candidatas para los dispositivos para el cuidado de la salud, mercado emergente que mueve millones de dólares anualmente. Los marcapasos, transmisores de radio implantables, estimuladores gástricos, biosensores portátiles, herramientas quirúrgicas, desfibriladores, monitores son ejemplos de algunos dispositivos médicos que utilizan este tipo de baterías [18] [19]. Desde el primer implante de marcapaso, en 1960, la industria de dispositivos médicos se ha enfocado en desarrollar baterías que reúnan características que permitan darle una mejor calidad de vida a los pacientes. Ejemplo de esta situación es el estudio presentado en [19] donde los autores mencionan las características que las aplicaciones biomédicas deben considerar para su diseño y funcionalidad. Desde el punto de vista del diseño se considera la adhesión, la degradación y la sensibilización, mientras que desde la funcionalidad se debe considerar la biocompatibilidad, la seguridad y confiabilidad, el peso y tamaño y durabilidad.

Otra de las aplicaciones donde las baterías de iones de litio juegan un papel relevante son los vehículos eléctricos. Esta industria ha tenido un incremento significativo en los últimos años gracias a las diferentes políticas implementadas por los gobiernos para disminuir la emisión de gases. Para el año 2018, se requirieron 3.3 millones de baterías para ser utilizadas en vehículos eléctricos, como se observa es una industria potente que espera tener un crecimiento del 22% del GARG para el periodo comprendido entre 2017-2025. Debido a esta demandante industria en crecimiento diversos han sido los esfuerzos de la comunidad científica por mejorar el

rendimiento y seguridad de las baterías de iones de litio, ejemplo de ello es el trabajo presentado por los autores en [14] donde se analiza los problemas y soluciones de seguridad térmica presentado en los vehículos eléctricos.

3.2 Tipos de baterías de litio

En las secciones previas se mencionó que las baterías están compuestas por cuatro elementos: el ánodo, el cátodo, el electrolito y el separador. Las características presentadas por estos cuatro elementos influyen en el rendimiento y comportamiento de la batería. En la actualidad los cátodos de las baterías de litio primarias pueden estar compuesto por dióxido de azufre, cloruro de tionilo, cloruro de sulfurillo, óxido de bismuto (II), cloruro de cobre (II), óxido cúprico, dicloruro de cobre, sulfuro de cobre, dióxido de manganeso, sulfuro de níquel, entre otros dando así origen a las baterías primarias de litio /óxido de cobre (Li/CuO), litio/ dióxido de manganeso (Li/MnO₂), litio/dióxido de azufre (Li/SO₂), litio/cloruro de tionilo (Li/SOCl₂), entre otras. Por otro lado, en las baterías de litio secundarias el electrodo negativo es de carbono mientras que el electrodo positivo está fabrica de los siguientes compuesto óxido de cobalto litio (LiCoO₂), litio óxido de manganeso (LiMn₂O₄), litio ferfosfato (LiFePO₄), litio-manganeso-níquel-óxido de colbalto (LiNiMnCoO₂), litio-níquel-cobalto-óxido de aluminio (LiNiCoAlO₂) y titanato de litio [20].

En la actualidad existen diversos estudios que nos permiten analizar y comparar las características de los diferentes tipos de baterías de litio listados anteriormente. Por ejemplo, en [21] los autores presentan un estudio comparativo entre baterías de LiFePO₄, LiNiMnCoO₂ y LiNiCoAlO₂ donde estudian el rendimiento de las baterías de acuerdo a sus capacidades de potencia y energía, además de considerar su comportamiento térmico y los ciclos de operación. Otros ejemplos de estudios de comparación y rendimiento de las baterías son presentados en [22] y [23].

3.3 Problemas presentados en las baterías de litio

Las baterías de litio pueden presentar diversos problemas que pueden originar que el rendimiento de esta sea menor o incluso que se conviertan en un peligro. Diversos son los factores que pueden alterar la condición de la batería desde caídas, aplastamientos hasta uso inadecuado al someter a la batería a niveles de corriente, voltaje y temperatura superiores a los establecidos en la hoja técnica [24]. Tres de las problemáticas más comunes

presentadas por las baterías de litio, que pueden causar cortocircuitos y explosiones de estas, son la sobrecarga, la fuga térmica y el crecimiento de dendritas de litio[24]. El proceso de sobrecarga se relaciona con el flujo de corriente inyectado a la celda aun cuando esta se encuentra en su máxima capacidad. El concepto de fuga térmica se refiere al aumento de temperatura producto de un uso incorrecto y el crecimiento de dendritas de litio se refiere al proceso a través del cual se perfora el separador y se conectan los electrodos de la batería. A través del estudio de la literatura diversos han sido los mecanismos desarrollados para abordar estas problemáticas por ejemplo en [25] los autores proponen un circuito eléctrico de protección para evitar sobrecargas de voltaje. Por otro lado en [26] los autores presentan un sistema para evitar la fuga térmica y en se aborda la formación de dendritas de litio [27].

4. Sistema de Gestión de Batería (BMS)

El Sistema de Gestión de Baterías (BMS) es una herramienta que es indispensable en aplicaciones que involucran el uso de baterías iones de litio. El BMS es una herramienta que permite obtener información del estado de la batería al monitorear la corriente y el voltaje de entrada y salida, la temperatura, la impedancia, la pérdida de capacidad, el sistema de control de carga y descarga, el control de gestión de energía. Además, el BMS es el encargado de diagnosticar fallas, así como de estimar parámetros como el Estado de Carga (SOC), Estado de Salud (SOH).

3.1 Sistema de monitoreo

A través del BMS se pueden monitorear diversos parámetros asociados a la batería como los son la corriente, el voltaje, la temperatura, la impedancia interna, entre otros. La información obtenida de estas variables es fundamental para garantizar el rendimiento y durabilidad de las baterías. En la actualidad existen diversas herramientas que contribuyen a monitorear estas variables asociadas a las baterías. Por ejemplo, comercialmente se puede tener acceso a equipos como cargas programables, unidades de fuente y medida (SMU), potencióstato/galvanostato, cámara de temperatura, entre otros. La carga programable es un equipo que permite hacer cargas y descargas de la batería usando diversos perfiles de corrientes. Este tipo de pruebas permite estudiar el comportamiento y definir la

cantidad de ciclos de operación de la batería. La unidad de fuente y medida funciona como una fuente de alimentación y a la vez como instrumento de medición de voltaje y corriente. Además, puede trabajar como carga programable disipando energía de una batería u otro dispositivo de almacenamiento de energía. Por otro lado, el potencióstato/galvanostato es un dispositivo capaz de realizar espectroscopia de impedancia electroquímica, ver Figura 7.



Figura 7. Autolab PGSTAT302N [28]

Varios de los equipos enunciados anteriormente son utilizados para obtener la curva de voltaje de circuito (OCV). Esta curva es utilizada para estudiar los cambios en la energía electrónica de los electrodos y además poder estimar el SOC. El modelado de la curva OCV es de gran importancia ya que a través de este se pueden proponer aproximaciones matemáticas que caractericen el comportamiento de la batería. Ejemplo de esta situación son los trabajos presentados en [29] y [30].

3.2 Estimación del SOC y SOH

El SOC y el SOH son dos indicadores que brindan información sobre el estado de la batería. Estos dos indicadores son usados con mucha frecuencia y proveen información que sirve para la toma de decisiones en el BMS. El SOC es un concepto que hace referencia a cuanta energía está disponible en la batería, mientras que el SOH denota la degradación que ha sufrido la misma [10]. Ambos indicadores son empleados para determinar el tiempo de vida de la batería aspecto importante en las aplicaciones donde se utilizan baterías de iones de litio. El SOC y SOH no pueden ser medidos directamente por ende se requiere información de variables como como la corriente de descarga, el voltaje, la temperatura, la resistencia interna/impedancia, ciclo de vida, tasa de degradación de la capacidad para ser estimados [10] y [30]. Diversos métodos han sido explorados para estimar el SOC tal es el caso del contador Ampere-hora [31],

medición de Voltaje de Circuito Abierto (OCV, *Open Circuit voltaje*) [32], la Espectroscopia de Impedancia electroquímica (EIS, *Electrochemical Impedance Spectroscopy*) [33] y los métodos basados en modelamiento de la batería [10], [34] y [35]. De igual forma para la estimación del SOH se han utilizado técnicas experimentales y métodos adaptativos [36]. Para trabajar con las técnicas descritas anteriormente es necesario conocer en primer lugar las características químicas de las baterías y en segundo lugar se requiere un modelo que permita caracterizar su comportamiento. Actualmente existen diversos modelos que pueden ser clasificados en físicos, empíricos, abstractos, electroquímicos, eléctricos y estocásticos [37].

Como se observa el BMS es una parte fundamental en las aplicaciones que involucran el uso de baterías. El monitoreo y control de las diversas variables asociadas al comportamiento de la batería son determinantes para determinar la cantidad de energía remanente, el tiempo de vida y sobre todo garantizar las medidas de seguridad que protejan la durabilidad de la batería, así como la aplicación y los agentes actuantes en la misma.

5. Conclusiones

En este trabajo se abordan los conceptos fundamentales relacionados a las baterías de litio, desde los materiales que componen el ánodo y el cátodo de la batería hasta los indicadores que han sido establecidos para conocer su estado y rendimiento. Conocer todos estos conceptos contribuye a entender con mayor claridad el funcionamiento de las baterías de litio, así como las problemáticas que presentan las mismas. El manejo y entendimiento de estos conceptos permite evaluar de forma correcta el tipo de batería de litio requerida en una aplicación específica.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajado ha sido financiado por SENACYT mediante el proyecto FID17-018. Además, los autores quieren agradecer a al Sistema Nacional de Investigación SNI – SENACYT.

REFERENCIAS

- [1] “Global Battery Market Trends, Share, Size, Stats & Analysis 2019-2027.” [Online]. Available: <https://www.inkwoodresearch.com/reports/global-battery-market/>. [Accessed: 28-Feb-2020].

- [2] H. Xiong, E. J. Dufek, and K. L. Gering, *Batteries*, vol. 2–5. 2018.
- [3] T. Horiba, “Lithium-ion battery systems,” *Proc. IEEE*, vol. 102, no. 6, pp. 939–950, 2014, doi: 10.1109/JPROC.2014.2319832.
- [4] D. Linden and T. B. Reddy, [3rd edition] *Handbook Of Batteries.pdf*.
- [5] Gianfranco Pistoia, Ed., “Chapter 4 Primary Batteries,” in *Batteries for Portable Devices*, 2007, pp. 33–76.
- [6] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Hussain, Y. Yusof, and P. J. Ker, “State-of-the-Art and Energy Management System of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 19362–19378, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2817655.
- [7] A. Pérez, V. Quintero, H. Rozas, F. Jaramillo, R. Moreno, and M. Orchard, “Modelling the Degradation Process of Lithium-Ion Batteries When Operating at Erratic State-of-Charge Swing Ranges,” in *International Conference on Control, Decision and Information Technologies*, 2017.
- [8] A. Perez *et al.*, “Characterization of the Degradation Process of Lithium-ion Batteries when Discharged at Different Current Rates,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part I.J. Syst. Control Eng.*, vol. 232, pp. 1075–1089, 2018, doi: 10.1177/ToBeAssigned.
- [9] Gianfranco Pistoia, “Chapter 1 - Basic Battery Concepts,” *Batter. Portable Devices*, pp. 1–15, 2005, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/B978-044451672-5/50001-6>.
- [10] D. A. Pola *et al.*, “Particle-filtering-based discharge time prognosis for lithium-ion batteries with a statistical characterization of use profiles,” *IEEE Trans. Reliab.*, vol. 64, no. 2, pp. 710–720, 2015, doi: 10.1109/TR.2014.2385069.
- [11] “Determinando el estado de salud de las baterías de manera rápida y precisa | Revista Española de Electrónica.” [Online]. Available: <https://www.redeweb.com/articulos/determinando-el-estado-de-salud-de-las-baterias-de-manera-rapida-y-precisa/>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [12] “(No Title).” [Online]. Available: http://www.astc.ru/data/delivery_list/content/eemb/pdf/LIR2032.pdf. [Accessed: 18-Feb-2020].
- [13] V. Quintero, A. Perez, F. Jaramillo, C. Estevez, and M. Orchard, “Procedure for selecting a transmission mode dependent on the state-of-charge and state-of-health of a lithium-ion battery in wireless sensor networks with energy harvesting devices,” *Proc. Annu. Conf. Progn. Heal. Manag. Soc. PHM*, pp. 1–7, 2018.
- [14] J. Zhang, L. Zhang, F. Sun, and Z. Wang, “An Overview on Thermal Safety Issues of Lithium-ion Batteries for Electric Vehicle Application,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 23848–23863, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2824838.
- [15] “Secondary Battery Market | Growth, Trends, and Forecast (2020 - 2025).” [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/global-secondary-battery-market-industry>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [16] E. Devices and T. Batteries, “Chapter 2 CHARACTERISTICS OF BATTERIES FOR.”
- [17] K. Wei, J. Wu, W. Ma, and H. Li, “State of charge prediction for UAVs based on support vector machine,” vol. 2019, no. Istai 2018, pp. 9133–9136, 2019, doi: 10.1049/joc.2018.9201.
- [18] “Transporting Lithium Batteries Used In Medical Devices - Medical Product Outsourcing.” [Online]. Available: https://www.mpo-mag.com/contents/view_online-exclusives/2019-04-16/transporting-lithium-batteries-used-in-medical-devices/. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [19] J. Su, S. Ki, K. Chul, and H. Seok, “Electrode materials for biomedical patchable and implantable energy storage devices,” *Energy Storage Mater.*, no. April, 2019, doi: 10.1016/j.ensm.2019.04.032.
- [20] “Chapter 5,” 1909.
- [21] N. Omar and P. Van Den Bossche, “Assessment of Performance of Lithium Iron Phosphate Oxide , Nickel Manganese Cobalt Oxide and Nickel Cobalt Aluminum Oxide Based cells for Using in Plug-in Battery Electric Vehicle Applications,” 2011.
- [22] R. Benato, S. D. Sessa, and F. Bevilacqua, “Measurement-Based Lithium-Manganese Oxide Battery Model.”
- [23] F. P. Tredeau and Z. M. Salameh, “Evaluation of Lithium Iron Phosphate Batteries for Electric Vehicles Application,” pp. 1266–1270, 2009.
- [24] J. Wen, Y. Yu, and C. Chen, “A review on lithium-ion batteries safety issues: Existing problems and possible solutions,” *Mater. Express*, vol. 2, no. 3, pp. 197–212, 2012, doi: 10.1166/mex.2012.1075.
- [25] Michael, R. P. Sujatmiko, T. Abuzairi, M. Rizkinia, and T. A. Kurniawan, “Design of overcharging protection and passive balancing circuits using dioda for lithium-ion battery management system,” *2019 16th Int. Conf. Qual. Res. QIR 2019 - Int. Symp. Electr. Comput. Eng.*, pp. 1–4, 2019, doi: 10.1109/QIR.2019.8898267.
- [26] M. Hartmann and J. Kelly, “Thermal Runaway

- Prevention of Li-ion Batteries by Novel Thermal Management System Mark Hartmann – CTO , Outlast Technologies LLC Joe Kelly – Senior Scientist , Outlast Technologies LLC,” *2018 IEEE Transp. Electrification Conf. Expo*, pp. 477–481.
- [27] M. Klinsmann, F. E. Hildebrand, M. Ganser, and R. M. McMeeking, “Dendritic cracking in solid electrolytes driven by lithium insertion,” *J. Power Sources*, vol. 442, no. August, p. 227226, 2019, doi: 10.1016/j.jpowsour.2019.227226.
- [28] “Autolab PGSTAT302N.” [Online]. Available: <https://www.metrohm.com/es/productos/potenciostat/autolab-modular-line/PGSTAT302N>. [Accessed: 26-Feb-2020].
- [29] D. Pola, F. Guajardo, E. Jofr, V. Quintero, and P. Aramis, “Particle-Filtering-Based State-of-Health Estimation and End-of-Life Prognosis for Lithium-Ion Batteries at Operation Temperature,” 2010, pp. 1–10.
- [30] B. E. Olivares, M. A. Cerda Muñoz, M. E. Orchard, and J. F. Silva, “Particle-filtering-based prognosis framework for energy storage devices with a statistical characterization of state-of-health regeneration phenomena,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 62, no. 2, pp. 364–376, 2013, doi: 10.1109/TIM.2012.2215142.
- [31] K. S. Ng, C. S. Moo, Y. P. Chen, and Y. C. Hsieh, “Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 1506–1511, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.11.021.
- [32] I. Snihir, W. Rey, E. Verbitskiy, A. Belfadhel-Ayeb, and P. H. L. Notten, “Battery open-circuit voltage estimation by a method of statistical analysis,” *J. Power Sources*, vol. 159, no. 2, pp. 1484–1487, 2006, doi: 10.1016/j.jpowsour.2005.11.090.
- [33] L. Ran, W. Junfeng, and L. Gechen, “Prediction of State of Charge of Lithium-ion Rechargeable Battery with Electrochemical Impedance Spectroscopy Theory,” *2010 5th IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, pp. 684–688, 2010, doi: 10.1109/ICIEA.2010.5516984.
- [34] A. J. Salkind, C. Fennie, P. Singh, T. Atwater, and D. E. Reisner, “Determination of state-of-charge and state-of-health of batteries by fuzzy logic methodology,” *J. Power Sources*, vol. 80, no. 1, pp. 293–300, 1999, doi: 10.1016/S0378-7753(99)00079-8.
- [35] M. Charkhgard and M. Farrokhi, “State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using neural networks and EKF,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 12, pp. 4178–4187, 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2043035.
- [36] M. Berecibar, I. Gandiaga, I. Villarreal, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van Den Bossche, “Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 56, pp. 572–587, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.11.042.
- [37] W. Guo and W. M. Healy, “Power Supply Issues in Battery Reliant Wireless Sensor Networks: A Review,” *Int. J. Intell. Control Syst.*, vol. 19, no. 1, pp. 15–23, 2014.

Proceso de pruebas de *software* para un modelo de calidad en Cuba

Process of *software* testing for a model of quality in Cuba

Lisandra Díaz Figueredo ^{1*}, Yoandy Lazo Alvarado ², Leanet Tamayo Oro ²

¹ Empresa de Tecnologías de la Información (ETI), Biocubafarma, Cuba

² Dirección de Consultoría y Evaluación a Procesos, Centro Nacional de Calidad de Software (CALISOFT), Cuba

*Autor de correspondencia: lisandra@eti.biocubafarma.cu

RESUMEN— La industria de *software* se desarrolla a un ritmo acelerado y la competitividad en el mercado exige a las empresas alta calidad en los procesos y productos. La calidad se obtiene al realizar una correcta gestión, aplicando actividades de planificación, aseguramiento y control de la calidad y mejoras. Los modelos de calidad proponen un conjunto de buenas prácticas enfocadas a los procesos de gestión. Cuba cuenta con un modelo aplicable al país, basado en las buenas prácticas de los modelos y normas de referencia, nombrado Modelo de Calidad para el Desarrollo de Aplicaciones Informáticas (MCDAI). En el caso de las actividades de control de la calidad sobresalen los procesos de Verificación y Validación que aseguran el cumplimiento de los requisitos de las partes interesadas; las pruebas de *software* es la principal técnica dinámica de estos procesos. Esta investigación propone un conjunto de requisitos específicos que sintetizan las buenas prácticas de pruebas de *software* en un proceso base. Fue diseñado para formar parte de los procesos base del MCDAI. Incluye una descripción gráfica y textual del proceso, que facilita el cumplimiento de los requisitos, y los roles involucrados. Este proceso base fue sometido a grupos focales y a encuesta de satisfacción de expertos para comprobar la utilidad de la propuesta y a proyectos piloto para verificar que con su aplicación aumenta la efectividad de las pruebas en etapas tempranas durante el desarrollo de *software*.

Palabras clave—Prueba de *software*, modelo de la calidad, verificación, validación.

ABSTRACT— The software industry is developing at an accelerated pace, and the competitiveness in the market requires company's high-quality processes and products. Quality is obtained by performing proper management, applying planning activities, quality assurance and control and improvements. The quality models propose a set of good practices focused on management processes. Cuba has a model applicable to the country, based on the best practices of the reference models and standards, named Quality Model for the Development of Computer Applications (MCDAI). In the case of quality control activities, the Verification and Validation processes ensure compliance with stakeholder requirements; software testing is the main dynamic technique of these processes. This research proposes a set of specific requirements that synthesize good software testing practices in a base process. It was designed to be part of the base processes of the MCDAI. It includes a graphic and textual description of the process, which facilitates compliance with the requirements and the roles involved. An indicator system is defined to provide the project and the management of an organization with an objective view of the processes and products of associated works. This process was submitted to focus groups, and an expert satisfaction survey to verify the usefulness of the proposal and to pilot projects to verify that with its application the effectiveness of the tests increases during software development.

Keywords— Testing of *software*, quality model, verification, validation.

1. Introducción

La industria de *software* se desarrolla a un ritmo acelerado y la competitividad en el mercado exige a las empresas alta calidad en los procesos y productos que desarrolla. Según Pressman, la calidad del *software* se obtiene cuando se usan prácticas y procesos probados de la Ingeniería del *Software*, cuando se planifican y

gestionan correctamente los proyectos, se realiza el control exhaustivo y se tiene una infraestructura de aseguramiento de la calidad [1], [2], [3]. De este planteamiento se concluye que cuando se gestiona la calidad, se logra la calidad del software.

Para asegurar los requisitos del usuario y la calidad esperada de un producto de software, son fundamentales

los procesos de Verificación y Validación (V&V) [4], [5]; el primero establece la correspondencia entre un producto y su especificación, y el segundo, define si un producto de software es adecuado para su uso en el entorno operativo previsto [6], [7], [8]. Las pruebas de software es la principal técnica dinámica de estos procesos, implican ejecutar una implementación del *software* con datos de prueba, se examinan las salidas y su entorno operacional para comprobar que funciona tal y como se requiere [9].

Al analizar los conceptos definidos por [10], [11], [12], [13], [14], [15] se concluye que las pruebas de software constituyen el conjunto de actividades realizadas para facilitar el descubrimiento y/o la evaluación de propiedades de uno o más elementos de prueba. Se considera un proceso crítico que puede demostrar la presencia de defectos, pero nunca demostrar la ausencia de ellos. Puede ser usado para prevenir los defectos, determinar la información necesaria y el nivel de calidad para la toma de decisiones.

Cuba desarrolla acciones para fortalecer la Industria Cubana de Programas y Aplicaciones Informáticas, entre las que se encuentra el Modelo de la Calidad para el Desarrollo de Aplicaciones Informáticas (MCDAI) [16], y las Reglas básicas para la producción de *software* [17] El MCDAI tiene un enfoque a procesos y es la propuesta aceptada para la Industria Cubana de Programas y Aplicaciones Informáticas (ICPAI) [18].

Un diagnóstico realizado en el año 2014 por el Centro Nacional de Calidad de Software (CALISOFT) a una muestra del 43.75% de las organizaciones desarrolladoras de *software* en Cuba, permitió identificar que: el 57% son pequeñas y medianas empresas (PYME) [19] [18], el 55.74% aplican metodologías ágiles y 85.7% utilizan un enfoque a proceso [20].

Los resultados del diagnóstico también permitieron identificar que el 28.57% de las organizaciones no implementa un proceso de pruebas de *software*, el 78.2% no realiza pruebas basadas en los requisitos funcionales y no funcionales, el 65% no diseña casos de prueba, el 55.1% ejecuta las pruebas en el ambiente de producción, obviando el entorno controlado que se prepara para ejecutar las mismas, y el 16.42% no cumple la totalidad de los requisitos pactados con el cliente [20] [21].

En el 2017 dicha entidad, aplicó otro diagnóstico a una muestra del 28.13% de ICPAI. Los resultados permitieron corroborar la situación en el desarrollo de *software* del país respecto a las pruebas de *software*, sobresaliendo que el 55% de las organizaciones no define un plan de prueba; el 65% no realiza pruebas unitarias y de aceptación; el 45 % no realiza la gestión de los defectos; el 50.3% no prepara los entornos de prueba; y el 89.3% no realiza acciones para prevenir no conformidades [22].

En un análisis realizado por el Departamento de Evaluación de Productos, perteneciente a CALISOFT en el periodo 2014 al 2017, demostró que el 70% de los proyectos que solicitaron las evaluaciones a productos no entregaron evidencia del diseño de los casos de prueba, ni el de la gestión de defectos. En las pruebas que realiza dicha entidad, se obtuvo que el 70% de las no conformidades identificadas en el entorno operacional pudieron ser detectadas y corregidas en etapas tempranas. Este resultado demuestra que las pruebas de *software* se ejecutan incorrectamente o no se hacen durante el desarrollo.

A partir de la situación problemática antes expuesta, se plantea como objetivo principal de esta investigación: elaborar un proceso base de Pruebas de *software* para el MCDAI que permita aumentar la efectividad de las pruebas durante el proceso de desarrollo de *software*.

Según la Real Academia de la Lengua Española, la efectividad es la capacidad de lograr el efecto que se desea o se espera [23]. A los efectos de esta investigación la efectividad es la capacidad de lograr que aumenten la detección de los defectos en etapas tempranas durante el desarrollo de *software* y disminuyan las No conformidades (NC) en el entorno operacional.

2. Materiales y métodos

Para cumplir con el objetivo planteado, se realizó una revisión bibliográfica sobre los procesos de V&V y pruebas de *software* en modelos de la calidad y normas internacionales, como son: ISO/IEC/IEEE 12207:2017 [8], CMMI-DEV [24], COMPETISOFT [25], MoProSoft [26], ISO/IEC/IEEE 29119-1:2013 [27], TMMI [28], ISO/IEC/IEEE 29119-2:2013 [10] y *Software Qualification Testing Process* [15]. Además se consultó el diseño y los resultados de investigaciones científicas

realizadas con anterioridad [2], [29], [30], [31] y la literatura [13], [12], [1], [11], [9]. La Tabla 1, muestra un resumen de este estudio, la cual constituye la base de esta propuesta.

El análisis evidenció que las buenas prácticas de pruebas de *software*, se tratan de manera general y están incluidas como parte aislada de otros procesos. En todos se analizan y diseñan casos de prueba, preparan entorno y ejecutan las pruebas; sin embargo, solo ISTQB e ISO/IEC/IEEE 29119-2 poseen un proceso específico de pruebas. CMMI, MPS.Br e ISO/IEC/IEEE 12207 incluyen los procesos de Validación y Verificación. La estrategia de pruebas en la mayoría de los casos se encuentra dentro de la planificación del proyecto y se obvia información importante para la toma de decisiones. En el caso de determinar cobertura y evaluar las características de la calidad, solo CMMI las incluye dentro del conjunto común de medidas de proceso y de producto para los procesos estándar de la organización, y ISTQB e ISO/IEC/IEEE 29119-2 en la fase de diseño. En el caso de analizar y diseñar las pruebas para la reutilización, se emplea el término: reutilización de los casos de prueba. Dentro del análisis de los resultados en CMMI se incluye identificar las causas de los defectos, mientras que en el modelo de pruebas TMMI se encuentran en el nivel optimizado, correspondiente al área de proceso: Prevención de defectos. El seguimiento y control para el proyecto de pruebas se tiene en cuenta en ISTQB como control, y ISO/IEC/IEEE 29119-2 y TMMI como el Proceso de control y monitoreo de pruebas, porque son específicos de pruebas, pero en el caso de los demás, ocupa lugar en otras áreas o procesos.

Teniendo en cuenta lo antes descrito, donde las actividades de prueba se realizan de forma generalizada, y la mayoría forman parte de los procesos de V&V lo cual limita su especialización y los recursos (tiempo y personal); se decidió realizar una propuesta propia de requisitos que indiquen “*qué*” hacer para ejecutar las pruebas al producto de *software*, incorporando paulatinamente buenas prácticas para su gestión y ejemplificando “*cómo*” ponerlos en práctica mediante un proceso que contenga actividades, roles asociados, técnicas y herramientas.

2.1 Modelo de Calidad para el Desarrollo de Aplicaciones Informáticas

El MCDAI tiene como objetivo proporcionar a las entidades desarrolladoras de *software* un modelo sustentado en las mejores prácticas teniendo en cuenta las características nacionales y basándose en los siguientes principios (fácil de entender, ligero y que sirva de base para alcanzar evaluaciones en otros modelos o estándares). El modelo está dirigido a entidades dedicadas al desarrollo y/o mantenimiento de *software*. Está enfocado a las Pymes por ser mayoría en la Industria Cubana de Programas y Aplicaciones Informáticas, aunque también puede ser usado por grandes empresas. Cualquier organización que no cuente con procesos establecidos puede usar el modelo ajustándolo de acuerdo con sus necesidades, mientras que las que ya tienen procesos establecidos pueden usarlo como punto de referencia para identificar los elementos que pueden mejorar [18]. El MCDAI se compone de: 1) Guía general, 2) Guía de implementación y 3) Guía de evaluación. La Guía implementación agrupa los procesos en las categorías: I) Gestión organizacional, II) Gestión de proyectos, III) Ingeniería y IV) Soporte.

Tabla 1. Buenas prácticas seleccionadas de modelos y estándares de calidad.
Fuente: Elaboración propia.

| Buenas prácticas | CMMI-DEV | TMMI | MPS.Br | MoProSoft | COMPETISOFT | ISTQB | ISO/IEC /IEEE | |
|---|----------|------|--------|-----------|-------------|-------|---------------|-------|
| | | | | | | | 12207 | 29119 |
| Elaborar estrategia de pruebas. | x | x | x | | | x | x | x |
| Determinar la cobertura de las pruebas. | x | x | | | | x | | x |
| Seleccionar las medidas de la calidad. | x | x | | | | x | x | x |
| Automatizar la ejecución de las pruebas. | x | x | | | | x | | x |
| Analizar y diseñar las pruebas. | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Determinar los elementos de cobertura. | x | x | | | | x | x | x |
| Analizar y diseñar las pruebas para la reutilización. | x | x | | | | x | x | x |
| Configurar entorno de pruebas. | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Ejecutar pruebas. | x | x | x | x | x | x | x | x |

| | | | | | | | | |
|--|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Analizar los resultados de las pruebas. | x | x | x | x | x | x | x | x |
| Identificar las causas de los defectos. | x | x | | | | | | |
| Evaluar las características de la calidad. | x | x | | | | x | x | x |
| Realizar seguimiento y control del proyecto de prueba. | | x | x | x | x | x | x | |
| Finalizar el proyecto de prueba. | x | x | x | x | x | x | x | x |

La categoría de Ingeniería reúne los procesos base técnicos necesarios para el desarrollo del *software*. Cada proceso base contiene un propósito, requisitos específicos y la modelación del proceso. En el caso de los requisitos específicos, se definen por niveles Básico, Intermedio y Avanzado; y se dividen en tres partes: título, descripción y evidencia recomendada [18].

3. Proceso base de Pruebas de software

3.1 Propósito y requisitos específicos

Esta investigación propone el proceso base de Pruebas de *software* y como es parte del MCDAI está alineado con su estructura. Tiene el **propósito** de comprobar que se haya elaborado el producto o componentes de productos de acuerdo con lo especificado y que se hayan cumplido los requisitos: para una utilización o aplicación específica, prevista por las partes interesadas pertinentes.

Para cumplir con este propósito y en base a las buenas prácticas de pruebas identificadas como parte de la construcción del marco teórico, se propusieron requisitos específicos divididos en tres niveles de madurez. La división de requisitos en los niveles de madurez permite que la propuesta pueda ser adoptada de forma escalonada, incorporando pequeñas mejoras al proyecto.

Tabla 2. Requisitos específicos del proceso base de Pruebas de software

| | |
|---------------------|--|
| Nivel Básico | PS 3 Analizar y diseñar las pruebas. PS 4 Configurar el entorno de pruebas. PS 5 Ejecutar prueba. PS 5.3 Ejecutar prueba del sistema. PS 5.4 Ejecutar prueba de aceptación. PS 5.5 Ejecutar pruebas de repetición. PS 6 Analizar los resultados de las pruebas. PS 9 Finalizar el proyecto de prueba. |
|---------------------|--|

| | |
|-------------------------|---|
| Nivel Intermedio | PS 1 Elaborar estrategia de pruebas. PS 5.1 Ejecutar pruebas de unidad/componentes. PS 5.2 Ejecutar prueba de integración. PS 5.6 Ejecutar pruebas de regresión. PS 8 Realizar seguimiento y control del proyecto de prueba. |
| Nivel Avanzado | PS 2 Automatizar la ejecución de las pruebas. PS 3.1 Determinar los elementos de cobertura de prueba. PS 3.2 Analizar y diseñar pruebas para la reutilización. PS 6.1 Identificar las causas de los defectos. PS 7 Evaluar las características de la calidad. |

3.2 Proceso y actividades

El proceso base está formado por siete subprocesos, como se muestra en la Figura 1, uno relacionado con la planificación, cuatro con la ejecución de los niveles de prueba, uno con finalizar el proyecto de prueba y el último dedicado al seguimiento y control.

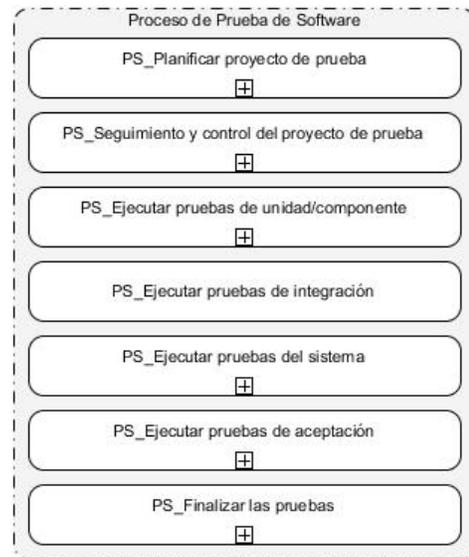


Figura 1. Relación de subprocesos que componen el proceso base Pruebas de software.

3.2.1 Relación del proceso base Pruebas de software con Desarrollo de la solución

El proceso base de Pruebas de *Software* posee estrecha relación con el proceso base de Desarrollo de la Solución del modelo, específicamente con el proceso de DS_Construir y entregar el producto, el cual se encarga de invocar mediante eventos a los subprocesos de ejecución de las pruebas (unidad/componente, de integración, de sistema y de aceptación) así como

resolver los defectos, no conformidades y peticiones de cambios aceptadas como se muestra en la figura 2.

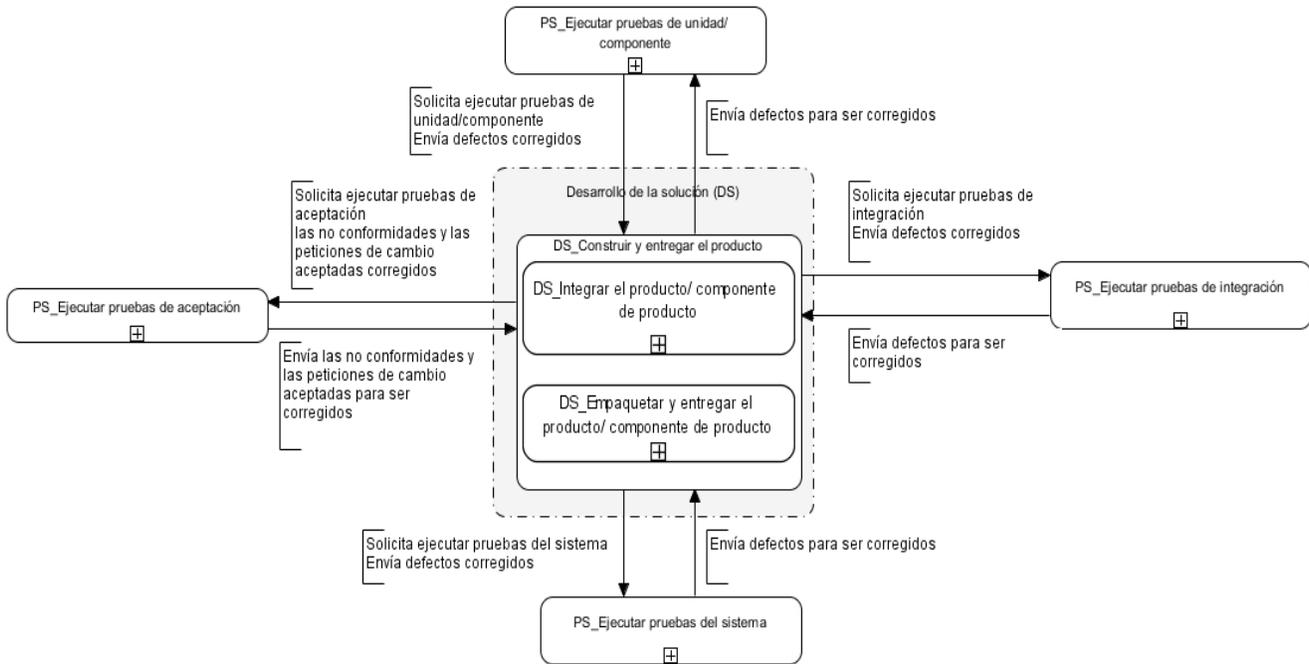


Figura 2. Relación de los procesos base Pruebas de software y Desarrollo de la Solución.

3.2.2 Subproceso Planificar proyecto de prueba

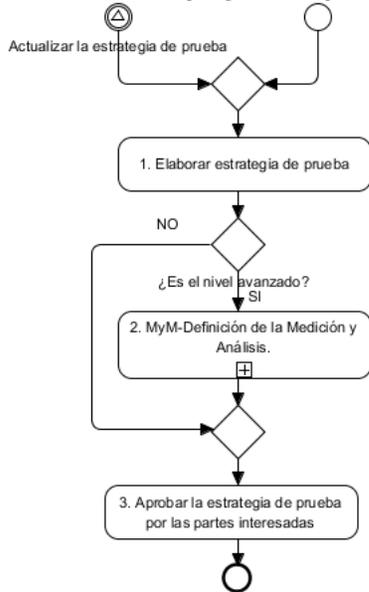


Figura 3. Descripción gráfica del subproceso PS_Planificar proyecto de prueba.

El subproceso Planificar proyecto de pruebas, como se aprecia en la figura 3, consiste en elaborar una estrategia de prueba siguiendo el enfoque de prueba basado en riesgos. En dependencia de las características de la calidad, se identifican los indicadores para cubrir los requisitos de la calidad del producto y/o componente de producto, y los criterios de decisión para la medida de la calidad y de la evaluación, guiado por el subproceso MyM-Definición de la Medición y Análisis. También se aprueba la estrategia por las partes interesadas y realizan los cambios pertinentes hasta llegar a la aprobación final.

3.2.3 Subproceso Ejecutar pruebas de Unidad o componente

El sub proceso PS_Ejecutar Pruebas de unidad/componente, como se aprecia en la fFigura 5, consiste en instalar y/o configurar en el entorno de desarrollo las herramientas necesarias para diseñar y ejecutar las pruebas unitarias; analizar la base de pruebas para entender las unidades funcionales que serán desarrolladas; codificar los casos de prueba y ejecutar el procedimiento de pruebas unitarias; si se identificaron los defectos se ejecutan las pruebas de repetición y regresión para comprobar si los mismos fueron corregidos.

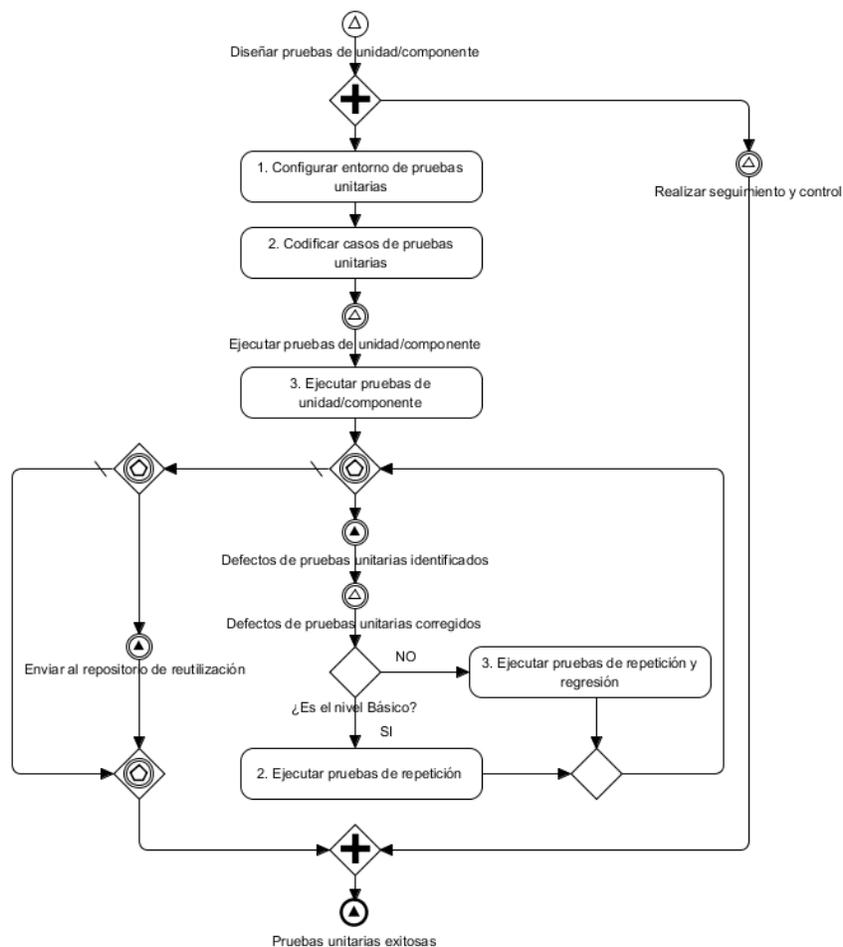


Figura 4. Descripción gráfica del subproceso DPS_Ejecutar Pruebas de unidad/componente.

3.2.4 Subproceso – Ejecutar pruebas de integración

El subproceso PS_ Ejecutar pruebas de integración como se muestra en la figura 5, consiste en instalar y/o configurar en el entorno de desarrollo las herramientas necesarias para diseñar y ejecutar las pruebas de integración; analizar la Base de prueba para entender las relaciones entre componentes e interfaces, así como los mecanismos de integración y ejecutar el “Procedimiento de pruebas de integración”. Además, teniendo en cuenta los resultados reales de las pruebas compara los resultados esperados con los reales de los casos de prueba, para determinar si pasa o falla la prueba; y si se identificaron los defectos se ejecutan las pruebas de repetición y regresión para comprobar si los mismos fueron corregidos.

3.2.5 Subproceso – Ejecutar pruebas del Sistema

El sub proceso PS_ Ejecutar pruebas del sistema como se muestra en la figura 6 , consiste en analizar la base de pruebas teniendo en cuenta el nivel de prueba, tipo de prueba y características de la calidad a probar definidas; diseñar los casos de prueba teniendo en cuenta los elementos de la base de prueba; crear los servidores virtuales, si son necesarios para instalar el producto y configurar los mismos con las características necesarias para crear el entorno controlado deseado; se ejecutan los Procedimientos de pruebas de sistemas para cada tipo de prueba, según la planificación; se registran los resultados reales obtenidos de cada caso de prueba que compone el procedimiento; compara los resultados esperados con los reales de los casos de prueba, para determinar si pasa o falla la prueba; y en caso de fallo registra y clasifica los defectos.

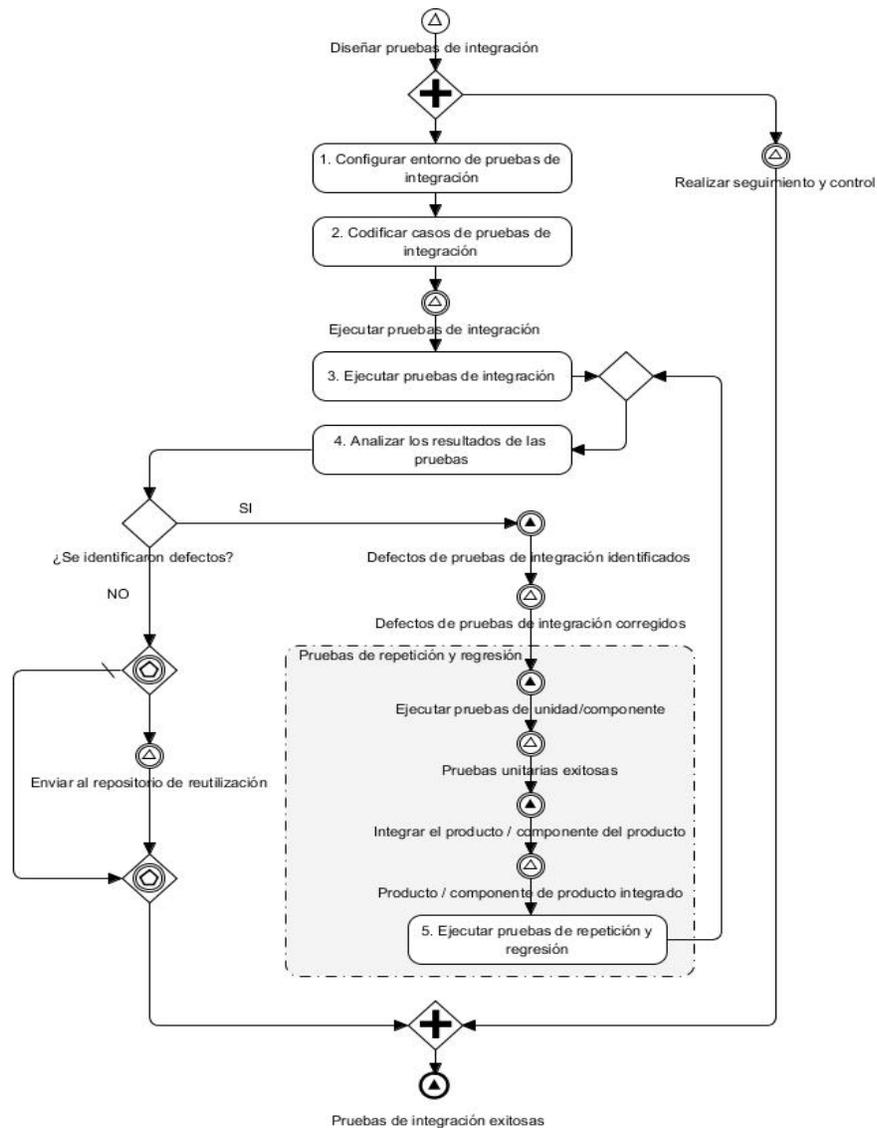


Figura 5. Descripción gráfica del subproceso PS_Ejecutar Pruebas de integración.

3.2.6 Subproceso – Ejecutar pruebas de aceptación

El sub proceso PS_ Ejecutar pruebas de aceptación como se muestra en la figura 7, consiste en analizar la base de pruebas; identificar los casos de prueba que se requieren diseñar para ejecutar las pruebas; diseñar los casos de prueba teniendo en cuenta los elementos de la base de prueba y aplica la técnica de diseño especificada; crear los servidores virtuales, si son necesarios para instalar el producto en el entorno operacional controlado y configurar los servidores con las características necesarias para crear el entorno operacional controlado deseado. Configurar el entorno en las PC cliente y/o

dispositivos portátiles donde se ejecutarán las pruebas; las partes interesadas pertinentes aceptan los procedimientos de prueba de Aceptación elaborados y ejecutan el mismo, se observan y registran los resultados reales obtenidos de cada caso de prueba. Se identifican si existe conformidad con el producto, pedidos de cambios a los requisitos pactados y/o no conformidades por incumplimiento de estos y si se identificaron no conformidades se ejecutan las pruebas de repetición y regresión para comprobar si las mismas fueron corregidas.

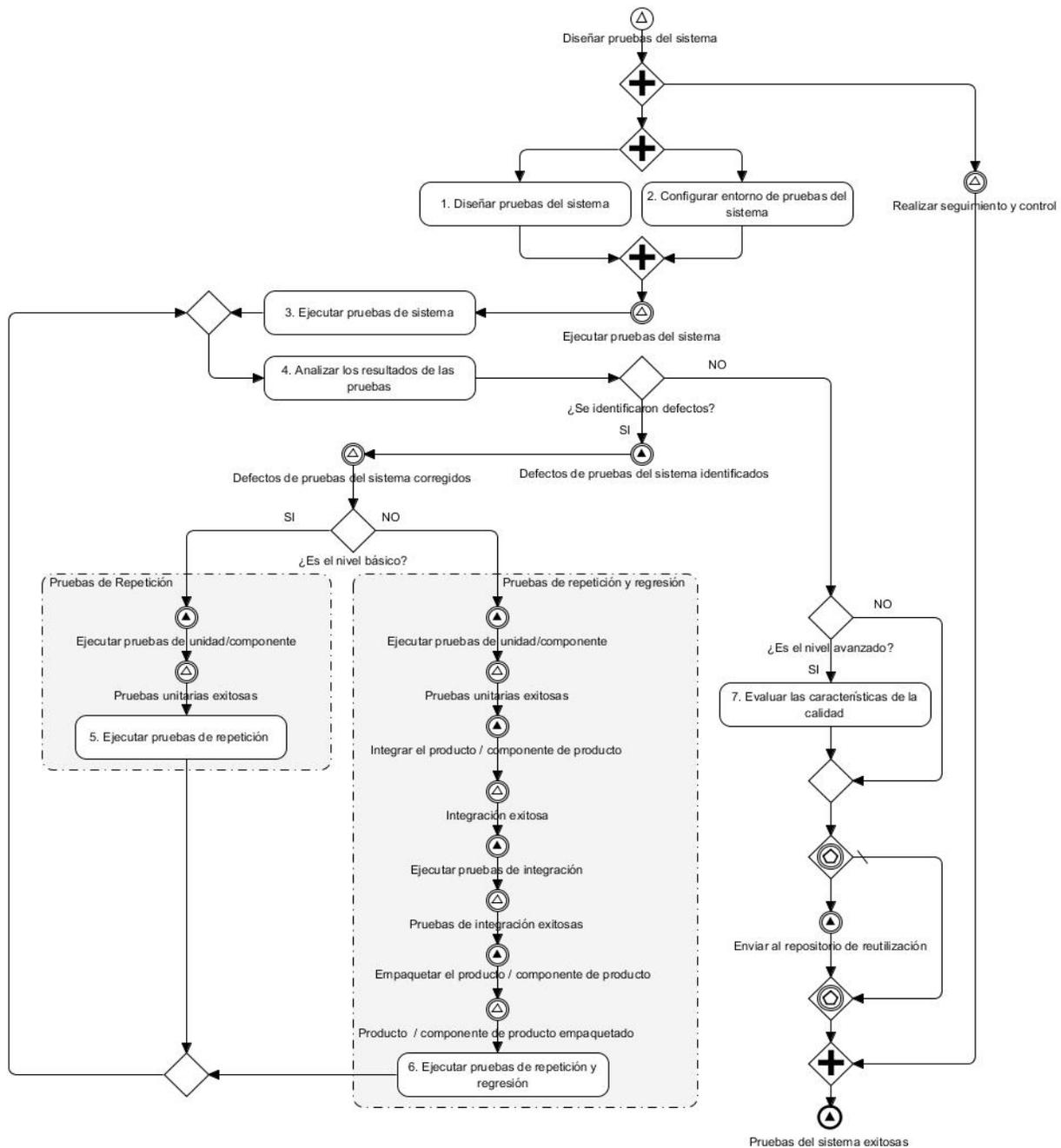


Figura 6. Descripción gráfica del subproceso PS_Ejecutar Pruebas de sistema.

3.2.7 Subproceso PS - Realizar seguimiento y control

El subproceso PS_ Realizar seguimiento y control como se muestra en la Figura 8, consiste en realizar el seguimiento de la estrategia de prueba relacionada para determinar su cumplimiento y/o desviaciones y analizar

los riesgos existentes del proyecto y producto para identificar cambios en el coeficiente de exposición de los riesgos. Analiza el impacto de las desviaciones en el cumplimiento de la “Estrategia de pruebas” e identifica los problemas asociados.

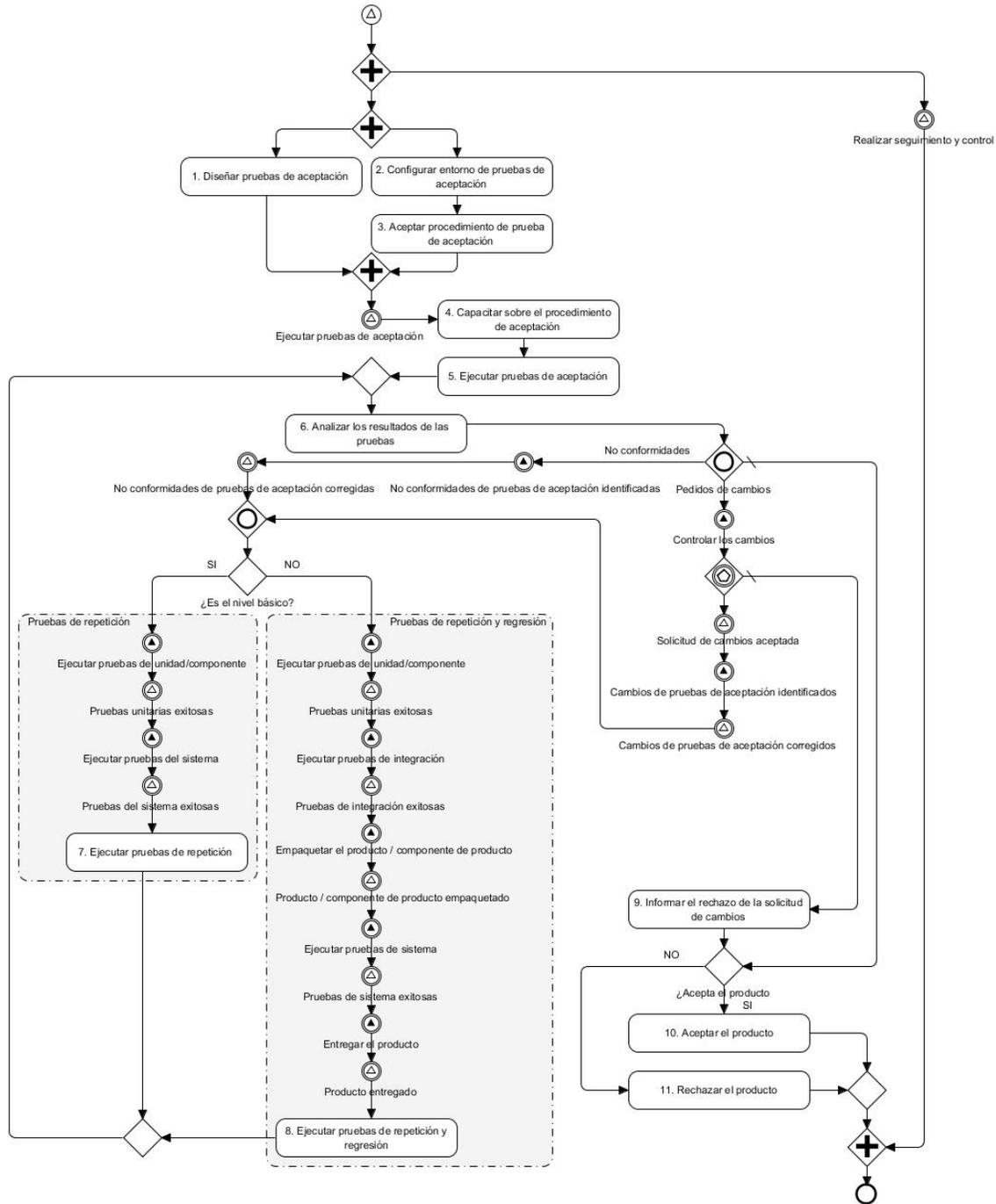


Figura 7. Descripción gráfica del proceso PS – Ejecutar Pruebas de aceptación.

3.2.8 Subproceso PS –Finalizar proyecto de prueba

El subproceso PS_Finalizar proyecto de prueba como se aprecia en la Figura 9, consiste crear un informe que analice el cumplimiento de la planificación del proyecto de prueba, resuma los resultados finales de la

ejecución de las pruebas y que describa los defectos/no conformidades encontradas; por otra parte, se analiza y concilia dicho informe y archivan todos los artefactos generados.

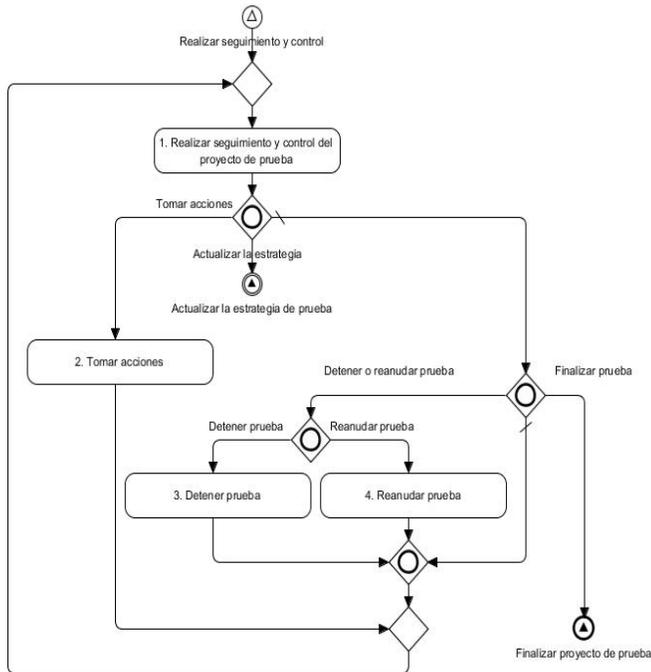


Figura 8. Descripción gráfica del proceso PS - Realizar seguimiento y control.

3. Validación

Para validar los requisitos y el proceso base de Pruebas de software, se empleó la técnica de grupos focales; que consiste en la discusión libre y espontánea de determinado tema por grupos pequeños de personas. La discusión es guiada por un moderador y se registran todos los criterios que se emiten [32]. Para su conformación se tuvo en cuenta los criterios emitidos por Aigner [33], al decir que el tamaño del grupo debe oscilar entre cuatro (4) y doce (12) participantes; asegurando que todos puedan emitir sus valoraciones y que haya riqueza de ideas. Además, debe ser homogéneo, determinado por el propósito del estudio [21].

Para cumplir con lo antes expuesto se seleccionaron 10 especialistas en calidad y pruebas de *software* con un promedio de 8 años de experiencia de las entidades: CALISOFT (1), Banco Nacional de Cuba (2), CUJAE (3), GET (2), Xetid (1) y ETECSA (1), los cuales fueron convocados a participar en 7 talleres para debatir la propuesta.

Se tomaron alrededor de 60 acuerdos que se cumplieron en el tiempo planificado y permitieron mejorar el proceso propuesto, logrando así procesos corregidos y refinados

en correspondencia con las particularidades de la industria cubana. En el último encuentro, los profesionales plantearon que el proceso base de pruebas de *software*, cumple con las necesidades que tienen las organizaciones de la industria y su utilidad para adaptarse fácilmente a los diversos entornos de desarrollo de *software*.

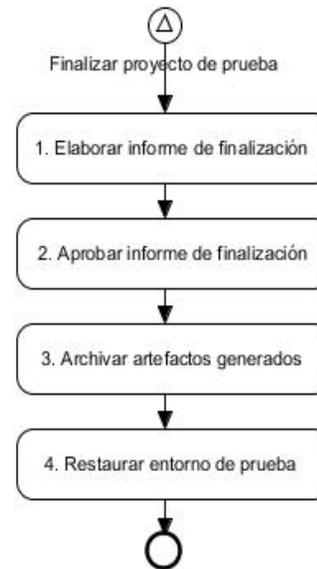


Figura 9. Descripción gráfica del proceso PS - Finalizar proyecto de prueba.

Concluida la propuesta teórica del proceso se utilizó el criterio de expertos, específicamente la escala psicométrica creada por Rensis Likert [34], como método para procesamiento estadístico de criterios. Para ello, fueron seleccionados posibles expertos a los cuales se les aplicó una encuesta para determinar el coeficiente de competencia de estos y se seleccionaron los adecuados, se les presentó una encuesta con la propuesta de los requisitos del proceso base de pruebas de *software*, se procesó y valoró la información obtenida. Los 25 expertos seleccionados son graduados universitarios, con un promedio de 12 años de experiencia en roles de administrador de la calidad, líder de pruebas y probador; 14 máster y 3 doctores; 14 poseen la certificación Tester Foundation Level y 5 Tester Advanced Level, Test Manager. Dichos expertos emitieron sus criterios y evaluaron del 1 al 5 la calidad de los requisitos planteados. Al analizar los resultados se puede concluir que los requisitos PS2, PS4.6 y PS5 obtuvieron la

calificación más alta y que el PS2.2 la más baja, puesto que el 4 % le asignó 3 puntos. Este resultado permitió afirmar que PS2, PS4.6 y PS5 se encontraban listos para utilizar en el proceso y publicar, mientras que el resto con puntuaciones similares fueron modificados. En el caso de PS2.2 “Determinar elementos de cobertura” se le modificó la redacción y se identificó que debe ir antes de PS 2.1 “Seleccionar las medidas de la calidad”; se creó un nuevo requisito y se puso como sub-requisito de PS 1, enfocado a la planificación de la cobertura de prueba y

los criterios de finalización. El índice porcentual relacionado con la valoración de los expertos de cada requisito se evidencia en la figura 10, el cual alcanza o supera el 85.5% en todos los casos lo que demuestra una alta valoración de los expertos respecto a la propuesta teórica del proceso base.

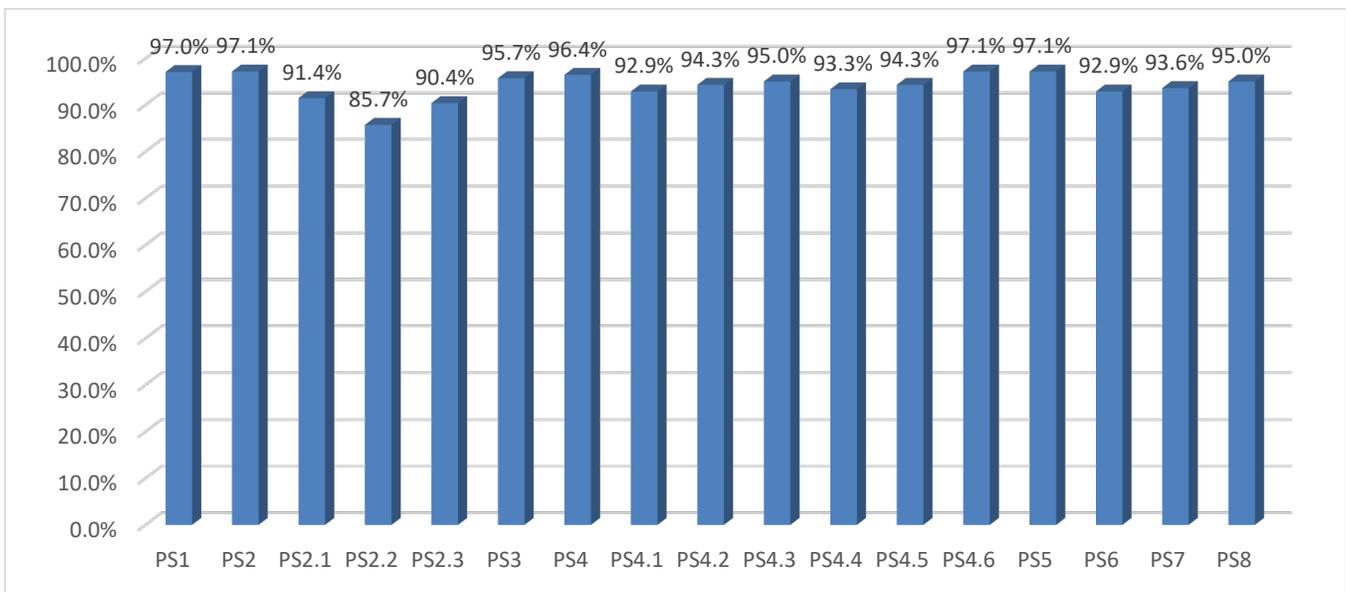


Figura 10. Valoración de los expertos con respecto a la calidad de los requisitos.

Para valorar el efecto de la implementación del proceso, se utilizó el método de preexperimento [35], con el objetivo de demostrar que con el proceso propuesto aumentó la detección de los defectos en etapas tempranas durante el desarrollo de *software* y disminuyeron las NC en el entorno operacional.

El preexperimento se realizó a través del diseño de preprueba - postprueba con un solo grupo. El mismo permite determinar un punto de referencia inicial para ver qué nivel tenía el grupo en las variables dependientes antes del estímulo, permitiendo su seguimiento [34]. Se realizaron en cuatro proyectos piloto correspondientes a al grupo empresarial Biocubafarma, con características similares en estructura y funciones. Los proyectos están formados por siete especialistas: un jefe de proyecto, dos analistas, un probador, dos programadores y un gestor de

la configuración) que desarrollan aplicaciones web utilizando el mismo lenguaje de programación y tecnologías para el desarrollo.

El pre-experimento se realizó en los meses de junio a septiembre del presente año y se obtuvo el resultado que se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Análisis preprueba - postprueba. Efectividad del proceso de pruebas.

| Antes (Sin aplicar la propuesta) | Indicadores | | Después (Aplicada la propuesta) | Indicadores | |
|-------------------------------------|----------------|----------|------------------------------------|----------------|----------|
| | Cant. Defectos | Cant. NC | | Cant. Defectos | Cant. NC |
| P1 | 100 | 20 | P1 | 150 | 5 |
| P2 | 125 | 12 | P2 | 200 | 10 |
| P3 | 220 | 4 | P3 | 80 | 3 |
| P4 | 115 | 75 | P4 | 230 | 10 |

A continuación, se especifican los indicadores que fueron evaluados en el preexperimento:

Cant.Defectos = Cantidad de defectos identificados por el equipo de proyecto en etapas tempranas durante el proceso de desarrollo de *software*.

Cant.NC = Cantidad de NC detectadas por el cliente en el entorno operacional del *software*.

Pi = Proyectos del 1 al 4 que aplicaron la propuesta.

Como resultado de la investigación, se pudo apreciar una mejoría en los indicadores de efectividad del proceso luego de aplicada la propuesta (con estímulo), se redujeron las NC en el entorno operacional del *software* y aumentó la detención temprana de defectos por parte del equipo de proyecto; por tanto, se puede concluir que con la aplicación del proceso propuesto se aumenta la efectividad de las pruebas durante el proceso de desarrollo de *software*.

Para conocer la satisfacción de usuarios con la propuesta se empleó la técnica de IADOV [36], [18], [21] y [34] a los especialistas que aplicaron el proceso base en sus proyectos.

En los resultados que se muestran en la figura 11 se puede apreciar que el 80% de los usuarios muestran una clara satisfacción con la propuesta presentada. Además, no se contó con usuarios insatisfechos, por lo que se obtuvo un Índice de Satisfacción Grupal de 0.9, en base a 1, lo que indica la satisfacción de los usuarios con el proceso propuesto.

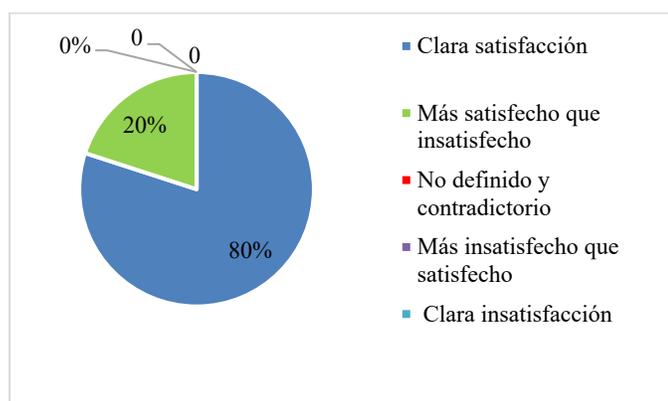


Figura 11: Valoración de usuarios sobre el proceso.

4. Conclusiones

- El análisis realizado a la literatura sobre los modelos, estándares y procesos de mejora en el área de pruebas

de *software* permitieron identificar buenas prácticas para definir los requisitos del proceso base de Pruebas de *software* y separarlos por niveles de madurez para su adopción de manera paulatina.

- La descripción gráfica y textual de los subprocesos de pruebas de *software* permite especificar las tareas que forman cada actividad, además de ejemplificarlas para un mayor entendimiento.
- La validación de la propuesta demostró que al implementar el proceso base de Pruebas de *software*, se aumentó la detención de defectos en etapas tempranas, por lo que disminuyeron las NC en el entorno operacional.
- Se recomienda analizar para futuras versiones del MCDAI una propuesta de niveles de implementación dentro de un mismo requisito específico, para que les permita a los proyectos optar por un nivel de forma objetiva y acorde a sus necesidades definidas.

REFERENCIAS

- [1] R. S. Pressman. *Ingeniería del software. Un enfoque práctico*, Séptima edición ed., The McGraw-Hill Companies, 2010.
- [2] F. J. P.-C. J. M. M. Martha Lucia Rojas-Montes, "Proceso de pruebas para pequeñas organizaciones desarrolladoras de software," *Revista Facultad de Ingeniería (Fac. Ing.)*, vol. 24, no. 39, pp. 55-70, Mayo-Agosto 2015.
- [3] M. G. Velthuis, F. O. G. Rubio, I. G. R. d. Guzmán and F. Pino, *Calidad de Sistemas de Información*, 3ra edición ampliada y actualizada ed., Madrid: RA-MA, 2015, p. 217.
- [4] I. I. O. B. P. I. I. L. G. F. P. I. I. M. C. H. I. I. L. G. C. V. Ing. Roberto Carlos Castilla Blanco, "Proceso de pruebas y suite de herramientas de soluciones informáticas para la salud," *Revista Cubana de Informática Médica*, vol. 7, no. 1, pp. 56-72, 2015.
- [5] I. C. Society, *IEEE 1012-2004 Standard for Software Verification and Validation*, 2004.
- [6] M. Á. F. Fernández, *Aplicación de técnicas de pruebas automáticas basadas en propiedades a los diferentes niveles de prueba del software*, 2015.
- [7] D. S. J. Mayorga, *Análisis de métodos, técnicas y herramientas de verificación y validación de software aplicados a la Dirección de tecnología y comunicación de la Universidad técnica de Ambato, Ecuador*, 2017.
- [8] ISO/IEC/IEEE, *ISO/IEC/IEEE 12207 Ingeniería de Sistemas y Software— Procesos del ciclo de vida del Software*, 2017.
- [9] I. Sommerville, *Ingeniería de Software*, Madrid. España: PEARSON Education, 2011.

- [10] ISO/IEC/IEEE, *ISO/IEC/IEEE 29119-2 Software and systems engineering —Software testing —Part 2:Test processes*, Switzerland: ISO/IEC/IEEE, 2013.
- [11] G. R. S. Rex Black, *Fundamentos de pruebas de software*, Editorial RBCS, 2011.
- [12] R. Pressman, *Ingeniería de Software: Un enfoque práctico*, Madrid: McGraw Hill, 2002.
- [13] I. C. S. P. P. Committee, *SWEBOK, Guide to the Software Engineering Body of Knowledge*, United States of America, 2004.
- [14] M. P. V. C. M. F. S. Francisco J.Pino Correa, *Modelo de madurez de ingeniería de software*, España: AENOR, 2014.
- [15] ISQI, *Probador Certificado Nivel básico*, Berlin , 2016.
- [16] M. d. Justicia, "*Gaceta Oficial de la República de Cuba*," Consejo de Estado, La Habana. Cuba, 2019.
- [17] M. d. I. Comunicaciones, *Resolución 124 Reglamento para la producción de los programas y las aplicaciones informáticas y su evaluación de su calidad*, La Habana, 2019.
- [18] I. D. P. Montalván, *GUÍA GENERAL PARA UN MODELO CUBANO DE DESARROLLO DE APLICACIONES INFORMÁTICAS*, Universidad de las Ciencias Informáticas , 2014.
- [19] A. Febles, *Un modelo de Referencia para la Gestión de Configuración en la de Software*, Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría". Facultad de Ingeniería Industrial.Centro de Estudios de Ingeniería y Sistemas..
- [20] CALISOFT, *CS-03-D (14-001) LIBRO DE DIAGNÓSTICO*, La Habana , 2014.
- [21] Y. L. A. ., J. F. R. P. Leanet Tamayo Oro, "Proceso de diseño del software para un modelo de la calidad en Cuba," *Revista I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 1, pp. 87-98, 2019.
- [22] CALISOFT, *CS-03-D (17-001) Libro de diagnóstico*, La Habana, 2017.
- [23] R. ACADEMIA, "Española, D. L. L. E Diccionario de la lengua española| Real Academia," 2014.
- [24] S. E. I. SEI, *CMMI para el desarrollo v1.3*, Cornege Mellon University, 2010.
- [25] H. Oktaba, M. Piattini, F. J.Pino, M. J. Orozco and C. Alquicira, *COMPETISOFT "Mejora de Procesos de Software para Pequeñas y Medianas Empresas y Proyectos"*, Madrid: Ra-Ma, 2008.
- [26] H. OKTABA and C. A. e. a. ESQUIVEL, *Modelo de Procesos para la Industria de Software MOPROSOFT*, México: Secretaría de Economía, 2005.
- [27] ISO/IEC/IEEE, *ISO/IEC/IEEE 29119-1 Software and systems engineering — Software testing — Part 1: Concepts and definitions*, 2013.
- [28] T. Foundation, *Test Maturity Model integration(TMMi)*, Irlanda: TMMi Foundation, 2015.
- [29] J. A. Mera-Paz, "*Análisis del proceso de pruebas de calidad de software*," *Ingeniería Solidaria*, vol. vol. 12, no. no. 20, pp. pp. 163-176, 2016.
- [30] D. G.-S. ., M. D. D. D. Dalila Jústiz-Núñez, "Proceso de pruebas para productos de software en un laboratorio de calidad," *Ingeniería Industrial*, vol. Vol. XXXV, no. No. 2, 2014.
- [31] P. Itti Hooda and P. Rajender Singh Chhillar, "Software Test Process, Testing Types and Techniques," *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. 111, no. 13, 2015.
- [32] N. R. M. Reyes, "Reseña metodológica sobre los grupos focales," *Editorial Universidad Don Bosco*, , vol. 9, no. 6, pp. pp.47-53, 2012.
- [33] M. Aigner, "La técnica de recolección de información mediante los grupos focales," *Revista electrónica*, vol. 7, 2006.
- [34] I. Y. L. Alvarado, *Proceso Base de Aseguramiento de la Calidad para el Desarrollo de Software en Cuba*, Universidad de las Ciencias Informáticas, 2016.
- [35] S. G. Pérez, *Proceso de evaluación de la funcionalidad a productos de software en un laboratorio de pruebas*, 2017.
- [36] I. Y. S. Osorio, *PROCESO GESTIÓN DE ADQUISICIONES PARA LA INDUSTRIA CUBANA DEL SOFTWARE*, La Habana, 2017.
- [37] B. R. a. T. P. Katarína Hrabovská, "Software Testing Process Models Benefits & Drawbacks : a Systematic Literature Review," *arxiv.org*, 2019.



Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC

Reactive compensation in transmission electrical grids based on non-linear programming considering optimal SVC location

Jhon Ramirez ^{1*}, Diego Carrión ², Esteban Inga ²

¹Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: jramirezg2@est.ups.edu.ec

RESUMEN— El subsistema de transmisión en sistemas eléctrico de potencia es muy importante, debido a que es el encargado de llevar la energía eléctrica desde la generación hasta la etapa de subtransmisión y posteriormente a ser distribuida. Las aplicaciones de los FACTS SVC en las barras del sistema eléctrico de potencia son variadas; estos dispositivos nos permiten modificar el flujo de potencia en el sistema de potencia, con el fin de aprovechar al máximo la capacidad de las líneas de transmisión; el ubicar estos elementos compensadores de potencia reactiva tiene un costo elevado, por lo que es necesario ubicarlos de forma óptima e inteligente, con el fin de hacer que la inversión sea factible. En la presente investigación se presenta una metodología para minimizar la desviación de las magnitudes de los perfiles de voltaje, para lo cual analizamos el comportamiento antes y después de la compensación reactiva en redes de transmisión mediante programación no lineal considerando ubicación óptima de SVC en los modelos de 14 y 30 barras del IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Finalmente, la ubicación de compensadores de potencia reactiva en las barras del SEP mejora los perfiles de voltaje en cada una de sus barras, minimiza costos de inversión y reduce las pérdidas de potencia activa y reactiva en las líneas de transmisión.

Palabras clave— *Compensador estático VAR, optimización, flujo reactivo, sistema de transmisión AC flexible.*

ABSTRACT— Electrical transmission lines is one of the most important stage in electrical power systems, because it is responsible for carrying electrical energy from the generation to the sub-transmission stage and subsequently to be distributed. The applications of the SVC FACTS on the bars of the electric power system are varied; these devices allow us to modify the power flow in power system, to maximize the capacity of the transmission lines; locating these reactive power compensating elements has a high cost, so it is necessary to locate them optimally and intelligently, in order to make the investment feasible. In the present research, a methodology to minimize the deviation of the magnitudes of the voltage profiles is presented, for which we analyze the behavior before and after the reactive compensation by means of the optimal parameters of AC power in the IEEE 14 and 30 buses model. Finally, the location of reactive power compensators in buses of electrical power system improve the voltage profiles in each of its bus, minimizes investment costs and reduce the power losses in transmission lines.

Keywords— *Static compensator VAR, optimization, reactive flow, flexible AC transmission system.*

1. Introducción

En los sistemas eléctricos de potencia de los países desarrollados y subdesarrollados el uso de tecnologías como la generación distribuida y FACTS (Flexible AC Transmission System) ha incrementado considerablemente, con el fin de compensar potencia reactiva, de esta forma, mejorar los rendimientos generales del sistema eléctrico de potencia como

reducción de pérdidas de potencia activa y reactiva, minimización de la contaminación ambiental, maximización de la carga que puede soportar el sistema y mejorar perfiles de voltaje [1].

Los dispositivos FACTS son convertidores electrónicos de potencia que tienen la capacidad de controlar varios parámetros eléctricos en redes de transmisión, como flujo de potencia en estado estable y

Citación: J. Ramirez, D. Carrión y E. Inga, "Compensación Reactiva en Redes de Transmisión Eléctrica basado en Programación No Lineal considerando ubicación de SVC", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 20 de enero de 2020. **Recibido con correcciones:** 11 de enero de 2021. **Aceptado:** 11 de enero de 2021.

DOI:

Copyright: 2021 J. Ramirez, D. Carrión y E. Inga. 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 control de estabilidad dinámica [2]. El dispositivo FACTS más utilizado dentro de las redes de transmisión es el SVC (Static Synchronous Compensator) debido a su bajo costo, simplicidad y buen rendimiento en el sistema, este dispositivo se conecta en derivación en las diferentes barras del sistema con el fin de absorber o generar VAR (Voltio Amperio Reactivo), cuya salida se ajusta para mejorar la corriente capacitiva o inductiva y así controlar parámetros específicos del sistema eléctrico de potencia como los perfiles de voltajes [3].

El sistema de transmisión eléctrica es una de las etapas más importantes en el proceso de generación-consumo, debido a que es la etapa intermedia en la transferencia de energía eléctrica desde la estación central de generación hasta los consumidores. A medida que se van instalando grandes centrales de generación eléctrica, las redes de transmisión se están volviendo más complejas debido al aumento de carga y el patrón de carga dinámica que afecta de forma directa las líneas de transmisión, en donde están trabajando sobrecargadas o subcargadas; este tipo de desigualdad de la carga afecta directamente los perfiles de voltaje y hace que la seguridad del sistema se vuelva vulnerable a fallas, a su vez que el flujo de potencia activa y reactiva incrementa produciendo una pérdida de potencia suplementaria y aumentando caídas de tensión [4], [5].

Según [5], la planificación y operación del sistema eléctrico de potencia debe reformularse, debido a que el enfoque convencional de agregar nuevas líneas de transmisión en el sistema y construir nuevas instalaciones de generación de energía están sujetos a diversos factores, como los límites técnicos y económicos; si la demanda del consumidor es alta, las líneas de transmisión operarían cerca de su capacidad máxima o simplemente se sobrecargarían, haciendo que los flujos de potencia en la línea violen con facilidad los establecidos, llevando así a la inestabilidad de voltaje. Por lo tanto, la mejor solución es hacer uso óptimo de la red de generación y transmisión existente.

La estabilidad de voltaje es la capacidad que tiene un sistema eléctrico de potencia para mantener los voltajes en las barras dentro de los rangos aceptados y establecidos, ya sea trabajando en condiciones normales o bajo perturbaciones. Los FACTS son la mejor y efectiva alternativa para mejorar el rendimiento del

sistema de energía, en lugar de diseñar e instalar nuevas y complejas líneas de transmisión [6], [7].

Según [8] los problemas aliviados por una solución FACTS los han clasificado en dos grupos, como problemas de estado estacionario y de estabilidad transitoria. Los problemas de estado estacionario los han subdividido en tres secciones como son control de voltaje, optimización del sistema de energía, minimización de costos y análisis de contingencia. De la misma forma los problemas de estabilidad transitoria los ha subdividido en dos secciones; estabilidad de voltaje y estabilidad angular. En cada caso, el fin es alivianar tanto inestabilidad, costos, como también disminuir el esfuerzo de la red.

En [9] se propone la ubicación óptima de los SVC mediante análisis nodal y algoritmo genético (GA), para ellos la estabilidad del sistema eléctrico de potencia (SEP) se utiliza con índice o parámetro para la ubicación óptima de FACTS.

En [10], [11] se ubican de forma óptima los SVC mediante algoritmo genético con el fin de tener una estabilidad en el voltaje.

En [12] se realiza la ubicación óptima mediante la técnica HPSO (Hybrid Particle Swarm Optimization), el cual reduce costos de generación, pérdidas en transmisión e incrementa la capacidad de generación junto con la capacidad de transferencia de potencia en el SEP; este realiza su investigación sobre un modelo del IEEE de 30 barras utilizando de igual forma flujos óptimos de potencia.

En [13] se propone la ubicación óptima de SVC en base al modelo de optimización de enjambre de partículas (PSO), con el fin de minimizar las desviaciones de los perfiles de voltaje en las barras y las pérdidas que existen en la red.

En [14] se propone un enfoque en el cual se basa en la sensibilidad del índice de rendimiento de flujo de potencia real y el factor de distribución de interrupción de línea para decidir la ubicación óptima de FACTS como compensadores serie controlados por tiristores (TCSC) y los compensadores serie síncrono estáticos (SSSC) con el fin de mejorar la estabilidad y perfiles de voltaje en un modelo del IEEE de 30 barras.

Las limitaciones en el subsistema de transmisión derivan principalmente de los costos de inversión, por lo

que la implementación de estos dispositivos se presenta como una acción positiva [15].

Una de las ventajas que presenta la colocación de compensadores en las líneas de transmisión es la reducción en la cantidad de potencia reactiva (MVar) que se transporta, haciendo que la potencia activa (MW), que se puede transmitir aumente significativamente,

también ayuda a que el perfil de voltaje se encuentre en los límites aceptables.

La inserción de dispositivos SVC es altamente efectiva para prevenir la inestabilidad de voltaje, sin embargo, los beneficios y el rendimiento de estos

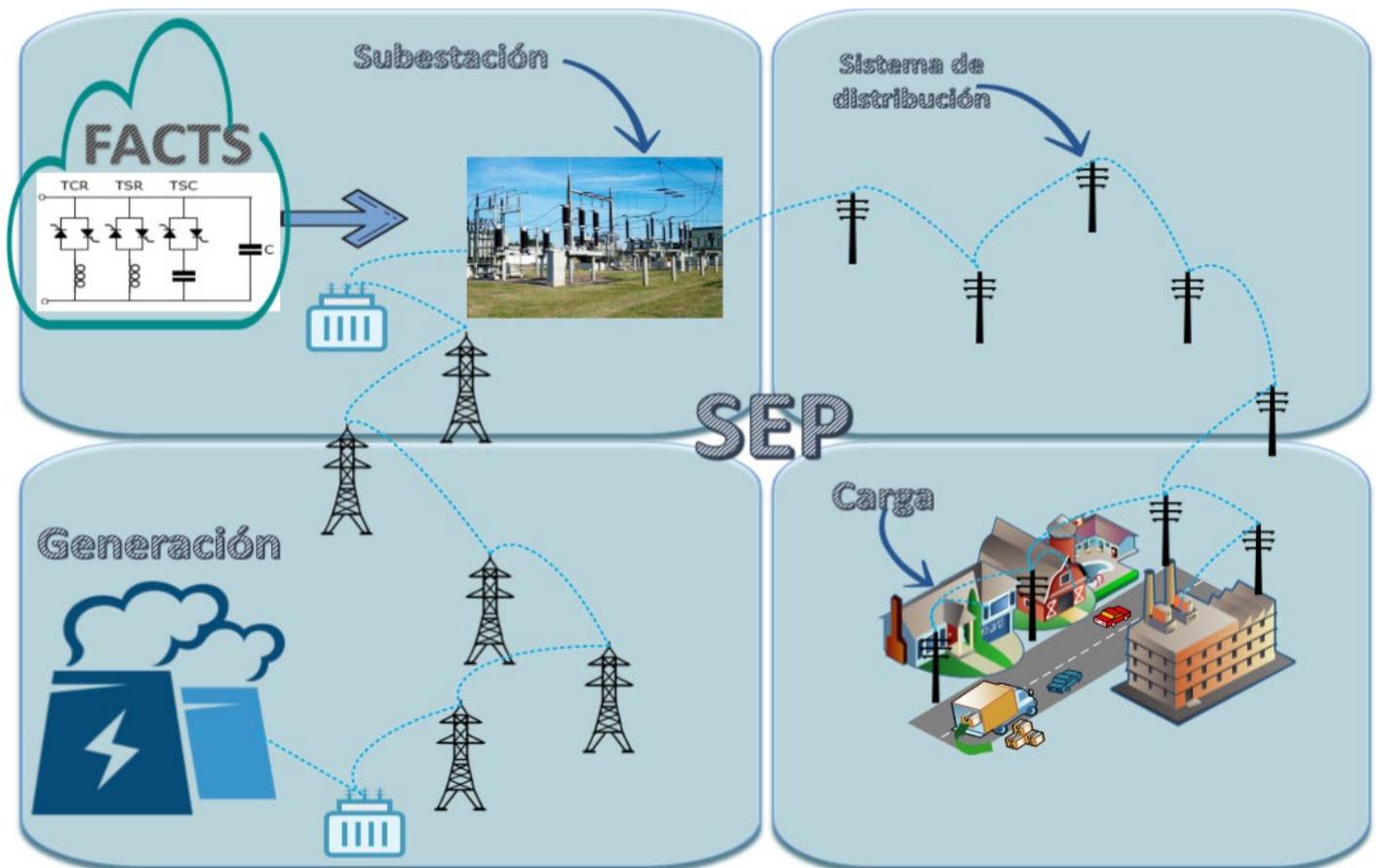


Figura 1. Infraestructura de ubicación de SVC en Sistemas eléctricos de potencia.

controladores están determinados por su ubicación y tamaño, debido a los altos costos que implica adquirir un número grande de estos controladores se debe minimizar la cantidad y sus beneficios se pueden maximizar a través de métodos de optimización eficiente [16].

En la figura 1 podemos observar de forma gráfica la infraestructura de ubicación de los SVC, los cuales se colocarán en las redes de transmisión, específicamente en las subestaciones.

En adelante el artículo se organiza de la siguiente manera. En la sección 2 se describe la ubicación óptima de SVC. En la sección 3 se describe la metodología y formulación del problema. En la sección 4 se analiza el desempeño del algoritmo propuesto bajo diversas condiciones. Finalmente, las conclusiones del trabajo se presentan en 5.

2. Ubicación óptima de SVC

La ubicación óptima de SVC depende de las características de cada SEP, por esta razón es necesario identificar la matriz de conectividad (MC) del mismo. La matriz de conectividad (MC) es una matriz de datos binarios que representa la topología del sistema, la cual tiene dimensiones de $n * n$; siendo n la cantidad de barras del sistema [17].

Para la ubicación de los SVC es esencial encontrar los valores de potencia reactiva en cada una de las barras del SEP por lo que se propone encontrar estos valores mediante el método Newton-Raphson Desacoplado para flujos de potencia.

Dado que el Jacobiano es encontrado a partir de los datos del SEP es necesario formular las ecuaciones para este método.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix} \quad (1)$$

Una vez encontrados los incrementos de potencia activa y reactiva, se procede a encontrar los $\Delta V/V$ y $\Delta \theta$ en cada una de las iteraciones hasta que ΔP y ΔQ sean menores a la tolerancia especificada [18].

La función de costos del SVC está dada de la siguiente forma:

$$C_{svc} = 0.0003s^2 - 0.3051s + 127.38 \quad (2)$$

Donde:

s ; representa la potencia reactiva del SVC.

2.1 Ubicación óptima de SVC con restricciones

Si en el SEP se tiene en consideración únicamente las potencias en cada barra y los costos de ubicar un SVC en esa barra para minimizar la cantidad de SVC a desplegar de forma óptima en (3); restringido por (4) la cual toma en cuenta que las barras del sistema tengan al menos una conexión, (5) evita que los SVC sean colocados en nodos donde existan generadores conectados [19], [20].

Función Objetivo.

$$\min n_{SVC} = \sum_{i=1}^n C_{svc_i} * X_i \quad (3)$$

Sujeto a:

$$f(x) \geq 1 \quad (4)$$

$$G(x) \leq 0 \quad (5)$$

Donde:

n_{SVC} ; representa el número de SVC.

C_{svc_i} ; representa el costo de implementar un SVC en la barra i .

X_i ; representa una variable binaria de ubicación de SVC en las barras.

3. Metodología y formulación del problema

La presente investigación es de categoría básica debido a su naturaleza, la cual emplea procesos de simulación. Esta tiene un enfoque cuantitativo, puesto que se busca encontrar el número mínimo de SVC en un Sistema eléctrico de potencia y que garantice los niveles de voltajes adecuados en el rango operativo estipulado, así permitiéndole a las líneas de transmisión trabajar a su máxima capacidad, con el menor monto de inversión. Para ello, el modelo propone un modelo de optimización y así proporcionar información útil para decidir la ubicación de los dispositivos de compensación y el número de ellos. Finalmente, al ser de carácter general es decir exploratorio, el modelo sugiere analizar diferentes casos de estudios.

Por lo tanto, la metodología propuesta en la presente investigación genera un algoritmo sujeto a valores iniciales, una función objetivo y sus respectivas restricciones, dando origen así, a un proceso de optimización que tiene como finalidad lograr encontrar el número mínimo y ubicación de los SVC requeridos para cada caso de estudio.

A continuación, presentamos la descripción formal del problema que se pretende resolver. El modelo propuesto emplea un algoritmo general que se encarga de encontrar las potencias en cada una de las barras a fin de utilizar estos datos como valores iniciales para así encontrar el número de dispositivos SVC y su ubicación respectiva en para cada caso de estudio, con la finalidad principal de mejorar los perfiles de tensión.

Como caso de estudios se toma en consideración los modelos de prueba del IEEE de 14 y 30 barras; en los

cuales se realizó un despliegue óptimo de SVC considerando restricciones del caso y comparar sus resultados.

Tabla 1: Notaciones y variables

| Nomenclatura | Descripción |
|--------------|-----------------------------------|
| V_i | Voltaje en el nodo i del SEP |
| n | Número de barras en el SEP |
| Z_{ij} | Impedancia de la línea $i - j$ |
| S_{gi} | Potencia generada en la barra i |
| S_{di} | Potencia demanda en la barra i |
| B_{ij} | Susceptancia de la línea $i - j$ |
| Q_i | Potencia reactiva en la barra i |
| P_i | Potencia activa en la barra i |
| C_{svc} | Función de costos del SVC |
| s | Rango de operación del SVC |
| Y_i | Costo de instalación del SVC |
| X_i | Matriz de conexiones del SEP |

Algoritmo 1. Ubicación óptima de dispositivos FACTS en líneas de transmisión

Paso 1: Variables

$$V, n, Q_i, Z_{ij}, S_g, S_d, B_{ij}$$

Paso 2: Input

$MC_{n \times n}$; Matriz de conectividad

C_{svc} ; Ecuación de costos para los SVC

Paso 3: Encontrar potencia reactiva en el SEP mediante el método Newton-Raphson Desacoplado.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V/V \end{bmatrix}$$

Paso 4: Minimización de SVC

Función Objetivo.

$$\min n_{SVC} = \sum_{i=1}^n C_{svc_i} * X_i$$

Sujeto a:

$$f(x) \geq 1$$

$$G(x) \leq 0$$

Paso 5: Mostrar resultados de la optimización

Terminar

ubicaciones más factibles al momento de ubicar SVC en los modelos estudiados, en la figura 2 y figura 3 se presenta de forma gráfica el lugar en el cual se encontrarán colocados los SVC, para el modelo de 14 barras del IEEE se encontrarán en los nodos 4, 5, 7, 11 y 13 y en el modelo de 30 barras del IEEE se encontrarán en los nodos 3, 6, 7, 9, 12, 16, 19, 22, 23, 26 y 29.

Siendo un total de cinco SVC para modelo de 14 barras y 11 SVC para el modelo de 30 barras.

Tabla 2. Valores de potencia para los SVC en cada una de barras encontradas

| Modelo 14 barras | Caso 1 SVC | Caso 2 SVC | Caso 3 SVC | Modelo 30 barras | Caso 1 SVC | Caso 2 SVC | Caso 3 SVC |
|------------------|------------|------------|------------|------------------|------------|------------|------------|
| B4 | 10 | 15 | 30 | B3 | 10 | 15 | 15 |
| B5 | 10 | 15 | 30 | B6 | 10 | 15 | 15 |
| B7 | 10 | 15 | 10 | B7 | 10 | 15 | 15 |
| B11 | 10 | 15 | 10 | B9 | 10 | 15 | 10 |
| B13 | 10 | 15 | 20 | B12 | 10 | 15 | 15 |
| | | | | B16 | 10 | 15 | 15 |
| | | | | B19 | 10 | 15 | 15 |
| | | | | B22 | 10 | 15 | 10 |
| | | | | B23 | 10 | 15 | 10 |
| | | | | B26 | 10 | 15 | 10 |
| | | | | B29 | 10 | 15 | 10 |

En la tabla 2 se presentan los valores de potencia de los SVC en las barras encontradas luego de aplicar el algoritmo 1 en cada modelo del IEEE, para realizar la comprobación de resultados, se ha procedido a plantearnos tres casos específicos. En el caso 1 se ubicará en cada uno de los nodos encontrados dispositivos SVC de 10 MVAR de capacidad; el caso 2 es la ubicación de SVC de 15 MVAR en cada barra y por último el caso 3, se ubicará SVC de diferentes capacidades como se muestra en la tabla 2.

4. Análisis de resultados

Sobre los modelos de 14 y 30 barras del IEEE se aplicó el algoritmo de ubicación óptima de SVC con varias restricciones y como resultado se encontró las

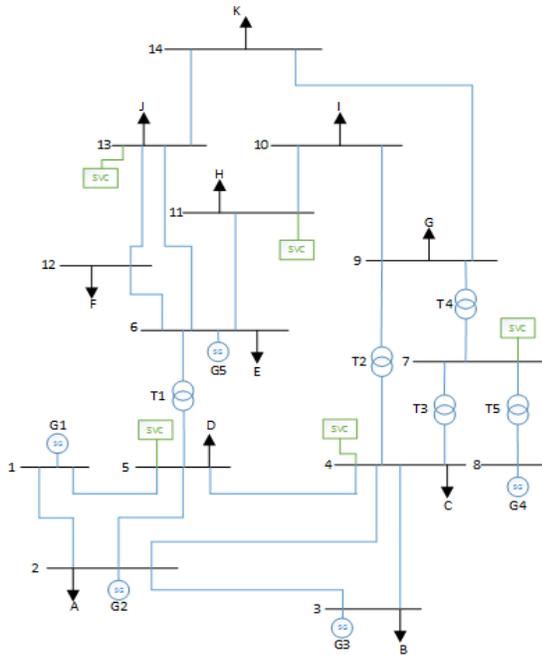


Figura 2. Ubicación óptima de SVC en el modelo de 14 barras del IEEE.

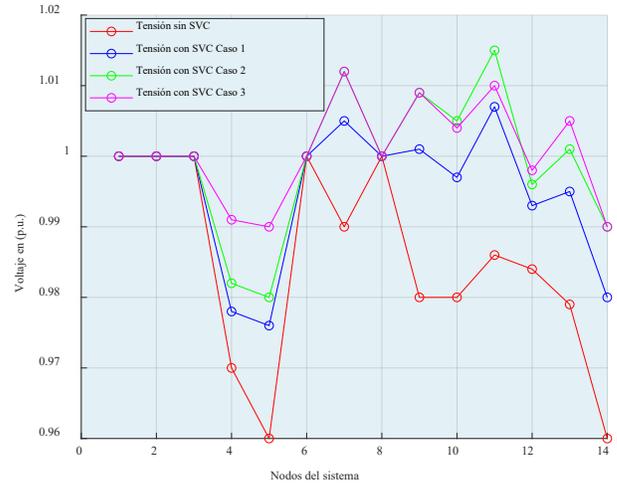


Figura 4. Perfiles de tensión en el sistema IEEE 14 barras.

Como se puede evidenciar en la figura 4, los perfiles de voltaje se encuentran en el rango de operación de $\pm 5\%$ para los voltajes en las barras. En la gráfica se observan cuatro curvas, en donde se aprecian los resultados obtenidos de colocar SVC de varias capacidades en las barras encontradas, todo esto aplicado en el modelo del IEEE de 14 barras.

El caso base (Tensión sin SVC), se presentan los resultados de voltaje en las barras para el modelo IEEE de 14 barras, en donde podemos observar que en las barras 5 y 14 del modelo tenemos un voltaje de 0.96 (p.u.), siendo así un valor bajo a ser corregido con la inserción de SVC al sistema; en el caso 1 (Tensión con SVC Caso 1), caso 2 (Tensión con SVC Caso 2) y caso 3 (Tensión con SVC Caso 3) se implementaron SVC de diferentes capacidades en cada una de las barras encontradas, teniendo un aumento considerado en los perfiles de voltajes.

En la figura 4 se presenta el caso 3 (Tensión con SVC Caso 3), como la opción más factible al momento de ubicar compensadores SVC en un SEP, debido a que los valores de voltajes son los más cercanos a 1 (p.u.) en cada barra del sistema, así aumentando los valores más bajos de voltaje y disminuyendo aquellos que se encontraban por debajo de 1 (p.u.).

Para el caso 3 las mejoras en cada una de las barras del SEP son considerables y dentro del rango de operación de $\pm 5\%$ para los voltajes en las barras; de esta forma obtenemos una mejora media en el SEP de 1.63%.

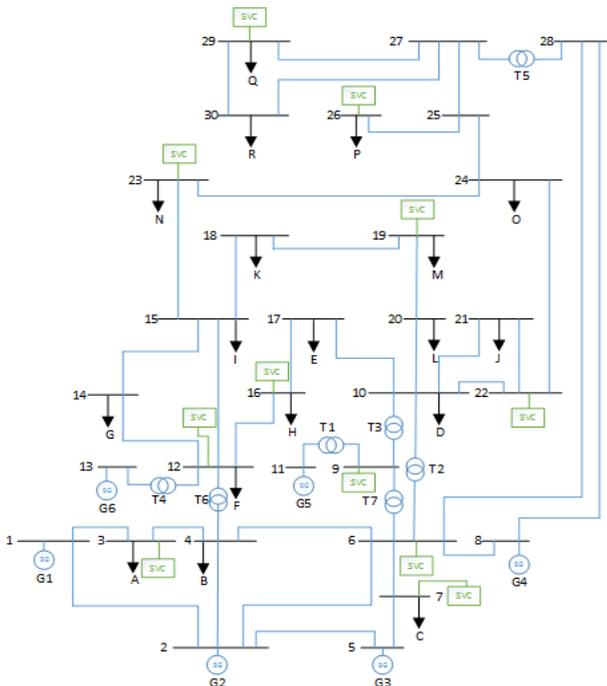


Figura 3. Ubicación óptima de SVC en el modelo de 30 barras del IEEE.

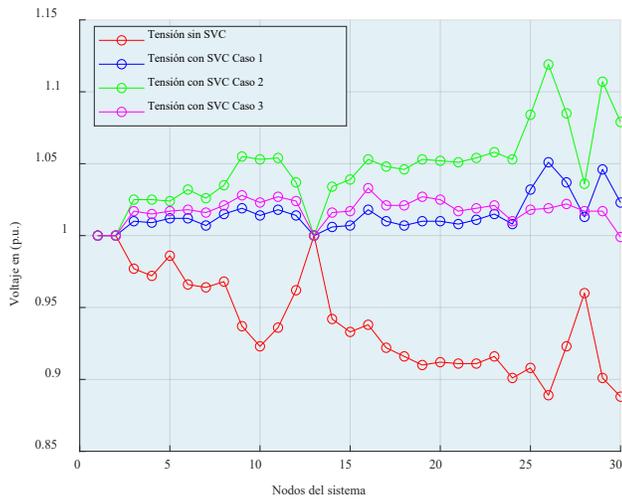


Figura 5. Perfiles de tensión en el sistema IEEE 30 barras.

Al igual que para el modelo anterior se implementan SVC de diferentes capacidades en cada una de las barras encontradas, estos casos se presentan en la tabla 2.

En la figura 5 los perfiles de voltaje se encuentran en los rangos de operación adecuados ($\pm 5\%$ para los voltajes en las barras) y podemos observar que la curva más cerca de 1 (p.u.) es la curva 4 (Tensión con SVC Caso 3), teniendo una mejora media en el SEP de 7.75%, de forma que se la presenta como la opción más factible al momento de ubicar compensadores SVC en un SEP.

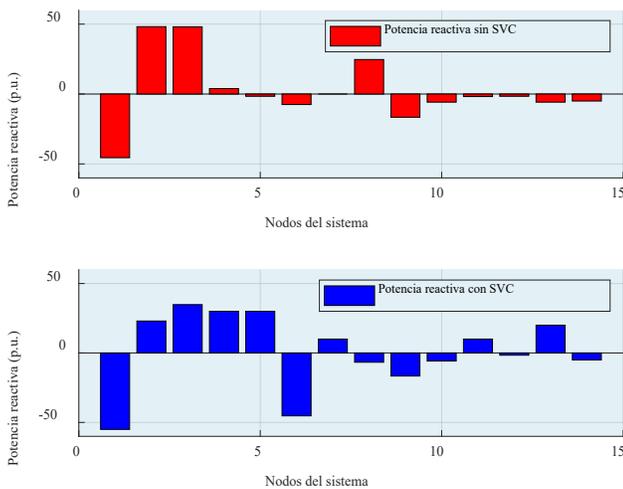


Figura 6. Potencia reactiva en los nodos del modelo IEEE 14 barras.

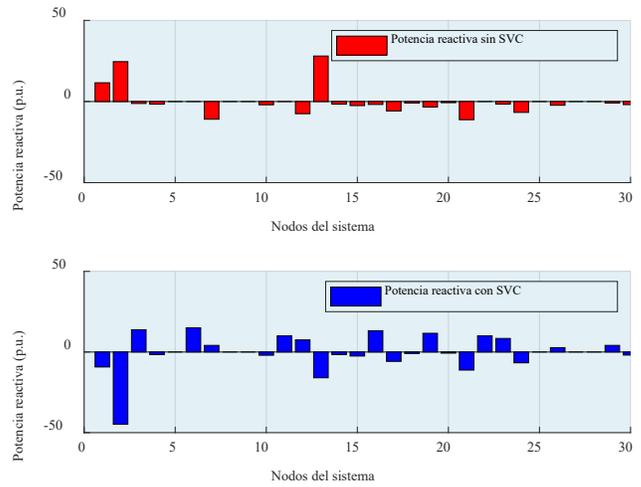


Figura 7. Potencia reactiva en los nodos del modelo IEEE 30 barras.

En la figura 6 y 7 se presentan las potencias reactivas en cada barra, sin SVC y con SVC, en donde se puede observar que al tener dispositivos SVC presentes en el sistema, las potencias reactivas en las barras se redistribuyen de forma que se alivia el flujo reactivo del sistema, es decir tanto en la generación y en las líneas de transmisión en los modelos del IEEE de 14 y 30 barras.

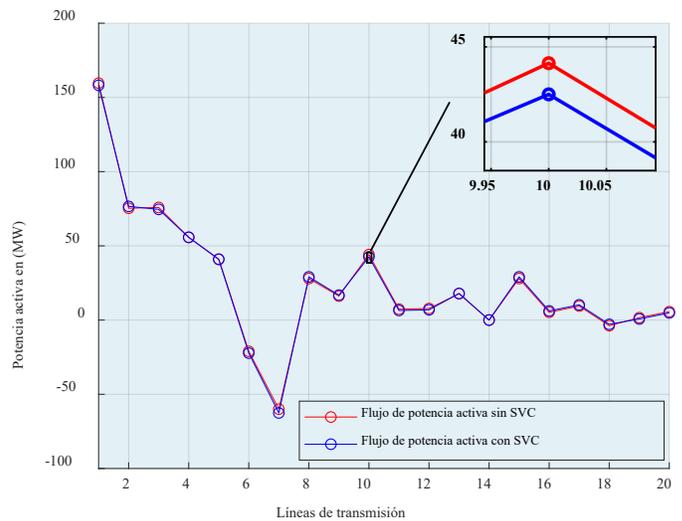


Figura 8. Flujo de potencia activa en las líneas de transmisión del modelo de 14 barras del IEEE.

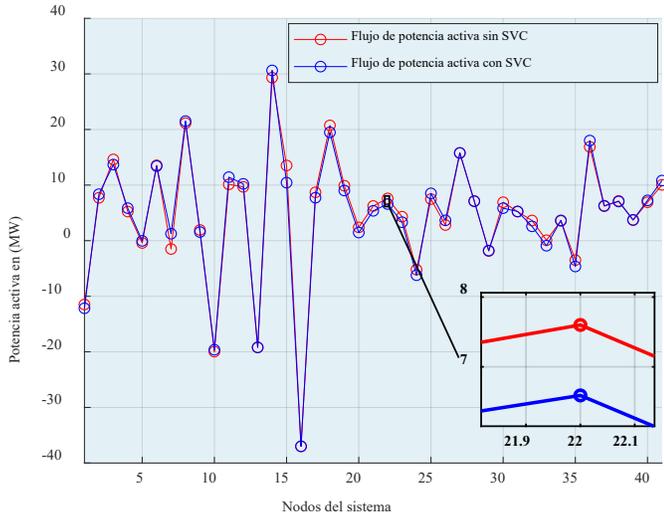


Figura 9. Flujo de potencia activa en las líneas de transmisión del modelo de 30 barras del IEEE.

En las figuras 8 y 9 podemos observar que, al insertar SVC en las barras de los sistemas, los flujos de potencia activa al igual que los flujos de potencias reactivas se redistribuyen, haciendo que las pérdidas de potencia en las líneas de transmisión disminuyan considerablemente en diferentes proporciones para cada una de las existentes.

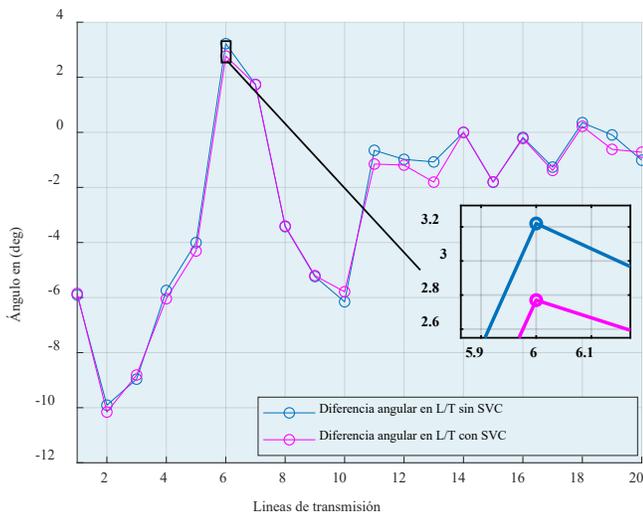


Figura 10. Diferencia angular en líneas de transmisión en el modelo de 14 barras del IEEE.

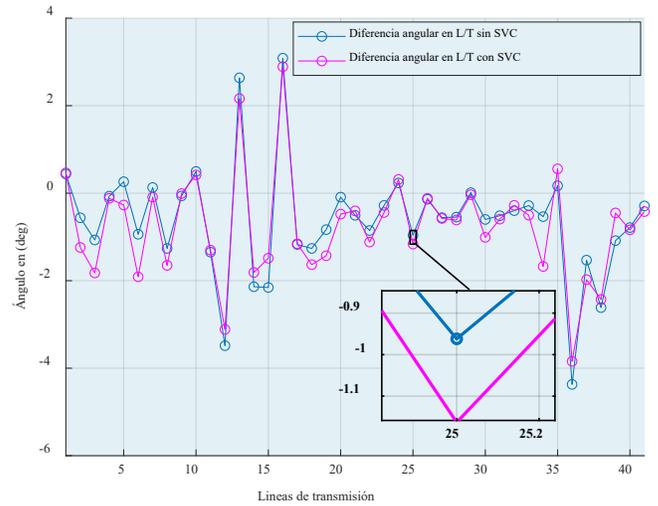


Figura 11. Diferencia angular en líneas de transmisión en el modelo de 30 barras del IEEE.

En las figuras 10 y 11 se observa la diferencia angular en que existen en las líneas de transmisión para cada uno de los modelos, en donde esta diferencia angular ayuda de una u otra forma a la estabilidad angular del sistema, al mismo tiempo que disminuye las pérdidas que ocurren en los flujos de potencias tanto activa como reactiva.

Esta diferencia angular hace que tanto pérdidas en potencia reactiva, como de potencia activa disminuyan considerablemente en cada una de las líneas de transmisión luego de colocar los SVC en las barras anteriormente dichas.

En el modelo del IEEE de 14 barras, las pérdidas de potencia reactiva disminuyen en un 1.23%, y de potencia activa disminuye en un 0.11% luego de colocar los SVC. A diferencia del modelo del IEEE de 30 barras, donde la reducción en las pérdidas de potencia reactiva en las líneas de transmisión llega a un 15.02% y en las pérdidas de potencia activa reducen en un 1.58%.

5. Conclusiones

Al finalizar el análisis previsto se observa que la ubicación de SVC que se realizó mediante herramientas de optimización logra la mínima implementación de dispositivos disminuyendo así, el costo de inversión; hay que tener en cuenta que, para cada modelo de sistemas eléctricos de potencia del IEEE la ubicación de los compensadores será diferente.

La implementación de los dispositivos SVC ayudan a mejorar los perfiles de voltaje en los sistemas eléctricos de potencia en ciertas barras de tal manera que toman valores cercanos a 1 en (p.u.); teniendo así una mejora de 1.63% en el modelo del IEEE de 14 barras y una mejora de 7.75% en el modelo del IEEE de 30 barras.

Los beneficios que producen la implementación de estos dispositivos son: los flujos reactivos se redistribuyen de forma que disminuye la exigencia hacia los generadores, maximiza el rendimiento de las líneas de transmisión y mejora perfiles de tensión en las barras de los sistemas.

La implementación de dispositivos SVC en los diferentes modelos ayudan a disminuir pérdidas en las líneas de transmisión, no solo en pérdidas de potencia reactiva, sino también en las pérdidas de potencia reactiva debido a la diferencia angular que existe entre las barras.

REFERENCIAS

- [1] B. Singh, R. P. Payasi, y V. Shukla, "A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems", *Energy Reports*, vol. 3, pp. 94–108, 2017.
- [2] N. Rawat, A. Bhatt, y P. Aswal, "A review on optimal location of FACTS devices in AC transmission system", *2013 Int. Conf. Power, Energy Control*, núm. ii, pp. 104–109, 2013.
- [3] R. Sirjani, A. Mohamed, y H. Shareef, "Optimal placement and sizing of Static Var Compensators in power systems using Improved Harmony Search Algorithm", núm. 7, pp. 214–218, 2011.
- [4] O. P. Mahela, D. Mittal, y L. Goyal, "Optimal Capacitor Placement Techniques in Transmission and Distribution Networks to Reduce Line Losses and Voltage Stability Enhancement : A Review", vol. 3, núm. 4, pp. 1–8, 2012.
- [5] V. Frolov, S. Backhaus, M. Chertkov, C. Analysis, y C. Murthy, "Optimal placement of FACTS devices using optimization techniques : A review Optimal placement of FACTS devices using optimization techniques : A review", 2018.
- [6] P. Choudekar, "Optimal location of SVC for improvement in voltage stability of a power system under normal and contingency condition", *Int. J. Syst. Assur. Eng. Manag.*, 2017.
- [7] V. Kamaraj, "Enhancement of Voltage Stability by Optimal Location of Static Var Compensator Using Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization", vol. 5, núm. 1, pp. 70–77, 2014.
- [8] A. Hernandez, M. A. Rodriguez, E. Torres, y P. Eguia, "A Review and Comparison of FACTS Optimal Placement for Solving Transmission System Issues A Review and Comparison of FACTS Optimal Placement for Solving Transmission System Issues", núm. March, 2013.
- [9] M. M. Farsangi, H. Nezamabadi-pour, Y. Song, S. Member, y K. Y. Lee, "Placement of SVCs and Selection of Stabilizing Signals in Power Systems", vol. 22, núm. 3, pp. 1061–1071, 2007.
- [10] H. R. Baghaee *et al.*, "Improvement of Voltage Stability and Reduce Power System Losses by Optimal GA-based Allocation of Multi-type FACTS Devices", *11th Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equip.*, pp. 209–214, 2008.
- [11] M. Negnevitsky, "A Messy Genetic Algorithm Based Optimization Scheme for SVC Placement of Power Systems under Critical Operation Contingence", pp. 467–472, 2008.
- [12] K. Ravi, M. Rajaram, y B. Edward, "Hybrid Particle Swarm Optimization Technique for Optimal Location of FACTS devices using Optimal Power Flow", *Eur. J. Sci. Res. ISSN*, núm. October 2016, 2011.
- [13] V. K. Shende y P. P. P. Jagtap, "Optimal Location and Sizing of Static Var Compensator (SVC) by Particle Swarm Optimization (PSO) Technique for Voltage Stability Enhancement and Power Loss Minimization", vol. 4, núm. June, pp. 2278–2282, 2013.
- [14] P. S. Vaidya y V. P. Rajderkar, "Optimal Location of Series FACTS Devices for Enhancing Power System Security", *2011 Fourth Int. Conf. Emerg. Trends Eng. Technol.*, pp. 185–190, 2011.
- [15] K. Elango y S. R. Paranjothi, "Congestion management in restructured power systems by FACTS devices", vol. 1, núm. 4, pp. 767–776, 2011.
- [16] S. Sakthivel, D. Mary, y V. S. Kannan, "Optimal Location of SVC for Voltage Stability Enhancement under Contingency Condition through PSO Algorithm", vol. 20, núm. 1, pp. 30–36, 2011.
- [17] C. Jaramillo y D. Carrión, "Ubicación óptima de pmu basado en criterios de observabilidad y evaluación mediante búsqueda tabú", *Univ. Politécnica Sales.*, 2016.
- [18] E. Tenelema y C. Barrera, "Simulación de flujos de potencia en sistemas eléctricos de potencia usando métodos completos, desacoplados y linealizados".
- [19] D. Carrión y J. W. González, "Optimal PMU Location in Electrical Power Systems under N-1 Contingency", núm. 1, pp. 165–170, 2018.
- [20] J. Ramirez y D. Carrión, "Compensación reactiva en redes eléctricas de transmisión basado en ubicación óptima de svc y contingencia n-1", *Univ. Politécnica Sales.*, 2020.

Interacción de electrones rápidos con esferas de plata sub-10 nm: resultados recientes

Interaction of fast electrons with sub-10 nm silver spheres: recent results

Alfredo Campos ^{1*}, Matthias Hillenkamp ², Mathieu Kociak ³

¹ Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá.

² Institut Lumière Matière, Université de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, CNRS, UMR5306, Villeurbanne, France

³ Laboratoire de Physique des Solides, UMR 8502 CNRS and Université Paris-Sud, Orsay, France

*Autor de correspondencia: alfredo.campos@utp.ac.pa

RESUMEN— La interacción de electrones rápidos con nanopartículas metálicas ha sido de gran interés científico y tecnológico debido a la posibilidad de explorar las propiedades ópticas de nanopartículas metálicas con resolución espacial sub-nanométrica y espectral en el orden de los meV. Esta combinación de información espacio-espectral es posible gracias a la microscopía electrónica de transmisión de barrido (STEM) junto a un espectrómetro de pérdida de energía de electrones (EELS). Recientemente, diferentes artículos han mostrado estudios EELS en nanoesferas de plata de tamaños inferiores a los 10 nm, dimensión en la cual se esperan efectos cuánticos, reportando resultados contradictorios a los obtenidos en décadas pasadas por la conocida técnica de absorbancia óptica. Esta discrepancia EELS-óptica ha sido tema de debate en los últimos años y en este artículo de revisión mostraremos como este problema se ha venido esclareciendo, considerando la influencia del haz de electrones sobre la interfaz partícula-medio.

Palabras clave— *Espectroscopia de perdida de energía de electrones, Nanopartícula metálica, Plasmón de superficie.*

ABSTRACT— The interaction of fast electrons with metallic nanoparticles has been of great scientific and technological interest due to the possibility to explore the optical properties of metallic nanoparticles with sub-nanometric spatial resolution and spectral resolution in the order of few meV. This combination of spatial-spectral information is possible thanks to scanning transmission electron microscopy (STEM) together with an electron energy loss spectrometer (EELS). Recently, different articles have shown EELS studies in silver nanospheres of sizes less than 10 nm, where quantum size effects are expected, reporting contradictory results compared to those obtained in the past decades by the well-known optical absorbance technique. This EELS-optics discrepancy has been the subject of debate in recent years and in this review article we will show how this problem has been clarified considering the influence of the electron beam on the particle-medium interface.

Keywords— *Electron energy loss spectroscopy, Metallic nanoparticle, Surface plasmon.*

1. Introducción

Al hacer incidir radiación electromagnética sobre una nanopartícula metálica se excitan los denominados plasmones de superficie (SP), los cuales corresponden a las oscilaciones colectivas de los electrones libres en la nanopartícula. La energía o frecuencia de la resonancia de los plasmones de superficie depende del metal que compone la nanopartícula, de la dimensión y geometría de la nanopartícula, así como también del medio en el que está inmersa la nanopartícula. El control de estos parámetros permite sintonizar la frecuencia de

resonancia de los plasmones de superficie en rangos específicos, lo cual permite el desarrollo de aplicaciones en diferentes campos tales como: biosensores [1], celdas fotovoltaicas [2], ventanas de ahorro energético [3], [4], el tratamiento del cáncer [5], [6], efecto Raman amplificado [7], entre otras.

La habilidad de las nanopartículas metálicas para concentrar luz en la escala nanométrica ha despertado el interés por conocer hasta que tamaño mínimo de nanopartícula se manifiestan los plasmones de superficie. Es bien conocido que, en nanopartículas de varias

Citación: A. Campos, M. Hillenkamp y M. Kociak, "Interacción de electrones rápidos con esferas de plata sub-10 nm: resultados recientes", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 27 de agosto de 2020. **Recibido con correcciones:** 10 de diciembre de 2020. **Aceptado:** 10 de diciembre de 2020.

DOI:

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

decenas de nanómetros, la respuesta óptica está dominada por los plasmones de superficie. Por otro lado, en sistemas moleculares de algunos cuantos átomos la respuesta óptica está dominada por las transiciones energéticas discretas. La pregunta sobre cuantos átomos es necesario tener en una nanopartícula para pasar de los plasmones de superficie al régimen molecular (o viceversa) sigue siendo una pregunta con respuestas muy diversas. Además de la importancia de conocer la cantidad de átomos necesarios para pasar de un régimen a otro, también es importante conocer como los efectos cuánticos, esperados en partículas por debajo de los ~ 10 nm, modifican la posición y ancho de los picos de los plasmones de superficie. En pequeñas nanopartículas los efectos cuánticos que se pueden encontrar son: el spill-out (densidad de electrones no nula fuera de la superficie de la nanopartícula), la polarizabilidad reducida de electrones d cerca de la interfaz nanopartícula-medio y la no localidad. Además, el medio que rodea la nanopartícula puede hacer que un efecto cuántico sea más dominante que otro.

Para estudiar la influencia de los efectos cuánticos en los plasmones de superficie se han realizado diferentes estudios en partículas esféricas con tamaños inferiores a los 10nm [8]. Una de las técnicas ópticas más empleada para estos estudios ha sido la espectrofotometría de absorbancia óptica. En esta técnica se hace incidir un haz de luz a diferentes longitudes de onda sobre una muestra compuesta por una gran cantidad de nanopartículas y se detecta la cantidad de luz que atraviesa la muestra. Una de los limitantes de esta técnica es que tanto la posición como el ancho de los picos correspondientes a los plasmones de superficie están dominados por la convolución de la respuesta con la distribución de tamaño de nanopartícula, lo cual puede enmascarar la respuesta de las partículas más pequeñas. Esto implica que para realizar un estudio preciso las muestras deben tener un solo tamaño de nanopartícula, lo cual se ha logrado mediante la preparación física de nanopartículas y técnicas de filtrado de tamaño por espectrometría de masas [9]. Los resultados de estos experimentos de absorbancia han mostrado diferentes tendencias de la evolución de los SP con el tamaño de las nanopartículas, los cuales se han visto depender del tipo de metal (si es alcalino o noble) y del medio que rodea a las nanopartículas. Los modelos teóricos que incluyen

efectos cuánticos han explicado muy bien estas tendencias [10].

Para resolver las limitantes que tiene la técnica de absorbancia óptica, recientemente se han empleado técnicas de excitación de campo cercano que permiten el estudio de una nanopartícula individual. Dentro de las diferentes técnicas de campo cercano que existen se encuentra la técnica de espectroscopía de pérdida de energía de electrones (EELS) acoplada a un microscopio electrónico de transmisión de barrido (STEM). La técnica EELS consiste en la excitación de una nanopartícula individual mediante un haz de electrones, los cuales pierden energía cuando pasan cerca o dentro de la nanopartícula debido a la excitación de los plasmones de superficie. La técnica STEM-EELS ha mostrado la posibilidad de explorar las propiedades ópticas de nanopartículas metálicas individuales con resoluciones espaciales sub-nanométricas [11], [12] y resoluciones espectrales de algunos meV [13]. Teóricamente se ha demostrado que EELS está relacionado con la técnica de absorbancia óptica [14] y en el trabajo de J. García de Abajo y M. Kociak [15] se demostró la relación entre EELS y la densidad de estados locales electromagnéticos EMLDOS (cantidad importante en Nanoóptica).

Los resultados de la técnica EELS y de absorbancia óptica concuerdan muy bien para partículas superiores a 10 nm, las cuales pueden ser descritas clásicamente por la función dieléctrica del material en forma masiva (bulk). Sin embargo, cuando la partícula tiene dimensiones por debajo de los 10nm, régimen en que se espera se manifiesten efectos cuánticos, muchos de los resultados experimentales recientes en EELS no concuerdan con experimentos de absorbancia óptica obtenidos en décadas pasadas [8].

En este artículo exponemos una revisión de los últimos avances en el estudio de las propiedades ópticas de nanopartículas de plata por debajo de los 10 nm de diámetro bajo la técnica EELS y cómo se ha logrado avanzar en la solución de la discrepancia entre EELS y absorbancia óptica al considerar el efecto del bombardeo de electrones sobre la interfaz entre la nanopartícula y el medio que la rodea.

2. Teoría

En esta sección presentaremos la relación entre EELS y la absorbancia óptica para esferas pequeñas (régimen

cuasi-estático clásico). Primero presentaremos las ecuaciones que representan la extinción en óptica, la cual es una cantidad proporcional a la absorbancia, luego presentaremos las ecuaciones que representan la técnica EELS y finalmente la relacionan entre ambas cantidades.

La interacción de una nanopartícula con una onda plana, en el régimen cuasi-estático clásico, puede representarse con el campo eléctrico de la luz induciendo una distribución de carga dipolar en la nanopartícula (figura 1a). Asumiendo una onda plana incidiendo sobre una nanopartícula dentro de un medio no absorbente, la sección eficaz de extinción (suma de absorción y dispersión) queda expresada [10] [16].

$$\sigma_{ext} = \frac{\omega}{c\epsilon_0\sqrt{\epsilon_m}} \text{Im}[\alpha(\omega)] \quad (1)$$

Donde $\alpha(\omega)$ representa la polarizabilidad dipolar a la frecuencia ω , ϵ_m es la permitividad del medio (no absorbente), ϵ_0 y c son la permitividad del vacío y la rapidez de la luz respectivamente. Cabe resaltar que en pequeñas nanopartículas la absorción de la luz domina sobre la dispersión de la luz [10] y por este motivo la extinción se considera igual a la absorción.

Para modelar teóricamente la técnica EELS consideraremos un electrón incidente el cual induce un campo eléctrico \mathbf{E}_{ind} en la nanopartícula (ver figura 1b).

El campo eléctrico inducido reacciona sobre el electrón incidente haciendo que éste pierda energía. La pérdida de energía ΔE de un electrón de carga $-e$ (donde $e=1.6 \times 10^{-19}$ C), que pasa cerca de una partícula a velocidad constante \mathbf{v} y a lo largo de una línea $\mathbf{r}_e(t)$ está relacionada con la fuerza ejercida por el campo eléctrico inducido \mathbf{E}_{ind} actuando sobre el electrón [15], [17].

$$\begin{aligned} \Delta E &= e \int_{-\infty}^{\infty} dt \mathbf{v} \cdot \mathbf{E}_{ind}(\mathbf{r}_e(t), t) \\ &= \int_0^{\infty} \hbar\omega d\omega \Gamma(\omega) \end{aligned} \quad (2)$$

Donde \hbar es la constante de Planck reducida y $\Gamma(\omega)$ es la probabilidad de pérdida de energía por unidad de frecuencia. Usando la ecuación 2 y expresando el campo eléctrico inducido en función del potencial eléctrico en el exterior de la nanopartícula $V_{ind,out}$ podemos escribir.

$$\Gamma(\omega) = -\frac{e}{\pi\hbar\omega} \int_{-\infty}^{\infty} dt \text{Re}\{\mathbf{v} \cdot \nabla V_{ind,out}(\mathbf{r}_e, \omega) e^{-i\omega t}\} \quad (3)$$

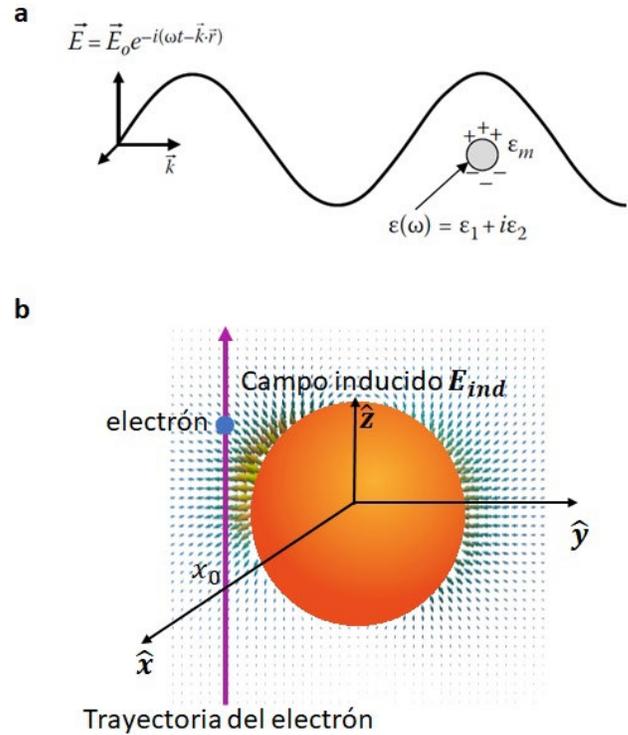


Figure 1. (a) Distribución de carga dipolar en una esfera metálica bajo la excitación de una onda plana [10]. (b) Campo eléctrico inducido en una esfera metálica al ser expuesta a un electrón que pasa cerca de la superficie. **Fuente:** Adaptado de [18].

Después de un largo procedimiento matemático podemos llegar a la expresión [19].

$$\Gamma_{L=1}(\omega) \propto \omega \sigma_{ext}(\omega) \left[\left[K_0 \left(\frac{\omega x_0}{v} \right) \right]^2 + \left[K_1 \left(\frac{\omega x_0}{v} \right) \right]^2 \right] \quad (4)$$

Donde K_0 y K_1 son las funciones de Bessel modificadas de segunda especie y x_0 es conocido como el parámetro de impacto del electrón el cual está relacionado con la posición en la que impacta el electrón (ver figura 1b). En la ecuación 4 observamos que el término dipolar ($L=1$) de la probabilidad de pérdida de energía EELS es proporcional a la extinción en óptica. Esta proporcionalidad también es válida aun cuando existan efectos cuánticos en la nanopartícula [20].

3. Resultados

La técnica EELS se ha utilizado desde los años 80 para el estudio de los plasmones de superficie en nanoesferas pequeñas [21], [22], sin embargo, las limitaciones en resolución espacial y espectral de la época no permitían hacer estudios con resultados claros sobre la evolución de la posición de los picos con el tamaño de las nanopartículas. Años más tarde en 1992 se abre uno de los primeros debates al publicarse el artículo de Ouyang et al. [23], el cual realiza un estudio en partículas de plata en el rango de 10 a 4nm de tamaño, donde se observa un comportamiento que difiere del clásico, atribuyendo esto a los efectos cuánticos. Sin embargo, este comportamiento pudo explicarse más tarde en 1996 por Aizpurua et al. [24] probando teóricamente que los resultados de Ouyang et al. se podían deducir de las teorías clásicas asumiendo nanopartículas hemisféricas y no esféricas.

Otro artículo que abre debate es el que se publica en el 2012 por Scholl et al. [25], donde se estudian nanopartículas esféricas de plata haciendo incidir un haz de electrones en un punto cerca de la superficie de las nanopartículas. En este estudio se observan resultados muy claros de la evolución de la posición del pico del plasmón de superficie con el tamaño de nanopartícula. En la figura 2a podemos observar los espectros EELS con un pico correspondiente al plasmón de superficie dipolar, el cual se desplaza a energías mayores a medida que disminuye el tamaño de las nanopartículas. En la figura 2b podemos ver de manera más clara la evolución de la posición del pico, el cual se desplaza de 3.3 a 3.8eV, cuando el tamaño de nanopartícula decrece de 20 a 1.7 nm. El desplazamiento del pico de ~ 0.5 eV resulta ser muy grande con respecto al desplazamiento observado mediante las técnicas de absorbancia óptica en décadas anteriores, como lo destaca la referencia [8]. Uno de los problemas en la comparación entre los resultados de Scholl et al. y los resultados de absorbancia óptica, es el hecho de que en el trabajo de Scholl et al. las nanopartículas fueron crecidas por métodos químicos, por lo que puede existir residuos en la superficie de las nanopartículas que podrían modificar la posición del plasmón de superficie debido a su alta sensibilidad al ambiente. Otro punto importante es que estas nanopartículas no están dentro de un medio homogéneo, ya que debajo de ellas hay un sustrato de carbono (3nm) y arriba hay vacío, lo que contrasta con las mediciones de

absorbancia óptica donde las muestras requieren nanopartículas dentro de una matriz que garantiza un medio homogéneo. Además, el sustrato de carbono (conductor) puede generar un acoplamiento entre plasmones del sustrato y de la nanopartícula generando así una señal de compleja interpretación. El uso de un sustrato resulta ser obligatorio en la técnica EELS y por tal motivo una comparación con los resultados de absorbancia óptica resulta difícil de hacer. Para poder comparar los resultados EELS con los de absorbancia óptica se deben estudiar sistemas similares. Esto se logra preparando las nanopartículas por métodos físicos y encapsulándolas dentro de un medio homogéneo como veremos en la discusión de las figuras 4 y 5.

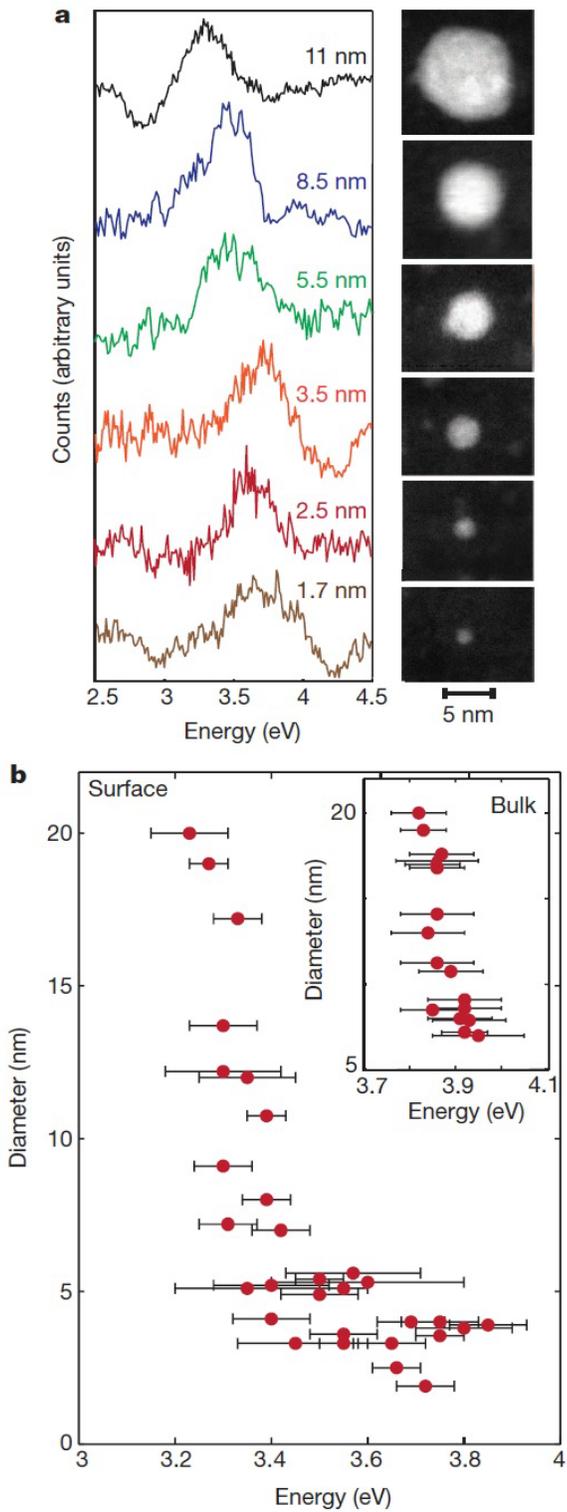


Figure 2. (a) Espectros EELS de nano esferas de plata de diferentes tamaños. Las imágenes de las nanopartículas corresponden a imágenes obtenidas por un microscopio de tipo STEM. (b) Evolución de la posición del pico del plasmón de superficie dipolar con el tamaño de las nanopartículas de plata. Arriba a la derecha también aparece la evolución de la señal EELS proveniente del interior

(bulk) de las partículas. Tomado de [25].

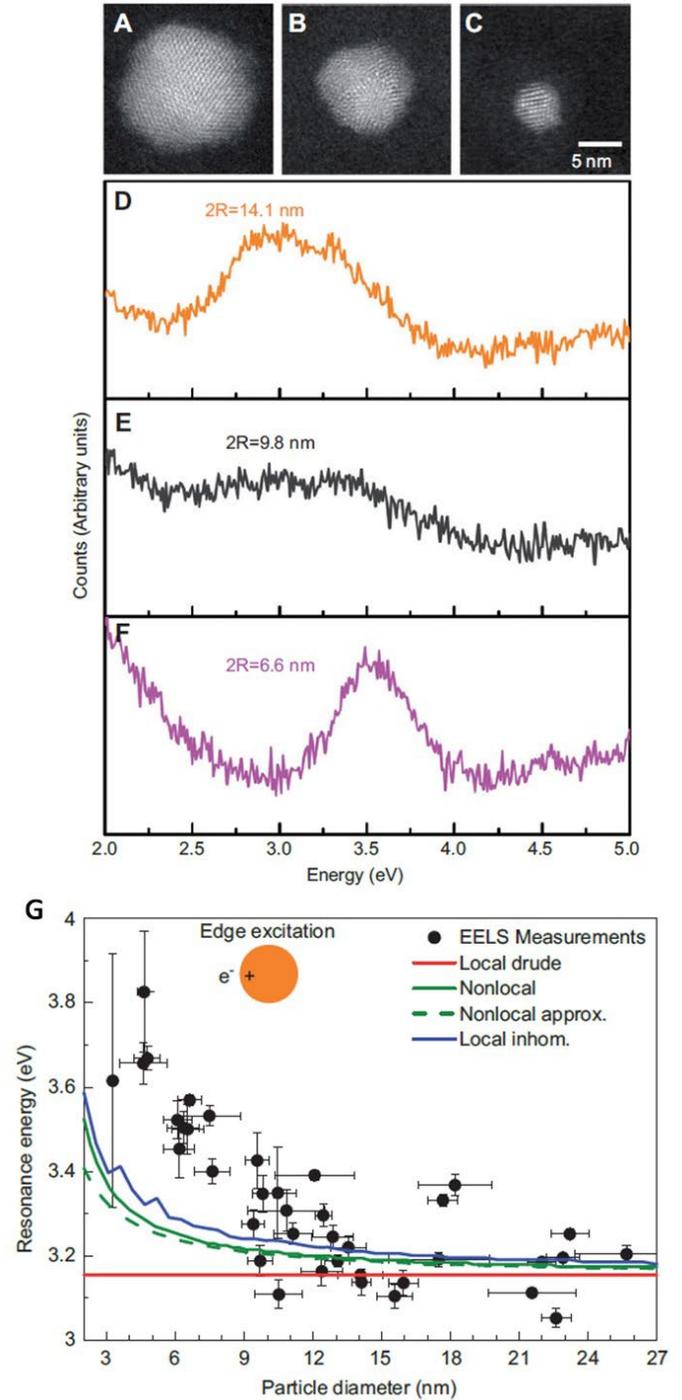


Figure 3. (a-c) Imágenes de microscopía STEM de diferentes tamaños de nanopartículas de plata. (d-f) Evolución de los espectros EELS de nano esferas de plata de tamaño decreciente. (g) Evolución de la posición del pico del plasmón de superficie dipolar con el tamaño de nanopartícula de plata (puntos negros). En rojo, verde, verde punteado y azul vemos diferentes modelos teóricos. Tomado de [26].

Sin embargo, cuando el tamaño de las partículas decrece por debajo de los 8nm de diámetro, la energía del plasmón de superficie dipolar aumenta hasta los 3.7eV (corrimiento de 0.9 eV). Este incremento en energía no se ha observado en técnicas de absorbancia óptica, por lo que se sospecha que hay algo detrás de la técnica EELS que hace que los resultados no concuerden a pesar de que teóricamente deben coincidir. En la figura 4b también vemos un plasmón de superficie de orden superior (cuadrupolar) en puntos blancos. Estos plasmones son observados en las partículas de mayor tamaño. El fondo de colores de la figura 4b representa los resultados predichos por modelos clásicos. En el 2015 se publica otro artículo por Raza et al. [27], donde ahora se depositan nanopartículas de plata por métodos físicos (magnetron sputtering) entre dos capas de SiN_x para garantizar un medio homogéneo (ver figura 4a). En este trabajo se hace incidir un haz de electrones cerca de la superficie de las nanopartículas y también dentro de la nanopartícula. Por esta razón se pueden excitar tanto el plasmón de superficie dipolar como plasmones de superficie de orden superior. En la figura 4b vemos la evolución de la energía del plasmón de superficie dipolar con el tamaño de las nanopartículas (puntos verdes en el gráfico). Vemos que para partículas entre 40 y 8nm de diámetro no se observa ningún corrimiento del plasmón de superficie dipolar, mostrando una energía constante de ~ 2.8eV. Esta energía es menor que la energía más pequeña observada en las figuras 2 y 3 debido a que la matriz desplaza el plasmón de superficie a energías menores. Sin embargo, cuando el tamaño de las partículas decrece por debajo de los 8nm de diámetro, la energía del plasmón de superficie dipolar aumenta hasta los 3.7eV (corrimiento de 0.9eV). Este incremento en energía no se ha observado en técnicas de absorbancia óptica, por lo que se sospecha que hay algo detrás de la técnica EELS que hace que los resultados no concuerden a pesar de que teóricamente deben coincidir. En la figura 4b también vemos un plasmón de superficie de orden superior (cuadrupolar) en puntos blancos. Estos plasmones son observados en las partículas de mayor tamaño. El fondo de colores de la figura 4b representa los resultados predichos por modelos clásicos.

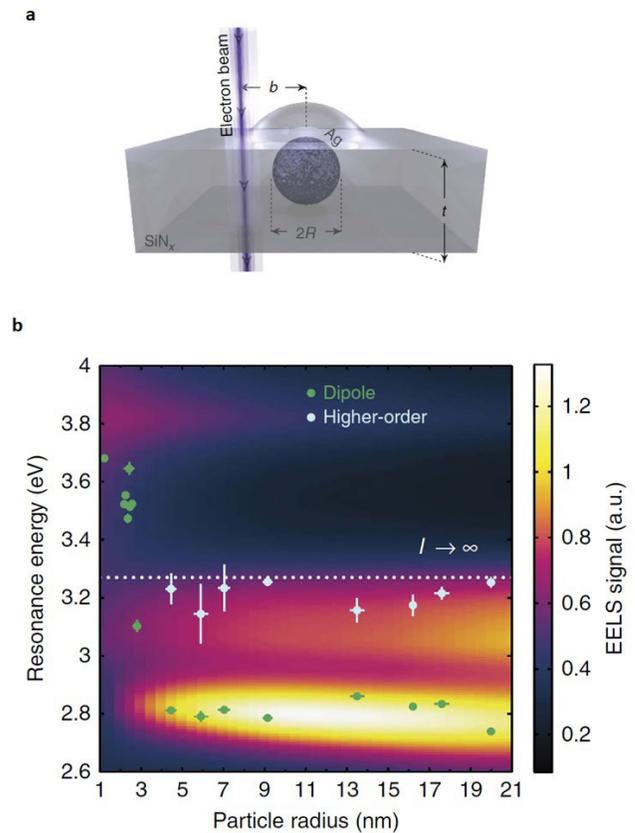


Figure 4. (a) Sistema de nanopartícula de plata dentro de un medio homogéneo de SiN_x estudiado por la técnica EELS en la referencia [27]. (b) Evolución de la energía del plasmón de superficie dipolar (en puntos verdes) con el tamaño de las nanopartículas. El fondo amarillo en la gráfica representa los resultados predichos por simulaciones EELS clásicas.

En el año 2018 se publica el artículo de Campos et al. [20], donde se estudian nanopartículas esféricas de plata depositadas por métodos físicos (vaporización láser y magnetron sputtering) dentro de un medio homogéneo de SiO_x. En este artículo se obtienen los espectros EELS al hacer incidir el haz de electrones en todos los puntos alrededor de la superficie de la nanopartícula para tener una data más representativa de la superficie. En la figura 5b se observa una situación compleja donde el plasmón de superficie dipolar aparece después de cierta cantidad de dosis de electrones. Esto se debe a que en un inicio las nanopartículas pueden estar oxidadas, como lo muestra la capa difusa que se observa alrededor de la nanopartícula en la primera imagen de microscopia STEM de la figura 5a, y esto hace que el plasmón de superficie dipolar se atenúe por completo (curva negra en figura 5b).

Por un efecto de colisiones entre el haz de electrones y el sistema nanopartícula-matriz, el haz de electrones

desprende átomos ligeros, como el oxígeno del óxido alrededor de la nanopartícula, haciendo que aparezca el plasmón de superficie dipolar (curva azul en figura 5b). Al mismo tiempo los átomos de la matriz (Silicio y Oxígeno) salen desprendidos. Esto hace que se cree una porosidad local alrededor de la nanopartícula, la cual se hace más grande entre mayor es la dosis de electrones y por esta razón el plasmón de superficie dipolar siente este cambio de ambiente y se desplaza a mayores energías (curvas rojas y verdes en figura 5b). De esta manera podemos ver que la situación es muy compleja ya que el haz de electrones puede crear una porosidad local que induce un desplazamiento del pico del plasmón de superficie dipolar que no se había tenido en cuenta en estudios EELS anteriores. En la figura 5c vemos la evolución de la posición del pico del plasmón de superficie dipolar con el tamaño de nanopartícula y con la dosis de electrones que está en escala de colores. Lo que vemos es que para las partículas más grandes el plasmón de superficie llega hasta los 3.2eV a altas dosis de electrones y para las nanopartículas más pequeñas el plasmón llega hasta los 3.6eV. Esto se debe a que las partículas más pequeñas son altamente sensibles al cambio de ambiente y aunado a esto están los efectos cuánticos manifestándose, desplazando el pico a mayor energía [20]. Del artículo de Campos et al. queda evidenciado que se debe tener mucho cuidado con la influencia de la dosis de electrones sobre el sistema nanopartícula-matriz.

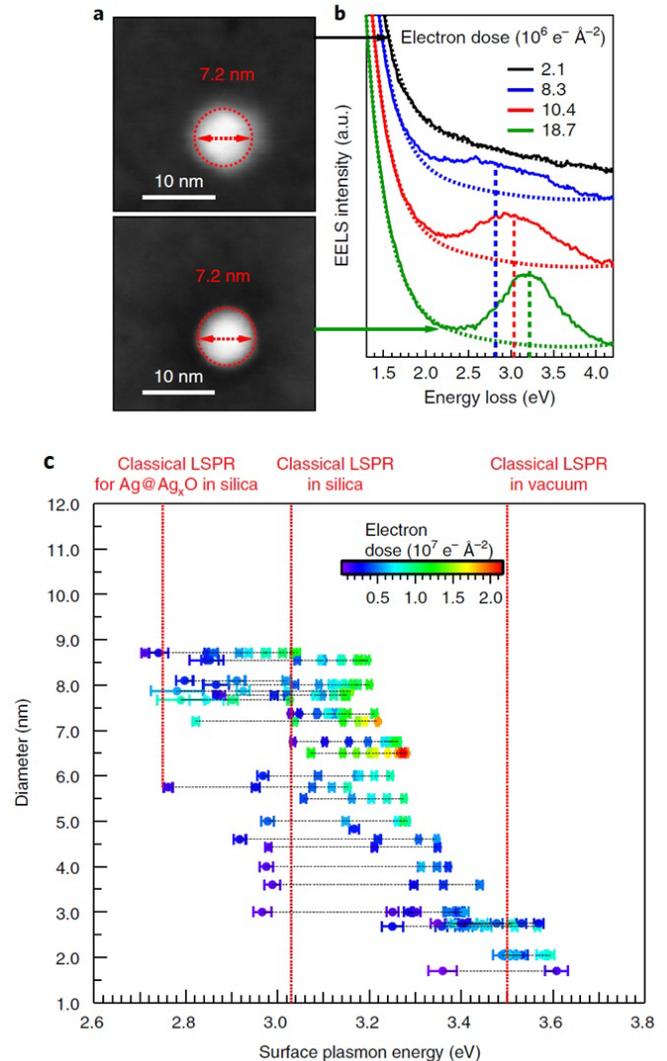


Figure 5. (a) Evolución de los espectros EELS de una nano esfera de plata con la dosis de electrones. (b) Evolución de la posición del pico del plasmón de superficie dipolar con el tamaño de las nanopartículas de plata y con la dosis de electrones.

Fuente: Tomado de [20].

4. Conclusiones

El avance de la técnica EELS junto a la microscopía electrónica STEM, ha permitido el estudio de nanopartículas de plata de dimensiones inferiores a los 10 nm con resoluciones espaciales y espectrales sin precedentes. Muchos de estos resultados, si bien muy claros, no concuerdan con estudios realizados anteriormente por la técnica de absorbancia óptica. Aquí hemos visto que esto es debido a que el corrimiento del pico del plasmón de superficie dipolar en EELS está determinado por un cambio en el medio debido al bombardeo de electrones, lo que induce un cambio en el

índice de refracción efectivo del medio. Por esta razón se debe tener mucho cuidado cuando se comparan resultados EELS con los de absorbancia óptica. Una posible solución al problema es la utilización de cámaras de detección directa de electrones en el espectrómetro EELS para que de esta manera se tenga una buena relación señal/ruido sin necesidad de usar dosis de electrones altas y evitar un daño excesivo a la interfaz nanopartícula-matriz. Otra posible solución puede ser el impacto del haz de electrones en unos cuantos puntos de la superficie y mediante técnicas de reconstrucción se podría conocer los espectros EELS en puntos donde no se ha excitado la partícula. Estas técnicas de reconstrucción son utilizadas en muestras biológicas muy sensibles al haz de electrones.

Para realizar la comparación EELS-óptica a través de simulaciones, los modelos deben incluir tanto los efectos cuánticos en la nanopartícula, así como también una capa de porosidad local para obtener resultados más realistas.

Los mayores avances hasta el momento se han hecho para nano esferas de plata, sin embargo, se tienen que realizar más estudios EELS en otros metales nobles como el oro y cobre para poder conocer una tendencia más general de los plasmones de superficie con el tamaño de nanopartícula. Por otro lado, también queda por realizar estudios del ancho del pico del plasmón de superficie mediante la técnica EELS en pequeñas nanopartículas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (SENACYT) bajo el proyecto FID18-066, por el Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá y por la Agence Nationale de la Recherche (ANR) bajo el proyecto 'FIT SPRINGS' ANR-14-CE08-0009.

Se le agradece a Jean Lermé del Institut Lumière Matière en Lyon Francia por su contribución en la parte teórica de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] G. Qiu, Z. Gai, Y. Tao, J. Schmitt, G. A. Kullak-Ublick and J. Wang, "Dual-Functional Plasmonic Photothermal Biosensors for Highly Accurate Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Detection" *ACS Nano*, vol. 14 (5), pp. 5268-5277, April 2020.
- [2] H. A. Atwater and A. Polman, "Plasmonics For Improved Photovoltaic Devices," *Nature Materials*, vol. 9, pp. 205-213, February 2010.
- [3] L. V. Besteiro, X.-T. Kong, Z. Wang, F. Rosei and A. O. Govorov, "Plasmonic Glasses and Films Based on Alternative Inexpensive Materials for Blocking Infrared Radiation", *Nano Letters*, vol. 18 (5), pp. 3147-3156, April 2018.
- [4] A. Campos and F. Aguilar, "Metallic Nanoparticles for Infrared-Blocking Windows", 2019 7th International Engineering, Sciences and Technology Conference (IESTEC), Panama, Panama, pp. 62-66, 2019.
- [5] C.-W. Chen, Y.-C. Chan, M. Hsiao and R.-S. Liu, "Plasmon-Enhanced Photodynamic Cancer Therapy by Upconversion Nanoparticles Conjugated with Au Nanorods", *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 8, no. 47, pp. 32108-32119, November 2016.
- [6] J. T. Jørgensen, K. Norregaard, P. Tian, P. M. Bendix, A. Kjaer and L. B. Oddershede, "Single Particle and PET-based Platform for Identifying Optimal Plasmonic Nano-Heaters for Photothermal Cancer Therapy", *Scientific Reports* 6, 30076, August 2016.
- [7] L.-A. Wu, W.-E. Li, D.-Z. Lin and Y.-F. Chen, "Three-Dimensional SERS Substrates Formed with Plasmonic Core-Satellite Nanostructures", *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, p. 13066, October 2017.
- [8] H. Haberland, "Looking from both sides", *Nature*, vol. 494, no. 7435, pp. E1-E2, February. 2013.
- [9] M. Hillenkamp, G. D. Domenicantonio, O. Eugster and C. Félix, "Instability of Ag nanoparticles in SiO₂ at ambient conditions", *Nanotechnology*, vol. 18, no. 1, p. 015702, 2007.
- [10] E. Cottancin, M. Broyer, J. Lermé and M. Pellarin, "Handbook of Nanophysics: Nanoelectronics and Nanophotonics", chapter Optical Properties of Metal Clusters and Nanoparticles, CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 2011.
- [11] J. Nelayah, M. Kociak, O. Stéphan, F. J. García de Abajo, M. Tencé, L. Henrard, D. Taverna, I. Pastoriza-Santos, L. M. Liz-Marzán and C. Colliex, "Mapping surface plasmons on a single metallic nanoparticle", *Nat. Phys.*, vol. 3, no. 5, pp. 348-353, May 2007.
- [12] D. Rossouw, M. Couillard, J. Vickery, E. Kumacheva and G. A. Botton, "Multipolar Plasmonic Resonances in Silver Nanowire Antennas Imaged with a Subnanometer Electron Probe", *Nano Lett.*, vol. 11, no. 4, pp. 1499-1504, April 2011.
- [13] M. Bosman, E. Ye, S. F. Tan, C. A. Nijhuis, J. K. W. Yang, R. Marty, A. Mlayah, A. Arbouet, C. Girard and M.-Y. Han, "Surface Plasmon Damping Quantified with an Electron Nanoprobe", *Scientific Reports*, vol. 3, p. 1312, February. 2013.
- [14] A. Losquin, L. F. Zagonel, V. Myroshnychenko, B. Rodríguez-González, M. Tencé, L. Scarabelli, J. Förstner, L. M. Liz-Marzán, F. J. García de Abajo, O. Stéphan and M. Kociak, "Unveiling Nanometer Scale Extinction and Scattering Phenomena through Combined Electron Energy Loss Spectroscopy and Cathodoluminescence

- Measurements”, *Nano Letters*, vol. 15 (2), pp.1229-1237, January 2015.
- [15] F. J. García de Abajo and M. Kociak, ‘Probing the Photonic Local Density of States with Electron Energy Loss Spectroscopy’, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, no. 10, p. 106804, March 2008.
- [16] L. Novotny and B. Hecht, “Principles of Nano-Optics”, Cambridge Core, September 2012.
- [17] F. J. García de Abajo, “Optical excitations in electron microscopy”, *Rev. Mod. Phys.*, vol. 82, no. 1, pp. 209–275, February 2010.
- [18] U. Hohenester, “Plasmon Excitation by Fast Electros”, *World Scientific Handbook of Metamaterials and Plasmonics*, pp. 339-377, December 2017.
- [19] A. Campos. Optics and structure of metal clusters at the atomic scale. *Condensed Matter [cond-mat]*. Université Paris Saclay (COmUE), 2018. English. ffNNT: 2018SACLS401ff. fftel-02342598f.
- [20] A. Campos, N. Troc, E. Cottancin, M. Pellarin, H. C. Weissker, J. Lermé, M. Kociak and M. Hillenkamp, “Plasmonic quantum size effects in silver nanoparticles are dominated by interfaces and local environments”. *Nat. Phys.* Vol. 15, pp. 275–280, March 2019.
- [21] P. E. Batson, “A new surface plasmon resonance in clusters of small aluminum spheres”, *Ultramicroscopy*, vol. 9, no. 3, pp. 277–282, January 1982.
- [22] M. Achèche, C. Colliex, H. Kohl, A. Nourtier and P. Trebbia, “Theoretical and experimental study of plasmon excitations in small metallic spheres”, *Ultramicroscopy*, vol. 20, no. 1, pp. 99–105, January 1986.
- [23] F. Ouyang, P. E. Batson and M. Isaacson, “Quantum size effects in the surfaceplasmon excitation of small metallic particles by electron-energy-loss spectroscopy”, *Phys. Rev. B*, vol. 46, no. 23, pp. 15421–15425, December 1992.
- [24] J. Aizpurua, A. Rivacoba and S. P. Apell, “Electron-energy losses in hemispherical targets”, *Phys. Rev. B*, vol. 54, no. 4, pp. 2901–2909, July 1996.
- [25] J. A. Scholl, A. L. Koh and J. A. Dionne, ‘Quantum plasmon resonances of individual metallic nanoparticles’, *Nature*, vol. 483, no. 7390, pp. 421–427, March 2012.
- [26] S. Raza, N. Stenger, S. Kadkhodazadeh, S. V. Fischer, N. Kostesha, A.-P. Jauho, A. Burrows, M. Wubs and N. A. Mortensen, “Blueshift of the surface plasmon resonance in silver nanoparticles studied with EELS”, *Nanophotonics*, vol. 2, no. 2, pp. 131–138, 2013.
- [27] S. Raza, S. Kadkhodazadeh, T. Christensen, M. Di Vece, M. Wubs, N. A. Mortensen, and N. Stenger, “Multipole plasmons and their disappearance in fewnanometre silver nanoparticles”, *Nature Communication*, vol. 6, November 2015.

Identificación molecular de microorganismos aislados en planteles mineros artesanales de Nicaragua

Molecular identification of microorganisms isolated in handmade mining plants of Nicaragua

Leandro Páramo Aguilera¹

¹ Centro de Investigación y Estudios del Medio Ambiente (CIEMA), Universidad Nacional de Ingeniería (UNI), Nicaragua

*Autor de correspondencia: lparamo99@yahoo.com

RESUMEN— La bioprospección es una investigación realizada para identificar especies, genes y productos con usos actuales o potenciales por parte de la humanidad. Por consiguiente, se desarrolló este proyecto con el propósito de identificar cepas nativas potencialmente útiles para el desarrollo ingenieril de procesos biotecnológicos, donde se aplicaron técnicas de aislamiento, además de un reconocimiento de las características morfológicas de los microorganismos mediante la observación de tinciones de Gram, cintas adhesivas y tinciones en fresco; así como, la identificación molecular por la secuenciación de las regiones 16S para bacterias e ITS y D1/D2/D3 para hongos. Concluido el trabajo se obtuvo un total de 66 aislados microbianos, a los que se les realizaron pruebas morfológicas y entre estos solo a 18 bacterias, 2 hongos filamentosos, 3 hongos levaduriformes se les realizaron las pruebas moleculares, lo que permitió identificar 6 especies bacterianas diferentes y 5 especies fúngicas, además de las identificadas hasta nivel de géneros de *Halomonas sp* y *Enterobacter sp*. Las cepas plenamente identificadas pertenecen a: bacterias como (1) *Acinetobacter calcoaceticus*, (1) *Aeromonas hydrophila*, (4) *Bacillus cereus*, (1) *Bacillus marisflavi*, (1) *Exiguobacterium aurantiacum* y (1) *Terribacillus saccharophilus* y hongos como: (1) *Cyberlindnera jadinii*, (1) *Pichia jadinii*, (1) *Trichosporon asahii*, (1) *Penicillium janthinellum* y (1) *Penicillium simplicissimum*.

Palabras clave— Bioprospección, identificación, pruebas morfológicas; pruebas moleculares; secuenciación.

ABSTRACT— Bioprospecting is an investigation conducted to identify species, genes and products with current or potential uses by mankind. Therefore, this project was developed with the purpose of identifying potentially useful native strains for the engineering development of biotechnological processes, where isolation techniques were applied, in addition to a recognition of the morphological characteristics of microorganisms by observing Gram stains, adhesive tapes and fresh stains; as well as the molecular identification by sequencing the 16S regions for bacteria and STIs and D1 / D2 / D3 for fungi. Concluded the work, a total of 66 microbial isolates were obtained, which were subjected to morphological tests and among these only 18 bacteria, 2 filamentous fungi, 3 yeast fungi were carried out molecular tests, which allowed to identify 6 different bacterial species and 5 fungal species, in addition to those identified up to genus level of *Halomonas sp* and *Enterobacter sp*. The fully identified strains belong to: bacteria such as (1) *Acinetobacter calcoaceticus*, (1) *Aeromonas hydrophila*, (4) *Bacillus cereus*, (1) *Bacillus marisflavi*, (1) *Exiguobacterium aurantiacum* and (1) *Terribacillus saccharophilus* and fungi such as: (1) *Cyberlindnera jadinii*, (1) *Pichia jadinii*, (1) *Trichosporon asahii*, (1) *Penicillium janthinellum* and (1) *Penicillium simplicissimum*.

Keywords— Bioprospecting, identification, morphological tests, molecular tests, sequencing.

1. Introducción

La biotecnología nació de manera empírica, con desconocimiento de los mecanismos de acción de los microorganismos en los procesos agrícolas, ambientales, industriales, entre otros. Actualmente la biotecnología

moderna conoce los procesos y mecanismos involucrados, que permiten utilizar y transformar productos a partir del uso de organismos, empleando diversas técnicas [1]. Con el transcurso del tiempo nace la bioprospección considerada un campo auxiliar de la

biotecnología, cuyo propósito es la búsqueda y selección del microbiota de un hábitat, la purificación del material microbiológico aislado y la identificación completa de las especies microbianas que a mediano o largo plazo pueden producir generosos beneficios [2].

Nicaragua presenta condiciones climatológicas y una posición geoestratégica única que la hace acreedora de una exuberante macro y micro biodiversidad, que representa el 7% de la diversidad biológica del mundo según el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales [3]. Una fuerte capacidad en ciencia y tecnología ya no es un lujo, sino una necesidad para ser partícipes del desarrollo biotecnológico y la economía global, por lo tanto, se debe considerar como la diversidad biológica del país le confiere ventajas para la exploración y el desarrollo en el campo de la biotecnología mediante la bioprospección microbiana.

Es posible plantear el desarrollo de la biotecnología, con estudios orientados a la bioprospección de especies de microorganismos autóctonos, que tengan la capacidad de adaptarse al medio del cual fueron extraídos y que indudablemente son más eficientes sus aplicaciones, que cualquiera que pueda encontrarse comercialmente. A pesar de las diversas dificultades como la falta de una masa crítica mínima, carencia de inversión y poco involucramiento del sector productivo local [4], la presente investigación se orientó a bioprospectar microorganismos de un ecosistema artificial, con la finalidad de encontrar cepas nativas potenciales para el posterior desarrollo ingenieril de procesos biotecnológicos.

El proceso consistió en aislar y purificar los microorganismos, diferenciar sus características fenotípicas y genotípicas a través de pruebas microbiológicas básicas y la aplicación de herramientas moleculares, para su debida identificación a nivel de género o especie. Los datos moleculares han permitido estudiar con mayor precisión los patrones de diversidad genética y su distribución; la composición, funcionamiento y dinámica de las comunidades microbianas y las relaciones filogenéticas. Con la identificación de los microorganismos, se puede iniciar la búsqueda bibliográfica para sugerir aplicaciones biotecnológicas de las cepas y puedan ser utilizadas en posteriores investigaciones en el campo de la biotecnología. Este proyecto pretende marcar un precedente que de alguna manera dé continuidad a los pequeños emprendimientos, que se realizan en el ámbito

biotecnológico del país a través del desarrollo de un plan de bioprospección.

2. Materiales y métodos

Todos los planteles mineros para la extracción de oro en La Libertad están asociadas al organismo conocido como COOPEMILICH (Cooperativa de pequeños mineros de La Libertad-Chontales), que regula la distribución de la materia prima para dicho proceso.

En este muestreo se exploraron dos planteles mineros con un alcance particular de producción de 12 g de oro promedio por cada tonelada de broza procesada

2.1 Ubicación del estudio

Ante la abundante biodiversidad que se encuentra en Nicaragua, se definió ubicar el estudio en el municipio La Libertad departamento de Chontales, que presenta condiciones medioambientales favorables para la producción ganadera, agrícola y minera, además de ser el albergue de un sin número de especies microbiana según el Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria [5]. Por otra parte, las técnicas de aislamiento, purificación, pruebas morfológicas microbianas y el análisis bioinformático del ADN de los microorganismos, se efectuaron en los laboratorios de Biotecnología y Microbiologías de Agua del Programa de Investigación, Estudios Nacionales y Servicios del Ambiente (PIENSA) de la Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). La extracción de los ADN genómicos de los microorganismos se realizó en el laboratorio de Biotecnología de la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN) y el Centro de Biología Molecular de la Universidad Centro Americana (UCA), donde se contrató el servicio. El ADN extraído de los microorganismos fue enviado a la compañía Macrogen en la República de Corea del sur para su secuenciación.

2.2 Sitios de muestreos y recolección de la muestra

En la jornada de muestreo se trabajó con dos planteles mineros para la extracción de oro (Figura 1). El proceso de extracción inicia cuando la broza llega de la mina, la que se fragmenta con un cincel de forma manual, para finalmente ser molida en las rastras. Las rastras son alimentadas gradualmente con broza y agua de pozo, que con la adicción del azogue permite la precipitación de las partículas de oro, el lodo que se genera en las rastras es trasegado a un sistema de diques de colas.

En los planteles mineros se recolectaron muestras aplicando un sistema de muestreo aleatorio simple, que consiste en tomar una muestra (n) de la población (N), de manera tal que cada muestra tenga la misma probabilidad de ser seleccionada [6], las muestras se tomaron en puntos como suelos, subproductos, agua residual, entre otros. Las muestras sólidas se recolectaron con una pala metálica estéril y las líquidas con vasos de precipitado estéril, 5 muestras se colocaron en bolsas para muestras y en tubos cónicos estériles para ser trasladadas al laboratorio en un termo, a una temperatura aproximada a los 10 °C para preservar su naturaleza, sin alteración del número y las actividades de los microorganismos [7]. Asimismo, se realizaron recolecciones *in situ* de 28 muestras por duplicado en placas de Petri con la técnica de siembra masiva y en los medios de cultivos Agar nutritivo (AN), Agar Luria-Bertani (LB), Agar Plate-Count (PCA) y Agar Papa Detroxa (PDA), ya en el laboratorio se dejaron en incubación a una temperatura de 35°C.



Figura 1. Rastra de molienda perteneciente el segundo plantel minero muestreado.

2.3 Aislamiento, selección y purificación de los microorganismos

En el laboratorio se inició el aislamiento microbiano aplicando la técnica de siembra por inmersión, para favorecer el crecimiento separado de las colonias microbianas en las placas de cultivo, para esto se procesaron las muestras tomadas en tubos cónicos y bolsas para muestra. De las muestras solidas se tomó 5g de la muestra original y se mezcló con 5mL de agua destilada estéril y de las muestras liquidas se midieron 5mL de la muestra original, las cuales se colocaron en un tubo de ensayo para tener una solución madre. Seguidamente se tomó 1mL de la muestra madre y se

realizó una dilución seriada de 10^{-1} - 10^{-6} , de cada dilución se tomó 1mL de inóculo para sembrarlo en placas de Petri.

La siembra masiva y por inmersión generaron cultivos mixtos, de los cuales se aislaron especies morfológicamente distinta, el proceso de examinación en las placas de Petri con los medio AN, LB y PCA se realizó durante 7 días hasta que se agotó el crecimiento bacteriano y por 14 días en las placas con PDA hasta que se agotó el crecimiento de los hongos. Los cultivos mixtos se purificaron para obtener cultivos puros, en el caso de las bacterias se realizaron siembras en estría en medio LB donde se pudo determinar las diferentes morfologías de colonias y se efectuaron las resiembras necesarias de las colonias que crecieron aisladas hasta obtener un cultivo puro, para levaduras se aplicó la misma técnica usada con las bacterias a excepción que se utilizó medio PDA y los periodos de incubación fueron de 3-5 días. Las placas con medio PDA se examinaron y se seleccionaron los hongos filamentosos que presentaban diferentes aspectos en el conjunto de micelios, para el aislamiento se utilizó la técnica siembra por punción, se incubaron durante 3-7 días y se realizaron resiembras hasta obtener un cultivo puro.

2.4 Conservación de los microorganismos

Los cultivos axénicos de microorganismos se conservaron con el método de transferencia periódica, que consiste en inocular las cepas a un medio de cultivo fresco en intervalos que aseguren la viabilidad y pureza [8]. La transferencia se realizó en intervalos mensuales, se usaron placas con medio LB para bacterias y medio PDA para hongos filamentosos y levaduriformes, las técnicas para las siembras aplicadas fueron la siembra en estría y por punción en dependencia del tipo de microorganismo. Las placas inoculadas se dejaron en incubación por periodos de 24h para bacterias y un lapso de 3 a 14 días para hongos, estos subcultivos se almacenaron en refrigeración a una temperatura de 10°C, en placas de Petri selladas con PARAFILM.

2.5 Identificación microbiana

La identificación preliminar de los microorganismos se realizó por medio de pruebas morfológicas del primer nivel, que permiten puntualizar las bases para la aplicación de las pruebas moleculares, proceso por el cual los microorganismos se identificaron hasta el nivel de género y/o especie.

Pruebas morfológicas desarrolladas: Los cultivos bacterianos se sometieron a la tinción de Gram después de 24 horas de incubación, siguiendo el procedimiento descrito por López-Jácome et al. [9] Dicho procedimiento permitió observar y registrar las formas de las células bacterianas, sus tamaños y agrupaciones, así como clasificarlas en Gram positivas o negativas, además de determinar con mayor nivel de confianza la pureza del cultivo. Los hongos filamentosos inoculados en las placas de Petri con medio PDA se dejaron en esporulación a la temperatura del laboratorio ($28^{\circ}\text{C} \pm 1$) entre 2 y 5 días y se registraron sus morfologías microscópicas realizando un montaje con la técnica de cinta adhesiva que permite observar las estructuras fúngicas casi sin alteración [7]. La observación de las características al microscópicas de las levaduras se realizó a través de la tinción en fresco, con esta técnica fue posible diferenciar la forma celular de los hongos levaduriformes [10].

Identificación molecular: Se seleccionaron en base a sus características morfológicas 18 bacterias, 3 hongos levaduriformes y 2 hongos filamentosos, los cuales se identificaron molecularmente mediante el estudio del ADN. El ADN de las bacterias se extrajo por el protocolo fenol cloroformo y con el sistema comercial PROMEGA Wizar DNA purification KIT y el ADN de hongos con tres protocolos distintos. La amplificación del ADN se realizó por medio de la técnica PCR (Reacción en cadena de la polimerasa) y la secuenciación por el análisis de la región 16S ADNr para bacterias con los primers 27F y 1492R (5'-AGAGTTTGATCCTGGCTCAG-3' y 5'-TACGGCTACCTTGTTACG ACTT-3'), D1/D2/D3 para hongos levaduriformes con los primers LROR y LR7 (5'-ACCCGCTAACTTAAGC-3' y 5'-TACTACCACCAAGATCT-3') y ITS (Internal Transcribed Space) para hongos filamentosos con los primers ITS1 e ITS4 (5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3' y 5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') [11; 12].

Precedido de la secuenciación se realizó el análisis bioinformático, el primer paso fue la corrección manual con el programa BioEdit v7.0.9 de los errores en los electroferogramas que se producen durante la secuenciación. La secuencia corregida se comparó a través de la herramienta BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) contra secuencias similares reportadas en Gen Bank del NCBI (National Center for Biotechnology

Information) [13]. Posteriormente las secuencias fueron alineadas en el programa BioEdit, utilizando la aplicación Clustal W Multiple Alignment y luego se repitieron los pasos de comparación de la secuencia en el BLAST, donde se seleccionaron cinco nuevas secuencias que se relacionaban filogénicamente con la secuencia problema, para realizar finalmente la construcción de los árboles filogenéticos utilizando el programa MEGA 7.0.14 [14].

3. Resultados

Nicaragua, ha iniciado a dar pasos en el sentido de invertir en biotecnología, por el esfuerzo puntual de muchos desde hace varios años en materia de bioprospección, son parte de esta iniciativa los resultados de los muestreos realizado en dos planteles mineros que se presentan a continuación. Este proyecto, es un esfuerzo en ese sentido, buscando microorganismos útiles desde el punto de vista biotecnológico y que permita el desarrollo de procesos que impacten en la agricultura, la industria y el medio ambiente.

3.1 Toma de muestras en Planteles mineros

Los muestreos deben asegurar que el número y las actividades de los microorganismos no se alteren de manera no cuantificable, durante la recolección y conservación de la muestra. Las muestras deben ser representativas y no estar contaminadas con microorganismos extraños [7]. Los puntos de muestreo se seleccionaron de tal manera que el número de puntos fuese representativo y fueron tomadas según lo descrito por Arias y Piñeros [7].

En el primer plantel se seleccionaron 4 puntos de muestreos y en el segundo plantel 3 puntos (Figura 2a-2g) distribuidos en: lodo en dique de cola, agua residual, cola o lama fresca, cola o lama vieja, agua residual estancada, sedimentos de drenaje y suelo de colas.



Figura 2. Puntos de muestreo en los planteles mineros y fragmento de muestras recolectadas. (a, b y e) aguas residuales. (c, d y g) colas. (f)

materia orgánica. (h) muestras en tubos cónicos y bolsas de muestras estériles. (i) muestras en placas de Petri.

Del muestreo se obtuvo un total de 66 muestras (Figura 2h y 2i). Una vez en el laboratorio, las muestras fueron incubadas obteniéndose a las 24 horas crecimientos microbianos como los que se muestran en la Figura 2i, en los que es posible observar el crecimiento de diversos microorganismos en la misma placa de cultivo, tal y como ha sido obtenido en trabajos previos [15; 4; 7].

3.2 Cultivos axénicos obtenidos

Con la utilización de siembra en estría y por inmersión que son técnicas para el aislamiento y purificación de microorganismos, se logró aislar un total de 66 cultivos axénicos de microorganismos. Los resultados obtenidos en los muestreos se resumen en las Tabla 1, donde se detalla el número total de aislados por punto de muestreo y se definen cuantos cultivos son bacterianos y cuantos fúngicos. Sin embargo, este número no representa el total de microorganismos que subsisten en el ecosistema muestreado, sino solo aquellos que pudieron ser cultivados mediante los medios utilizados.

Tabla 1. Resumen cuantitativo de los cultivos axénicos bacterianos y fúngicos aislados de los 7 puntos muestreados en los planteles mineros, naturaleza y estado de la muestra y su respectiva codificación.

| Naturaleza de la muestra | Estado | Código | No. Hongos | | |
|--------------------------|---------|--------|---------------|--------------|----------------|
| | | | No. Bacterias | Filamentosos | Levaduriformes |
| Lodo en dique de cola | Líquido | MI | 5 | 2 | 1 |
| Agua residual | Líquido | MII | 4 | | |
| Cola o lama fresca | Sólido | MIII | 9 | 4 | 1 |
| Cola o lama vieja | Sólido | MIV | 7 | 5 | 1 |
| Agua residual estancada | Líquido | MV | 3 | | |
| Sedimentos de drenaje | Sólido | MVI | 7 | 4 | |
| Suelo de colas | Sólido | MVII | 10 | 3 | |
| | | Total | 45 | 18 | 3 |

Cuando se siembran las muestras de suelo, agua o alimentos que contienen numerosas clases de microorganismos en placas de Petri con medio sólido, se formarán colonias que serán copias exactas del microorganismo original, dichas colonias microbianas a menudo tienen un aspecto que distingue los microorganismos entre sí. La mayor parte de los trabajos bacteriológicos requieren cultivos puros y de esta manera se podrán estudiar las características macroscópicas, microscópicas, fisiológicas, etc. de un microorganismo en particular [16]. Algunos autores han realizado trabajos tendientes a la obtención de cultivos axénicos de microorganismos partiendo de diferentes ecosistemas, como: Moreno y Albarracín [10], aislaron microorganismos a partir de diferentes muestras naturales (aguas, suelo, sedimentos de ríos o lagos, etc.), Páramo-Aguilera, *et al.*, [4;15], aislaron microorganismos procedentes de reservas biológicas, ríos contaminados, queseras artesanales, minerías artesanales, biopelículas en monumentos patrimoniales, etc.

Los resultados obtenidos que se detallan en las Tabla 1, muestran que en los planteles mineros fue posible obtener un total de 45 aislados bacterianos, 18 aislados de hongos filamentosos y 3 aislados de hongos levaduriformes, siendo la cola o lama fresca y suelos de colas los puntos con mayor cantidad de aislados; solamente en los lodos en dique de cola, cola o lama fresca y cola o lama vieja se logró aislar hongos levaduriformes y en el punto de cola o lama vieja se aislaron la mayor cantidad de hongos filamentosos. Del mismo modo en Páramo-Aguilera, *et al.*, [4] y [15], obtuvieron cantidades similares de aislados de monumentos patrimoniales. Por otra parte, Moreno y Albarracín no reportan en su publicación la cantidad de aislados obtenidos. Arias y Piñero [7], trabajaron solo con muestras de suelo, de las cuales reportan un total de 64 aislados de hongos filamentosos. Todo esto soporta lo que ha sido corroborado en estas y otras investigaciones, que conducen a afirmar que la cantidad y los tipos de aislados que se obtengan de dichos procesos está en relación directa con los tipos de medios de cultivo que se empleen y las condiciones generales de trabajo de las que se disponga para el desarrollo de la investigación.

3.3 Pruebas morfológicas desarrolladas para la identificación microbiana

En su mayoría los procesos de identificación microbiana se realizan mediante métodos convencionales que se basan en las características fenotípicas macroscópicas y microscópicas observables, porque su realización y costo los hace más accesibles [13].

En la figura 3 se presenta un fragmento de las observaciones macroscópicas y microscópicas realizadas a todos los cultivos axénicos, de los cuales se seleccionaron 23 para identificación final por vía molecular, tomando en cuenta como único criterio de selección las características morfológicas observadas.

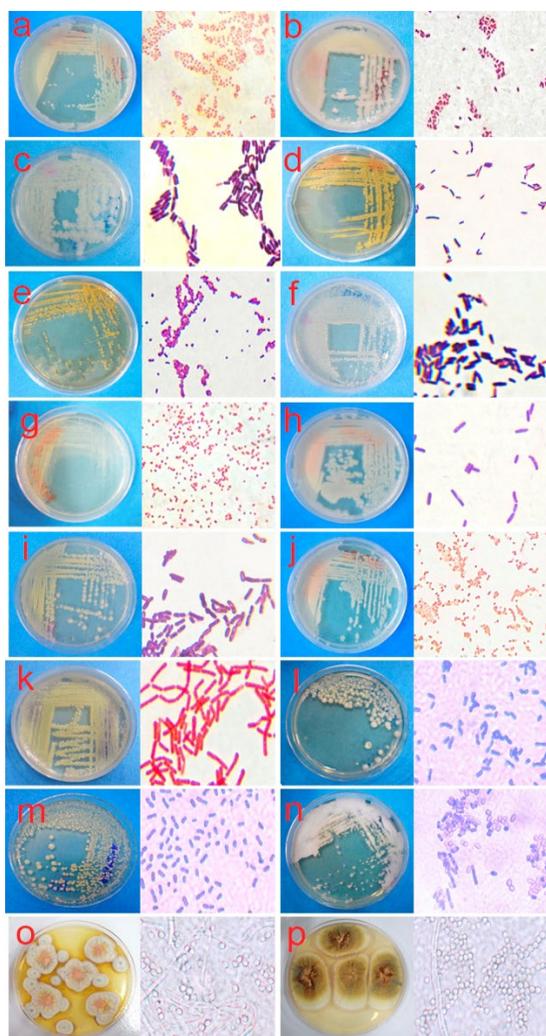


Figura 3. Fragmento de las observaciones macro y microscópica de los cultivos axénicos de bacterias, hongos levaduriformes y filamentosos. (a.) *Acinetobacter calcoaceticus*: MVIA-01. (b.) *Aeromonas hydrophila*: MVB-02. (c.) *Bacillus cereus*: MVIC-08. (d.) *Bacillus marisflavi*: MIVB-01. (e.) *Exiguobacterium aurantiacum*: MVIB-02. (f.) *Terribacillus saccharophilus*:

MIVB-02. (g.) *Acinetobacter* sp: MIIB-04. (h.) *Bacillus* sp: MVIC-09. (i.) *Enterobacter* sp: MIVC-13. (j.) *Pantoea* sp: MIIIA-03. (k.) *Pseudomonas* sp: MIIIC-07, (l.) *Cybelindnera jadinii*: MIVD-09. (m.) *Pichia jadinii*: MID-08. (n.) *Trichosporon asahii*: MIIID-11. (o.) *Penicillium janthinellum*: MVID-11. (p.) *Penicillium simplicissimum*: MVID-03.

Cada día, los estudios de biología molecular constituyen el soporte de toda investigación en el campo taxonómico y biológico, tanto de bacterias como de cualquier otro microorganismo. Sin embargo, se considera que aún estas técnicas moleculares no deben ser abordadas en forma única, sino en conjunto, con ensayos complementarios, que puedan permitir tener un conocimiento más integral con respecto a los caracteres morfológicos, fisiológicos y genotípicos de los microorganismos [18]. En esta coyuntura Páramo-Aguilera, *et al.*, [19], realizaron estudios centrados en la caracterización del microbiota fúngico cultivable de pátinas biológicas seleccionadas en los alrededores del castillo de Chapultepec en México y de la cual presentan la identificación de 34 aislados de hongos representativos, seleccionados en base a características macroscópicas diferenciales distintivas de un total de 300 hongos, se caracterizaron utilizando enfoques morfológicos y moleculares. Por otra parte, Flores y Roque [12], mediante la investigación realizada, caracterizaron microbiológica y molecularmente la diversidad microbiana cultivable de bioinsumos comerciales producidos artesanalmente en Nicaragua.

Parte de los resultados de este trabajo se muestra en la Figuras 3, donde se observa cómo se clasifican según la tinción de Gram los parte de los 18 aislados bacterianos seleccionados, de los cuales 11 son de forma bacilar; 7 Gram positivos y 4 Gram negativos y 7 son de forma cocácea; 2 Gram positivos y 5 Gram negativos. Del mismo modo, se realizó la tinción de Gram para los 25 aislados bacterianos no identificados por vía molecular, de los cuales 14 son de forma bacilar; 10 Gram positivos y 4 Gram negativos y 13 son de forma cocácea; 7 Gram positivos y 6 Gram negativos. En lo que respecta a las pruebas morfológicas desarrolladas para la identificación de hongos levaduriformes y filamentosos permitió la determinación de muchas características macro y microscópicas, como se muestran la figura 3, se registraron las características de los hongos levaduriformes (color, forma, consistencia y tamaño de las células) las cuales se asemejan a las colonias bacterianas a excepción de *Trichosporon asahii* que al contar con pseudohifas sus colonias se asemejan a las de

hongos filamentosos, siendo esta una de las características que aproximó a su identificación molecular. También, se muestran las características de los hongos filamentosos (color en placa, apariencia del micelio y forma de espora), en el caso de *Penicillium janthinellum* y *Penicillium simplicissimum* presentan semejanzas en el crecimiento en placa, además de que sus esporas se asemejan porque ambos microorganismos pertenecen al mismo género, pero se diferencian en el color en placa.

Páramo-Aguilera, *et al.*, [19], muestran como basándose en la combinación de metodologías fenotípicas y moleculares es posible diferenciar comunidades de hongos, en su trabajo revelaron la presencia de una comunidad de hongos representada principalmente por los géneros *Fusarium*, *Trichoderma*, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Mucor*, *Penicillium*, *Pestalotiopsis* y el dimorfo *Aureobasidium*, junto con la levadura *Rhodotorula*. En el trabajo de Flores y Roque [12], se utilizaron las pruebas microbiológicas como un apoyo preliminar para identificar finalmente por herramientas moleculares bacterias del género *Bacillus subtilis* y *cereus*, además de cepas fúngicas a nivel de género como *Penicillium*. En definitiva, la observación de las características macro y microscópicas constituyen herramientas valiosas para completar la identificación molecular, al conocer la morfología de las colonias, las células o las esporas que en ocasiones permite llegar a identificar bacterias y hongos a nivel de género y a veces hasta nivel de especie. Cabe destacar que a este nivel de diferenciación sobre la morfología microbiana se puede declarar de manera presuntiva que se contaba con bacterias pertenecientes a los géneros *Bacillus* y *Pseudomonas* y algunos hongos como *Trichosporum*, *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*, basado únicamente en sus características morfológicas lo que posteriormente fue confirmado mediante la identificación por vía molecular.

3.4 Identificación molecular de microorganismos seleccionados

Las bacterias y los hongos seleccionados según su característica morfológica se identificaron molecularmente por las secuenciaciones de los ADN a como se definió en el acápite 2.5 de la metodología, posteriormente se realizaron los análisis de las secuencias recibidas del servicio contratado en Macrogen y de esta

manera fue posible construir los árboles filogenéticos de los cuales se muestra una fracción en las figuras 4 y 5.

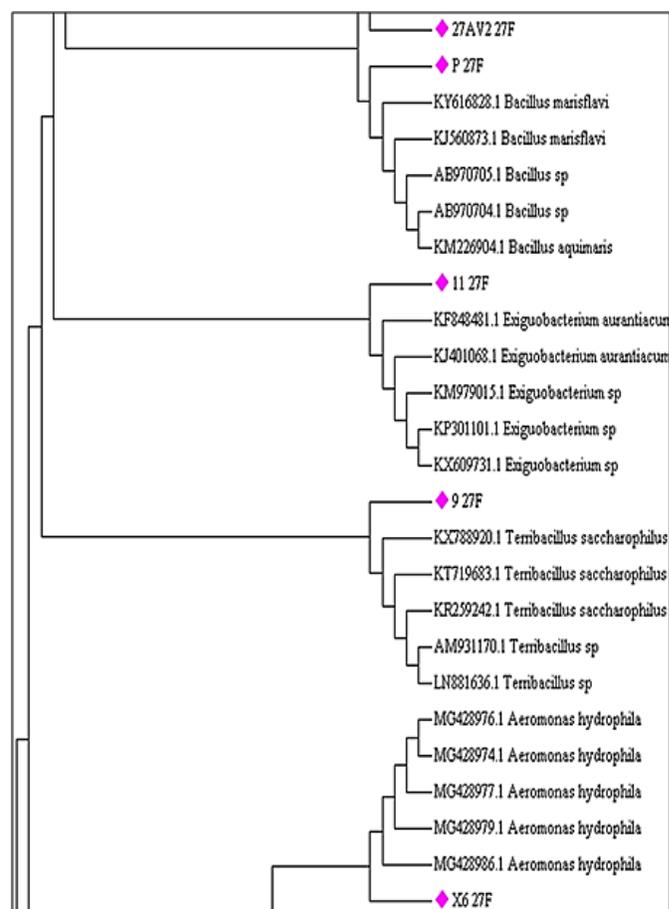


Figura 4. Fragmento del árbol de relaciones evolutivas de las bacterias, utilizando el método del vecino más cercano en programa MEGA 7. Las distancias evolutivas se calcularon utilizando el método de probabilidad máxima compuesta y están en las unidades del número de sustituciones de bases por sitio. El análisis involucró 105 secuencias de nucleótidos. Hubo un total de 393 posiciones en el conjunto de datos final.

Mediante el análisis filogenético basado en las figuras 4 y 5, se obtuvo la identificación final para los 23 aislados de microorganismos seleccionados, identidades que se resumen en las Tabla 2 y 3, donde se presentan los resultados de géneros y/o especies, vecino más cercano, máximo score y % de máxima identidad, resultante del análisis de las secuencias y por medio del análisis de los árboles filogenéticos de las bacterias y los hongos, elaborados en el programa MEGA 7 utilizando el método del vecino más cercano y la información de las secuencias del GenBank que presentaban mayor homología con cada secuencia en estudio.

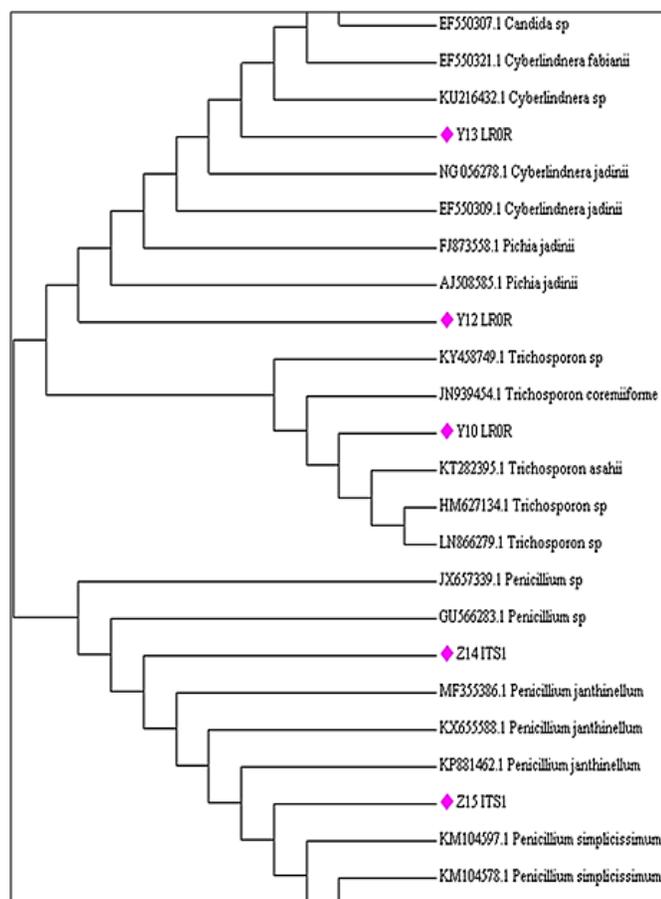


Figura 5. Árbol de relaciones evolutivas de los hongos, utilizando el método del vecino más cercano en programa MEGA 7. Las distancias evolutivas se calcularon utilizando el método de probabilidad máxima compuesta y están en las unidades del número de sustituciones de bases por sitio. El análisis involucró 30 secuencias de nucleótidos. Hubo un total de 401 posiciones en el conjunto de datos final.

Los métodos moleculares como PCR agilizan la identificación analizando regiones específicas dentro de los genes. La secuenciación del gen ADN ha servido como una importante herramienta para determinar las relaciones filogenéticas entre los microorganismos, siendo una herramienta útil para el estudio filogenético y para la identificación rutinaria de aislados microbianos [13]. Actualmente se desarrollan numerosas investigaciones dentro del marco de la identificación molecular, en la mayoría de los casos estos trabajos ofrecen resultados convincentes sobre la identidad de sus aislados como en el estudio desarrollado por Flores y Roque [12], donde obtuvieron exitosos resultados

identificando molecularmente a 15 microorganismos aislados a partir de bioinsumos. Ruiz [11], identificó 21 cepas bacterianas aisladas de restos de vegetales hortícolas sometidos a compostaje. Álvarez, *et al.*, [20], realizaron aislamientos de microorganismos de la rizosfera de plantas de vainilla en un cultivo piloto ubicado en el municipio de Sopetrán (Antioquia, Colombia) y posteriormente seleccionaron 52 morfotipos para su identificación molecular por secuenciación de las regiones ITS y 16S del ADN ribosomal para hongos y bacterias, respectivamente.

En el presente trabajo, por medio de la identificación molecular se identificaron a nivel de género y especie 18 cepas bacterianas y 5 cepas fúngicas seleccionadas. En la figura 4 y 5 se observa como algunas de las bacterias y hongos secuenciados se agrupan correctamente en clados muy bien diferenciados para cada género y su especie. De esta manera fue posible determinar claramente géneros bacterianos como *Bacillus sp*, *Exiguobacterium sp*, *Terribacillus sp* y *Aeromonas sp* y géneros fúngicos como *Cybelindnera sp*, *Pichia sp*, *Trichosporon sp* y *Penicillium sp*. Adicionalmente en la tabla 2 y 3 se detallan los resultados obtenidos de la identificación molecular donde se aprecia como en la mayoría de los casos, cada bacteria confirma su identidad con un 99% y cada hongo con un 100% en comparación con las secuencias contenidas en el Genbank.

De manera general el proceso de identificación permitió obtener una amplia gama de géneros y especies como las bacterias: (1) *Acinetobacter calcoaceticus*, (1) *Aeromonas hydrophila*, (4) *Bacillus cereus*, (1) *Bacillus marisflavi*, (1) *Exiguobacterium aurantiacum* y (1) *Terribacillus saccharophilus* y a nivel de género solo se identificaron los tipos; (2) *Acinetobacter sp*, (3) *Bacillus sp*, (1) *Enterobacter sp*, (1) *Halomonas sp* y (2) *Pseudomonas sp*. Se identificaron hongos como: (1) *Cybelindnera jadinii*, (1) *Pichia jadinii*, (1) *Trichosporon asahii*, (1) *Penicillium janthinellum* y (1) *Penicillium simplicissimum*. Todo lo antes expuesto, permito que a la fecha se cuente con 6 especies bacterianas y 5 especies fúngicas diferentes plenamente identificadas, quedando aun por precisar la identificación de las bacterias que están identificadas hasta el nivel de género.

Tabla 2. Identificación molecular de 18 cepas de bacterias cultivables procedentes de los planteles mineros

| BACTERIAS IDENTIFICADAS EN LOS PLANTELES MINEROS | | | | |
|--|--|------------|----------------|-------------------------------------|
| Código microorganismos | Vecino más cercano (Numero de Acceso) | Max. Score | Ident. máx (%) | Identidad final |
| MIIIA-01 | <i>Bacillus cereus</i> (KY649378.1) | 2174 | 99 | <i>Bacillus cereus</i> |
| MIIIA-03 | <i>Halomonas sp</i> (DQ129699.1) | 536 | 84 | <i>Halomonas sp</i> |
| MIIB-04 | <i>Acinetobacter sp</i> (KM108508.1) | 1653 | 99 | <i>Acinetobacter sp</i> |
| MIIC-06 | <i>Bacillus cereus</i> (HE660034.1) | 1879 | 95 | <i>Bacillus cereus</i> |
| MIIC-07 | <i>Pseudomonas sp</i> (KT321870.1) | 2132 | 99 | <i>Pseudomonas sp</i> |
| MIVB-01 | <i>Bacillus marisflavi</i> (KY616828.1) | 1916 | 97 | <i>Bacillus marisflavi</i> |
| MIVB-02 | <i>Terribacillus saccharophilus</i> (KX788920.1) | 1855 | 99 | <i>Terribacillus saccharophilus</i> |
| MIVB-11 | <i>Bacillus cereus</i> (MH010164.1) | 2080 | 100 | <i>Bacillus cereus</i> |
| MIVC-13 | <i>Enterobacter sp</i> (GQ284539.1) | 2025 | 100 | <i>Enterobacter sp</i> |
| MVB-02 | <i>Aeromonas hydrophila</i> (MG428986.1) | 2128 | 99 | <i>Aeromonas hydrophila</i> |
| MVIA-01 | <i>Acinetobacter calcoaceticus</i> (KY091892.1) | 2180 | 99 | <i>Acinetobacter calcoaceticus</i> |
| MVIB-02 | <i>Exiguobacterium aurantiacum</i> (KF848481.1) | 1820 | 96 | <i>Exiguobacterium aurantiacum</i> |
| MVIB-07 | <i>Acinetobacter sp</i> (KR072554.1) | 2150 | 99 | <i>Acinetobacter sp</i> |
| MVIC-08 | <i>Bacillus cereus</i> (KY622400.1) | 2161 | 99 | <i>Bacillus cereus</i> |
| MVIC-09 | <i>Bacillus sp</i> (KY622516.1) | 1916 | 100 | <i>Bacillus sp</i> |
| MVIA-01 | <i>Bacillus sp</i> (GQ340502.1) | 2213 | 99 | <i>Bacillus sp</i> |
| MVIIC-03 | <i>Pseudomonas sp</i> (MG674361.1) | 2012 | 99 | <i>Pseudomonas sp</i> |
| MVIIB-08 | <i>Bacillus sp</i> (KY681738.1) | 1696 | 97 | <i>Bacillus sp</i> |

Tabla 3. Identificación molecular de 5 cepas de hongos cultivables procedentes de los planteles mineros

| Código microorganismo | Vecino más cercano (Numero de Acceso) | Max. Score | Iden. máx (%) | Identidad final |
|-----------------------|--|------------|---------------|-----------------------------------|
| HONGOS LEVADURIFORMES | | | | |
| MID-08 | <i>Pichia jadinii</i> (AJ508585.1) | 660 | 88 | <i>Pichia jadinii</i> |
| MIID-11 | <i>Trichosporon asahii</i> (KT282395.1) | 1840 | 99 | <i>Trichosporon asahii</i> |
| MIVD-09 | <i>Cyberlindnera jadinii</i> (NG056278.1) | 1886 | 100 | <i>Cyberlindnera jadinii</i> |
| HONGOS FILAMENTOSOS | | | | |
| MVID-03 | <i>Penicillium simplicissimum</i> (KM104597.1) | 942 | 100 | <i>Penicillium simplicissimum</i> |
| MVID-11 | <i>Penicillium janthinellum</i> (MF355386.1) | 837 | 99 | <i>Penicillium janthinellum</i> |

De todos los aislados que quedaron a nivel de género, solamente se destacan los géneros *Halomonas* y *Enterobacter*, ya que los demás géneros están contenidos entre los identificados a nivel de especie, pudiendo encontrarse alguna especie nueva entre las que están por completar hasta especie o repetirse alguna de las que ya se tiene.

En relación con la presencia de las cepas identificadas en los planteles mineros, todas las especies identificadas han sido aisladas previamente en ambientes característicos de estos procesos [11]. Las especies de *Bacillus* que en esta investigación reúnen un total de 7 cepas identificadas, tienen la capacidad para sobrevivir a las variaciones térmicas debido a su capacidad para formar endosporas, por ello, constituye uno de los

géneros bacterianos dominantes en la mayoría de los componentes ambientales, los resultados de Flores y Roque, [12], reportan que de 14 aislados bacterianos, 10 corresponden al género *Bacillus* de los tipos *cereus*, *flexus*, *pumilus*, *megaterium* y *subtilis*. Otro de los géneros con mayor incidencia es el de *Pseudomonas* de las cuales se reportan 2 cepas mediante este trabajo y que también formaron parte de los resultados obtenidos por Ruiz [11]. Álvarez, *et al.*, [20], por análisis de secuencias ITS identificaron cuatro hongos pertenecientes a las especies *Plectosphaerella cucumerina*, *Penicillium griseofulvum*, *Bionectria ochroleuca* y *Aspergillus fumigatus* y dos hongos pertenecientes a los géneros *Fusarium* y *Phoma*. Los resultados de las pruebas morfológicas corroboraron los obtenidos por vía molecular, ejemplo, para el MIIID-11 se presumía la identidad a nivel de género como *Trichosporon* (antes de su identificación) y al ser comparados se confirmó que pertenecen a las especies *Trichosporon asahii*; así mismo, sucedió para los hongos filamentosos. Este trabajo, al igual que los trabajos previamente citados, muestra que las pruebas morfológicas unidas a pruebas moleculares constituyen un vehículo adecuado para la identificación microbiana.

4. Conclusiones

Como producto del proceso de aislamiento, selección y purificación de microorganismos, se obtuvo un total de 45 bacterias, 18 hongos filamentosos y 3 hongos levaduriformes aislados en los planteles mineros, para un total de 66 aislados obtenidos en este proyecto. Las pruebas morfológicas confirmaron los resultados de la aplicación de las herramientas moleculares de los 23 aislados enviados a secuenciar. Por la vía molecular se llegó a identificar especies bacterianas y fúngicas pertenecientes a: (1) *Acinetobacter calcoaceticus*, (1) *Aeromonas hydrophila*, (4) *Bacillus cereus*, (1) *Bacillus marisflavi*, (1) *Exiguobacterium aurantiacum*, (1) *Terribacillus saccharophilus*, (1) *Cyberlindnera jadinii*, (1) *Pichia jadinii*, (1) *Trichosporon asahii*, (1) *Penicillium janthinellum* y (1) *Penicillium simplicissimum*. Además de las especies identificadas, se determinó la identidad de 9 bacterias a nivel de género pertenecientes a: (2) *Acinetobacter sp*, (3) *Bacillus sp*, (1) *Enterobacter sp*, (1) *Halomonas sp* y (2) *Pseudomonas sp*. Al final se obtuvo un total de 6 especies bacterianas y 5 especies fúngicas diferentes, que están plenamente identificadas, quedando aun por precisar la identificación

de las que están identificadas hasta el nivel de género. Los resultados obtenidos de la identificación molecular en la mayoría de los casos, para bacterias confirman su identidad con un 99 % y para hongos se confirmó su identidad con un 100% en comparación con las secuencias obtenidas del Genbank del NCBI, lo que se traduce en un proceso de identificación de calidad. Finalmente, el desarrollo de este trabajo en bioprospección microbiana aportó un buen número de microorganismos identificados y que han sido reportados en la literatura científica como útiles para el desarrollo de diversos bioprocesos, abriendo las puertas para futuras y diversas investigaciones en biotecnología que podrían mejorar al agro, el ambiente y la industria nacional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Programa de Investigación Estudios Nacionales y Servicios Ambientales (PIENSA-UNI) bajo la dirección de las Ing. Larisa Korsak; por haber sido contraparte de este proyecto y en cuyas instalaciones se encuentra el laboratorio de biotecnología, en el cual se desarrolló este trabajo de investigación. El reconocimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería, quien por medio de su vicerrectoría de Investigación y Desarrollo ha facilitado el aporte financiero para llevar a cabo el proyecto.

REFERENCIAS

- [1] R. González. Biotecnología, Historia y Desarrollo: Situación Actual en Nicaragua. II CONGRESO MULTIDISCIPLINARIO E INTERNACIONAL DE AGROBIOTECNOLOGÍA. Conferencia llevada a cabo en Nicaragua. 2011.
- [2] A. M. Cotes., L. S. Barrero., F. Rodríguez., M. V. Zuluaga y H Arévalo. *Bioprospección para el desarrollo del sector agropecuario de Colombia*. Bogotá, (Cundinamarca): CORPOICA. (1ª Ed.). pp.10Cap. 1, ISBN: 978-958-740-130-1, 2012.
- [3] MARENA. Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales. V Informe Nacional de Biodiversidad. Managua, Nicaragua. 2014,
- [4] L. Páramo-Aguilera., E. Fonseca-Cruz., H. Delgado-Silva., C. Ríos-Guevara y K. Cabistán-calderón. La bioprospección en Nicaragua: avances en la búsqueda de aplicaciones agrícolas, industriales y ambientales. *Nexo Revista Científica*, 31(2), 89-103. ISSN: E1995-9516, 2018.
- [5] INTA, Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria. Estado, Prioridades y necesidades para el manejo sostenible del suelo en Nicaragua. Managua, Nicaragua. 2013.
- [6] J. Pacheco y A. Cabrera, Cuerpos de aguas subterráneas. En F, Bautista. (2ª Ed.), *TÉCNICAS DE MUESTREO PARA*

- MANEJADORES DE RECURSOS NATURALES. DF, México: Universidad Nacional Autónoma de México. Cap. 2, pp. 76. ISBN: 978-607-02-2127-9, 2011.
- [7] E. Arias, y P. Piñeros, *Aislamiento e identificación de hongos filamentosos de muestras de suelo de los páramos de Guasca y Cruz verde* (Tesis de grado). Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia. 2008.
- [8] D. Hernández, y S. Loaiza. *Selección de un método para la conservación y preservación de Actinomicetos aislados del suelo del jardín botánico de la Universidad Tecnológica de Pereira*. (Trabajo de grado). Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 2014.
- [9] L. López-Jácome., M. Hernández-Duran., C. Colín-Castro., S. G. Ortega-Peña, Cerón-González y R. Franco-Cendejas. Las tinciones básicas en el laboratorio de microbiología. *Investigación en Discapacidad Medigraphic*, 3(1), 10-18. URL:<http://medigraphic.com/rid> 2014.
- [10] J. Moreno y V. Albarracín. Aislamiento, cultivo e identificación de microorganismos ambientales a partir de muestras naturales. *Reduca (Biología). Serie Microbiología*, 5(5), 79-93. ISSN: 1989-3620, 2012.
- [11] A. Ruiz, *Producción de lipasas de interés ambiental por microorganismos aislados a partir de material vegetal sometido a compostaje* (Trabajo de grado). Escuela Politécnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Almería, España. 2014.
- [12] M. Flores y E. Roque, *Aislamiento y caracterización microbiana (microbiológica y molecular) en la búsqueda de Bacillus subtilis a partir de bioinsumos comerciales y pruebas de antagonismo frente a hongos fitopatógenos* (Tesis de grado). Universidad Nacional de Ingeniería. Managua, Nicaragua. 2017.
- [13] G. Bou, A. Fernández, C. García, J. Sáez, y Valdezate, S. *Métodos de identificación bacteriana en el laboratorio de microbiología. Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 29(8), 601-608. doi: 10.1016/j.eimc.2011.03.012. 2011.
- [14] C. Rodríguez. *Evaluación de microorganismos promotores de crecimiento vegetal en Tomate (Solanum lycopersicum) variedad Santa Clara, aislados de residuos Ligno Celulósicos de Higuierilla (Ricinus communis)*. (Trabajo de grado). Universidad Católica de Manizales, Colombia. 2013.
- [15] L. Páramo-Aguilera., J. Narváez-Zapata y E. De la Cruz. *Aislamiento e identificación de microorganismos en biopelículas provenientes del Castillo de Chapultepec, Ciudad de México. Nexa Revista Científica*, 24(2), 1-9. ISSN: L1818-6742, 2011.
- [16] G.J. Tortora., B.R. Funke, y C.L. Case. *Introducción a la Microbiología*. Buenos Aires, Argentina: Médica Panamericana. Cap. 3, 6 y 10, pp.70, 173 y 284. ISBN: 978-950-06-0740-7. 2007.
- [17] J. Moreno y V. Albarracín. Aislamiento, cultivo e identificación de microorganismos ambientales a partir de muestras naturales. *Reduca (Biología). Serie Microbiología*, 5(5), 79-93. ISSN: 1989-3620. 2012.
- [18] M. Mendoza. Importancia de la identificación de levaduras. Importancia de la identificación de levaduras. *Revista de la Sociedad Venezolana de Microbiología*, 25(1),103-117. ISSN: 1315-2556. 2005.
- [19] L. Páramo-Aguilera. *Caracterización de comunidades microbianas con potencial biotecnológico para la prevención del deterioro estructural* (Tesis doctoral). Instituto Politécnico Nacional, Centro de Biotecnología Genómica, Reynosa, Tamaulipas. 2012.
- [20] C. Álvarez, N. Osorio y M. Marín. Identificación molecular de microorganismos asociados a la rizosfera de plantas de vainilla en Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 18(2), 293-305. ISSN: 0120-548X. 2013.



TEPEU-1: Misión espacial latinoamericana con fines científicos y de validación tecnológica

TEPEU-1: Latin American space mission for scientific and technological validation

Mario Alberto Mendoza-Bárceñas¹, Rafael Prieto Meléndez², Omar Álvarez-Cárdenas³,
Javier Arellano-Verdejo⁴, Alejandro Padrón-Godínez^{2,5,*}

¹ Centro de Desarrollo Aeroespacial, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

² Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX-México

³ Facultad de Telemática, Universidad de Colima, Colima, Colima, México

⁴ El Colegio de la Frontera Sur, Estación para la Recepción de Información Satelital ERIS, Chetumal, Quintana Roo, México

⁵ Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla-México

*Autor de correspondencia: alejandro.padron@icat.unam.mx

RESUMEN— El presente trabajo muestra el diseño conceptual de la primera misión del Programa Espacial TEPEU, estará basada en el desarrollo de un satélite pequeño de órbita baja con un objetivo doble. Primero, demostrar las capacidades institucionales latinoamericanas para la integración de grupos académicos interdisciplinarios con proyectos afines mediante la planeación, desarrollo y construcción de un satélite tipo Cubesat unitario que orbitará la Tierra, así como la integración de una red de estaciones terrenas basada en infraestructura de radio aficionados para la recepción de datos y telemetría del satélite en órbita. Segundo, desde el punto de vista científico, con las mediciones obtenidas con la instrumentación a bordo, se desarrollarán modelos matemáticos y computacionales que describan fenómenos naturales que ocurren en la tierra y su atmósfera, relacionados con la estimación de fenómenos geofísicos y su correlación con el comportamiento de capas atmosféricas. En el apartado técnico, se trabaja en establecer características de la instrumentación y equipos a implementar, tanto en el segmento espacio como con el segmento tierra. En el segmento espacial, se trabaja en la definición del módulo de carga útil, contendrá sensores comerciales y experimentales, tales como un magnetómetro comercial y una sonda de Langmuir tipo parche, desarrollado en conjunto con el Laboratorio de Exploración Espacial y Planetaria de la Universidad de Chile. En el caso del segmento tierra, se proyecta, en colaboración con la Federación Mexicana de Radio Experimentadores, federaciones y clubes de radio aficionados en América Latina y otros países, la integración de una red de estaciones terrenas.

Palabras clave— Satélites pequeños, radio aficionado, ionósfera, clima espacial.

ABSTRACT— The present work shows the conceptual design of the first mission of the TEPEU Space Program, which will be based on the development of a small low-orbit satellite with a double objective. First, to demonstrate the Latin American institutional capacities for the integration of interdisciplinary academic groups with related projects through the planning, development and construction of a 1-unit Cubesat satellite that will orbit the Earth, as well as the integration of an infrastructure-based network of earth stations amateur radio for data reception and satellite telemetry in orbit. Second, from the scientific point of view, with the measurements obtained with the instrumentation on board, mathematical and computational models will be developed that describe natural phenomena that occur in the earth and its atmosphere, related to the estimation of geophysical phenomena and their correlation with the atmospheric layers behavior. In the technical section, we work on establishing characteristics of the instrumentation and equipment to be implemented, both in the space segment and ground segment. In the space segment, we work on the definition of the payload module, which will contain commercial and experimental sensors, such as a commercial magnetometer and a Langmuir probe type patch, developed in collaboration with the Space and Planetary Exploration Laboratory (SPEL) from the University of Chile. Meanwhile, in the case of the land segment, the integration of a network of earth stations is planned, in collaboration with the “Federación Mexicana of Radio Experimentadores” (FMRE), federations and amateur radio clubs in Latin America and other countries.

Keywords— Small satellites, amateur radio, ionosphere, space weather.

Citación: A. Padrón, “TEPEU-1: Misión espacial latinoamericana con fines científicos y de validación tecnológica”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 27 de febrero de 2020. **Recibido con correcciones:** 17 de junio de 2020. **Aceptado:** 17 de junio de 2020.

DOI.

Copyright: 2021 A. Padrón. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

TEPEU, en la cosmovisión maya fue un dios del cielo y una de las deidades que participó en los tres intentos de crear a la humanidad. En el contexto del desarrollo tecnológico actual, TEPEU es el nombre de la misión espacial con fines científicos y tecnológicos impulsada dentro y fuera de México por instituciones de educación superior y de investigación. Sin duda, el lanzamiento y puesta en órbita del satélite ruso Sputnik el 4 de octubre de 1957, representa un referente indispensable para entender el inicio de la carrera espacial en el mundo. Luego de ello, otras potencias mundiales, como Estados Unidos, se sumaron al esfuerzo por alcanzar la conquista de espacio con el lanzamiento del Explorer I, con lo cual los límites han superado los objetivos iniciales de exploración espacial y ahora, se trabaja incluso en planes para la colonización de otros planetas. En este contexto, México tiene una tradición que data de fines de la década de los 50's, donde se incursionó en el diseño y desarrollo de cohetes con fines de exploración de las capas altas de la atmósfera terrestre [1]. La década de los 60's representó para nuestro país una época en la que el desarrollo tecnológico en materia espacial, particularmente en el campo de la cohertería tuvo un gran auge, con el lanzamiento de cohetes impulsados incluso con combustible líquido, con tecnología similar a la de los cohetes desarrollados por los alemanes durante la segunda guerra mundial [2]. El campo de las comunicaciones satelitales también tuvo un avance impresionante, teniendo como marco la celebración de los Juegos Olímpicos de 1968, se instaló en el estado de Hidalgo la primera estación de comunicaciones satelitales en México, "Tulancingo-1", a partir de la cual, con el uso de los entonces novedosos satélites comerciales de telecomunicaciones se pudieron realizar transmisiones de televisión a todo el mundo [3]. Luego de ello, debido a diferentes cambios en los paradigmas y políticas del gobierno federal, las instancias creadas para el desarrollo espacial en México, tales como la Comisión Nacional del Espacio Exterior (CONAE) y el Instituto Mexicano de Comunicaciones (IMC) desaparecieron, dejando en el abismo el desarrollo espacial en México, convirtiéndose en un usuario más del mercado tecnológico espacial internacional. No fue sino hasta la década de los 90 cuando en la UNAM, se desarrolló e integró el microsátélite UNAMSAT-B, hasta ahora el primer satélite desarrollado por académicos y estudiantes

mexicanos, el cual fue lanzado en septiembre de 1996 y que debido a problemas con el subsistema de suministro eléctrico se declaró perdido para agosto de 1997 [4].

2. Participación latinoamericana en el desarrollo espacial

Brasil ha incursionado desde 1961 al programa espacial con el desarrollo y prueba de cohetes con la creación de varios institutos para la investigación espacial. En 1993 y 1998 lanzaron satélites de recolección de datos para la adquisición de datos sobre el medio ambiente. La agencia espacial brasileña (AEB) ha firmado acuerdos con China para la colaboración y financiamiento de desarrollos espaciales. La agencia chilena del espacio (ACE) desde 2001 fue creada para desarrollar y expandir el conocimiento del espacio exterior manifestando los beneficios y aplicaciones de la tecnología espacial en sus actividades nacionales [5]. En noticias como la estrella de Panamá, publican los intentos para la creación de la agencia espacial de Panamá, según una experta de la NASA, Erika Podest. Además de la creación de un centro de lanzamiento de satélites mediante alianzas con otros países, mencionó Podest científica en estudios del cambio climático [6].

Actualmente existen proyectos de constelaciones de satélites de órbita baja (LEO, por sus siglas en inglés), creadas por empresas como OneWeb, Amazon y Space X, que desarrollan grandes expectativas en América Latina como modelo de negocio para servicios comerciales. Argentina tiene proyectado lanzar tres satélites en orbitas GEO hasta 2022, pero muchos de sus problemas es la reglamentación a través de sus agencias espaciales [7].

Dado el contexto anterior y en virtud de los cambios en el panorama mundial, resulta crucial la inclusión de México y América Latina en el escenario del desarrollo espacial, sin embargo, esta inclusión se debe asumir a partir de una estrategia que parta de la suma de esfuerzos institucionales y que permita superar limitaciones, así como potencializar los alcances de las iniciativas tecnológicas, apoyándose además en la participación de asociaciones civiles y la iniciativa privada nacional e internacional.

En este sentido, la misión espacial TEPEU-1, coordinada por el IPN y la UNAM, representa una propuesta que, además de los objetivos científicos y tecnológicos que persigue, se ha convertido en un

detonante para la integración y participación sinérgica de componentes de la llamada triple hélice: instituciones educativas-sector productivo-sector gobierno, en torno al diseño, desarrollo e integración de una misión espacial con fines de investigación científica y desarrollo tecnológico nacional [8].

La misión espacial TEPEU-1, está diseñada en torno a dos segmentos principales: el segmento espacial y el segmento terrestre, integrado por elementos comerciales en la mayoría de sus componentes, partiendo de la filosofía de desarrollar un satélite pequeño, funcional y de arquitectura sencilla, que nos permita comenzar la ruta del aprendizaje en el diseño y desarrollo de sistemas espaciales además de la conformación de grupos de trabajo multidisciplinarios e interinstitucionales. El segmento espacial, está constituido por un nanosatélite integrado a partir de los siguientes subsistemas básicos en su plataforma: computadora a bordo, comunicaciones, potencia, estructura y protección térmica.

En cuanto a la carga útil, está integrada a partir de sensores para el registro de temperatura y campo magnético de la ionósfera terrestre, así como un repetidor de señales que será aprovechado por la comunidad de radio aficionados para realizar diferentes experimentos de recepción en tierra. Por su parte, el segmento terrestre, estará integrado por un conjunto de estaciones terrenas distribuidas a lo largo de todo el territorio mexicano, a partir de infraestructuras institucionales, en algunos casos, y en otros, apoyándose en infraestructuras pertenecientes a radio aficionados (con capacidades de enlaces satélites) participantes en el proyecto espacial.

La red de estaciones terrenas permitirá, además de ampliar la cobertura para la recepción de los datos del satélite TEPEU-1 una vez puesto en órbita, también, poder establecer y coordinar esquemas de distribución de datos en todo el territorio de cobertura, para el aprovechamiento futuro de los datos que en las siguientes misiones del programa espacial TEPEU y otras iniciativas científicas y tecnológicas se puedan generar. En los siguientes apartados se describirán los detalles de cada uno de los segmentos que integran a la misión, así como las primeras pruebas de concepto que en torno a su desarrollo se han realizado con efectos de validación tecnológica.

2.1 Zonas de Cobertura

El método para calcular las zonas de cobertura se denomina algoritmo de Longley-Rice y se utiliza para el cálculo de zonas de cobertura de antenas transmisoras en sistemas de radiofrecuencia. El algoritmo calcula la pérdida para ondas electromagnéticas entre las coordenadas del transmisor y del receptor. El algoritmo considera las variaciones de elevación de terreno (perfil) y las características del suelo (cluster) [9]. La pérdida es calculada para una trayectoria entre la antena del transmisor y la antena del receptor a lo largo de un perfil de la sección transversal del terreno, figura 1.



Figura 1. Trayectoria para el seguimiento de un satélite en órbita.

Este método se toma como referencia ya que la situación en la que calcularemos las zonas de cobertura será mediante el cálculo del ángulo sólido sobre una superficie esférica, bajo un sistema de coordenadas azimut-elevación (polares) y diversas trayectorias. Tomando la propagación de las ondas electromagnéticas entre dos puntos de línea de vista, transmisor-receptor, alejados una distancia espacio-superficie terrestre y ver las pérdidas de potencia por las sobre y subcapas atmosféricas que hay entre estos puntos. Por tal circunstancia se vuelve relevante un sistema de seguimiento automatizado de un punto en el espacio con velocidades angulares grandes en ventanas de entre 5 y 15 minutos, eliminando efectos de ecos, rebotes o fenómenos de resonancia, es decir interferencias.

Así mismo, las estaciones de la red de radio aficionados que podrán registrar los pases y bajar los datos del LEO-TEPEU serán estaciones con este tipo de infraestructura y que puedan distribuir la información hacia los demás nodos. Para poder llevar a cabo esta tarea, hay que tener bien especificados los parámetros en la subcarga útil del pequeño satélite para las frecuencias y potencias que se emplearán.

3. Objetivos de la Misión

Los objetivos generales de la misión TEPEU-1 son los siguientes:

- Demostración tecnológica de las capacidades institucionales nacionales en el diseño e integración de misiones espaciales con fines científicos y de desarrollo tecnológico.
- Validación experimental de una misión espacial integrada a partir de elementos comerciales tipo COTS en el segmento espacio.

Dentro de los objetivos específicos de la misión, se pueden mencionar los siguientes:

- Desarrollo de una metodología propia para el desarrollo de sistemas espaciales basada en estándares de agencias espaciales internacionales y acorde con las capacidades institucionales en el área de desarrollo tecnológico espacial en México.
- Probar sistemas de instrumentación integrados a partir de componentes tipo COTS, particularmente microcontroladores y sensores multivariable.
- Diseñar, integrar y probar a bordo, como parte de la carga útil del satélite, un experimento basado en un repetidor que permita a la comunidad de radio aficionados en México, validar técnicas novedosas de recepción y distribución de datos.
- Desarrollar un esquema de sistema distribuido para el desarrollo del segmento terrestre para la recepción y transmisión de datos, basado en infraestructura de radio aficionado, así como medios para la distribución y almacenamiento de datos para su aprovechamiento en México y otras partes del mundo.

4. Conceptos Básicos de la Misión

En un marco general, la misión TEPEU-1 está siendo diseñada a partir de la metodología de gestión de proyectos espaciales propuesta por PROXIMA SPACE, la cual está basada en el desarrollo de documentos que engloban aspectos metodológicos utilizados por la Agencia Espacial Europea (ESA) y que, de manera general se describe en la figura 2 [10].

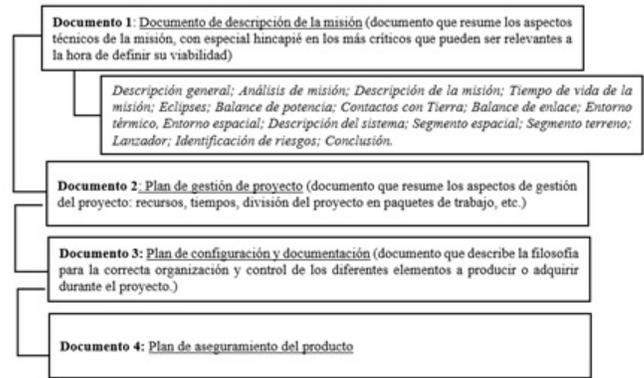


Figura 2. Estrategia de gestión de proyectos espaciales propuesta por PROXIMA SPACE, adoptada para el desarrollo de la misión TEPEU-1.

A partir de la documentación generada con base en la metodología de PROXIMA SPACE, la misión espacial TEPEU-1 se ha concebido a partir de dos segmentos operativos principales: segmento espacio y segmento tierra, de acuerdo con la Figura 3.

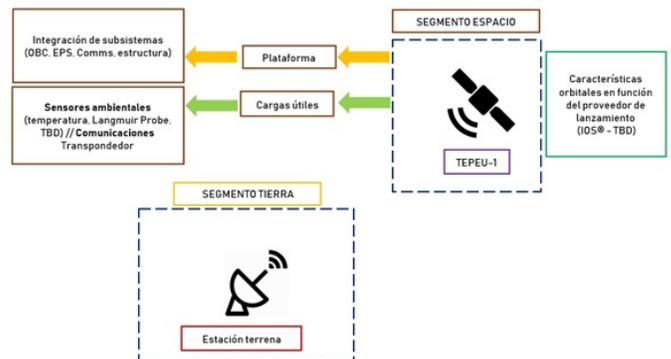


Figura 3. Concepto general de la misión TEPEU-1.

El segmento espacio estará integrado por un nanosatélite tipo cubesat de 1 unidad, orbitando la tierra en una órbita polar circular a 310km de altitud utilizando medios pasivos de control de altitud, el cual tendrá dos cargas útiles principales a bordo, ambas enfocadas a la validación y desarrollo tecnológico. Por un lado, una carga útil estará orientada al registro de algunas variables ambientales, tales como temperatura del aire y campo magnético a partir de sensores comerciales, utilizando técnicas novedosas para su obtención durante la órbita del satélite y que coadyuvarán al diseño de futuros experimentos que buscarán caracterizar el segmento medio de la ionósfera terrestre y estudiar su posible correlación con eventos geofísicos.

La segunda carga útil estará integrada a partir de un “transponder”, el cual permitirá validar esquemas de comunicación propuestos por la comunidad de radio aficionados de México para la recepción de datos satelitales, contribuyendo con ello a mejorar las técnicas para la recepción, almacenamiento y distribución de datos de satélites de órbita baja.



Figura 4. Esquema proyectado de la RALESAT y puntos geográficos de los radioaficionados interesados en participar en la misión TEPEU-1.

En lo que respecta al segmento tierra, este permitirá en una primera instancia, la descarga de los datos registrados en órbita por el TEPEU-1, representando por sí mismo, la oportunidad para realizar ensayos orientados al desarrollo de una red de estaciones terrenas basada en la infraestructura de radio aficionados participantes en el proyecto, figura 4, y que permitirá a futuro, impulsar y establecer las bases para el diseño de un segmento terrestre distribuido, así como de un módulo centralizado de almacenamiento y un esquema de distribución y control de tráfico de datos, cuyas capacidades se pudieran extender hacia otras misiones experimentales espaciales

integrado en un esquema denominado Red América Latina de Estaciones Amateur Satelitales (RALEASAT).

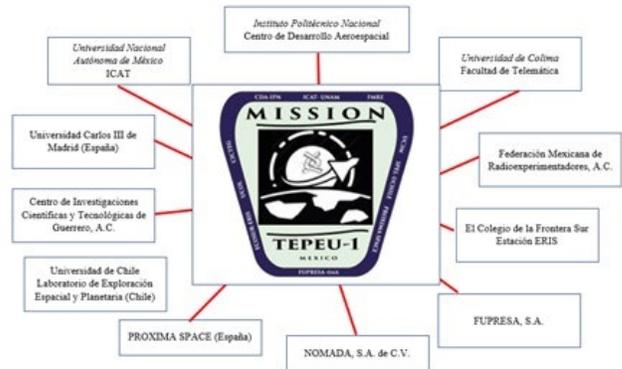


Figura 5. Instituciones participantes de la misión TEPEU-1.

Es importante señalar la participación de instituciones que en torno al diseño y desarrollo de la misión TEPEU-1 se ha detonado no solo en México, sino en otras instituciones internacionales interesadas en participar del proyecto, de acuerdo con la figura 5.

En la figura 6, se detallan los roles de trabajo realizados por cada institución participante en la misión espacial.

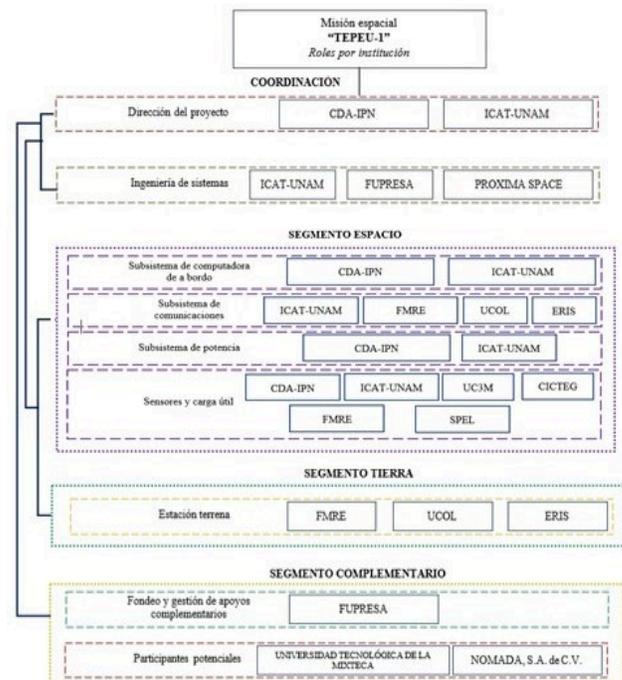


Figura 6. Roles por instituciones participantes en la misión TEPEU-1.

4. Segmento Espacio

El segmento espacio de la misión TEPEU-1 estará integrado por dos bloques principales: plataforma y carga útil. La plataforma estará basada en el bus comercial IOS Old Standard Cubesat de la empresa Inter orbital Systems®, mientras que el módulo de carga útil o payload, estará basado en tres módulos principales: módulo de adquisición de datos (DAQ), módulo de acondicionamiento y módulo de sensores y equipos experimentales, como se describe en la Figura 7, y en el que destaca la integración de un sensor de temperatura y un magnetómetro para la adquisición de datos del campo magnético terrestre [11].

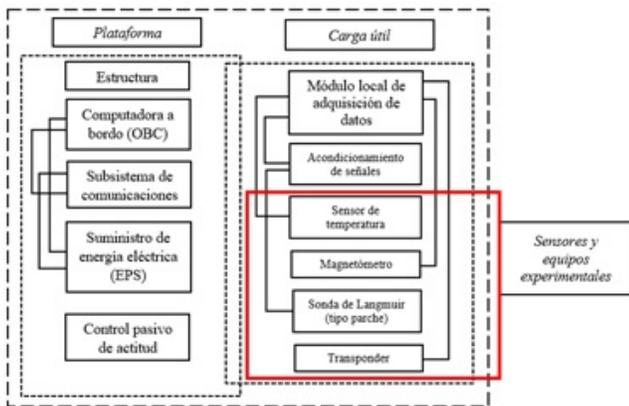


Figura 7. Esquema general de arquitectura para los dos bloques principales de TEPEU-1.

5. Segmento Terrestre

El segmento tierra contará con equipos de comunicación en el intervalo de frecuencias de los 435 a los 438MHz con incrementos de 5MHz, mientras que la señal de salida del TEPEU-1 tendrá una potencia estimada de 100mW a 500mW. Un esquema general, mostrado en la Figura 8, describe la arquitectura de la estación terrena para la misión TEPEU-1.

En el esquema de la Figura 8, destacan los elementos generales que debe incluir la estación terrena del proyecto TEPEU-1. Se requerirá de un equipo de cómputo para el seguimiento automatizado (azimut y elevación) de la misión, así como la corrección del efecto Doppler generado por las frecuencias de operación de la misión. Una alternativa será utilizar el programa SatPC32 para atender ambos requerimientos y, adicionalmente permitirá integrar con facilidad varios dispositivos para controlar el sistema de antenas. Con el

propósito de tener la estación automatizada, se agrega al SatPC32 una etapa de hardware intermedio que consiste en el equipo Fox Delta Tracker modelo ST2-USB [12] y [13], el cual tiene la ventaja de utilizar el protocolo de intercambio de información de los rotores Yaesu® modelo G-5500 a utilizar en el segmento tierra.

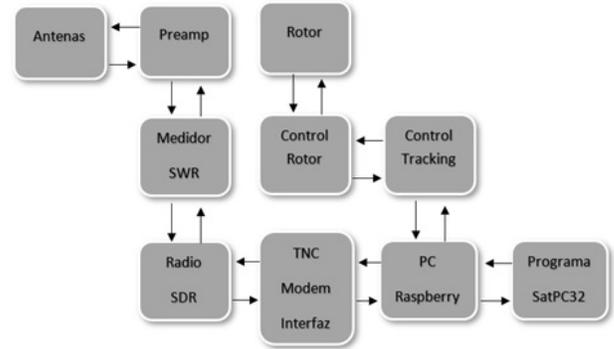


Figura 8. Arquitectura propuesta para la estación terrena para TEPEU-1.

Una vez configurado el SatPC32 en la estación terrena, será posible calcular las efemérides de la misión TEPEU-1 y enviar por conexión USB los valores de azimut y elevación al ST2-USB para que genere los movimientos del rotor Yaesu® G-5500, para que el sistema de antenas logre la recepción de la información enviada por el segmento espacio, desde el inicio de la órbita hasta el final de esta, sin errores por el seguimiento del TEPEU-1. Simultáneamente, el programa SatPC32 tiene la capacidad de conexión al equipo receptor para hacer los ajustes de la frecuencia de bajada debido al efecto Doppler. Con esta configuración en el SatPC32, y una vez seleccionado el TEPEU-1 para su seguimiento, la estación terrena propuesta tendrá la capacidad de hacer todo el seguimiento y ajustes para recibir toda la información que genere el segmento espacio, sin necesidad de intervención humana, incluso en las órbitas nocturnas o fines de semana.

La calidad de las antenas instaladas en la estación es de vital importancia, ya que permitirán tener una mejor calidad de las señales recibidas, independientemente de la exactitud de seguimiento que ya proporciona el SatPC32 y sus módulos de apoyo descritos. Con base en la experiencia técnica, se sugiere contar con antenas direccionales de polarización circular que tengan al menos 15 elementos en la polarización horizontal y 15 en la vertical, una propuesta ideal es el modelo 436CP30 de la marca M2 que ofrece una ganancia de 15.50dBi. Es

conveniente apoyar al sistema de antenas con preamplificadores de bajada instalados directamente en las antenas [14], sin embargo, al utilizar cable coaxial de una longitud no mayor a 15m de largo y que sean de baja pérdida, es posible omitir el uso de preamplificadores de recepción. Por lo tanto, la línea coaxial podría ser integrada con el LMR-400 como mínimo, o bien el LMR-600 para garantizar una baja pérdida en la línea de transmisión [15].

Tomando en cuenta estas consideraciones, la estación del segmento tierra ofrecerá la posibilidad operar de manera totalmente automatizada y con la capacidad de recibir cualquier medición del segmento espacio del TEPEU-1 o futuras misiones espaciales. El objetivo será contar con al menos una estación de este tipo, una en Chetumal, la segunda en la UNAM y la tercera en la UCOL. Es importante mencionar que en el segmento tierra, se cuenta con el apoyo de la FMRE y de 24 radio aficionados participantes ubicados en 13 estados de la república mexicana que han mostrado el interés de colaborar con estaciones terrenas con configuraciones que van desde estaciones portátiles, móvil, fija, fija automatiza y remota operada vía internet, lo cual permite asegurar la recepción de la misión TEPEU-1 en todo México.

Los datos provenientes de los sensores a bordo de TEPEU-1, serán almacenados y distribuidos a universidades y centros de investigación que requieran dicha información, utilizando una plataforma de almacenamiento distribuido en la nube denominada PADN.

Como se puede observar en la figura 9, una vez que los datos provenientes del satélite TEPEU-1 han sido capturados por las estaciones de recepción en tierra, estos deberán ser enviados a la PADN. La PADN se encuentra integrada por dos elementos principales; el cliente PADN y la misma PADN.



Figura 9. Plataforma de Almacenamiento Distribuido en la Nube para la misión TEPEU-1.

Cada una de las estaciones terrenas de recepción ubicadas ya sea en México o en otros puntos del planeta, deberá contar con un cliente PADN autorizado para la

distribución de los datos adquiridos por el satélite en órbita. Adicionalmente, para garantizar el flujo seguro de la información entre las estaciones de recepción y el sistema de almacenamiento en la nube, cada cliente necesitará contar con un “token” único de acceso a la PADN.

Por su parte, el “core” de la PADN, estará compuesto por un conjunto de servidores de almacenamiento (tantos como se desee o requiera), cuya tarea será almacenar la información enviada por el coordinador general. El coordinador general, será el encargado de validar las credenciales (token) de los clientes, una vez hecho esto, procesará, dividirá y almacenará los datos a lo largo de los nodos de almacenamiento (SS01, SS02, SS03), garantizando así la redundancia, seguridad y disponibilidad de la información para los usuarios finales. Con el objetivo de evitar generar un cuello de botella del lado del coordinador, se ha propuesto el uso de un sistema de balance de carga elástico, esto es, a mayor número de peticiones por parte de los clientes, más recursos por parte del coordinador son puestos a disposición.

Es importante señalar que los nodos de almacenamiento no serán nodos redundantes, ya que estos no contienen copias exactas unos de otros, en su lugar, se usará un esquema de partición de datos, lo cual permitirá distribuir diversas secciones de los archivos (*slices*) a lo largo de los nodos de almacenamiento, por lo tanto, solo serán necesarios un subconjunto de estos nodos para recuperar la información original aumentando así la robustez del PADN [16].

6. Pruebas de concepto y primeros resultados

Desde 2016 a la fecha, se han realizado pruebas de concepto a bordo de misiones suborbitales basadas en globos estratosféricos y en parapente, gracias a las cuales se han podido probar y evaluar diversos esquemas de instrumentación basados en componentes de grado comercial, tales como microcontroladores, sensores, transceptores, módulos de comunicación, baterías, etc., los cuales en un futuro podrán ser considerados para su inclusión como parte de la arquitectura final de subsistemas del nanosatélite TEPEU-1.

En el caso de las misiones suborbitales en globos estratosféricos, en colaboración con la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se han realizado dos

experimentos a bordo de globos de gran altura. El primero de ellos en noviembre de 2016 y el segundo en abril de 2018, en los cuales se alcanzaron alturas de 35 y 33km, respectivamente, Figura 10.

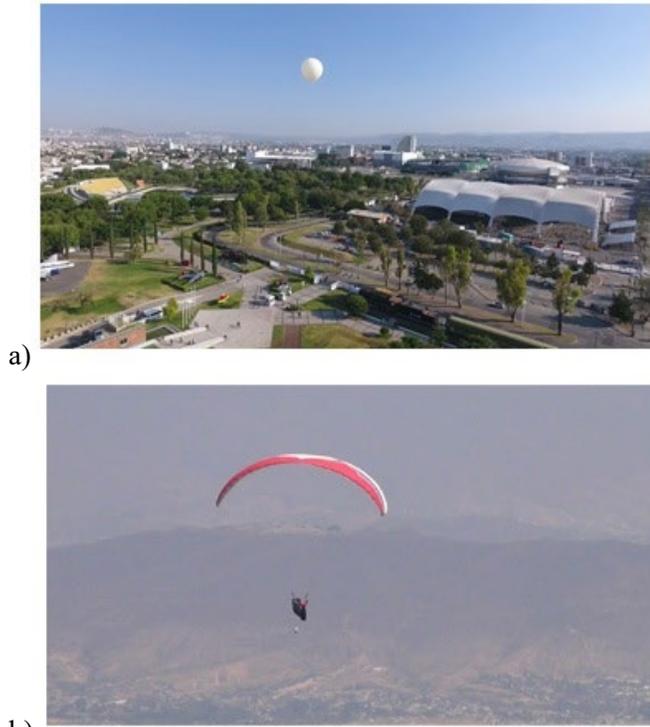


Figura 10. Pruebas de concepto a bordo de globos estratosféricos y parapente. a) Lanzamiento de la plataforma CSM-2018-A desde el parque Explora de León, Gto, en 2018. b) Módulo PEGASUS-4 a bordo de un parapente en sobrevuelo en la zona de los valles centrales de Oaxaca en abril de 2019.

A partir de estos vuelos experimentales en globo, realizados en León, Guanajuato, figura 11, se ha podido validar en ambiente de espacio cercano y bajo condiciones de aceleración, que han alcanzado en promedio las 3g y temperaturas cercanas a los $-60[^\circ\text{C}]$, figura 12, el adecuado desempeño de una computadora de vuelo basada en el microcontrolador comercial PIC32MX340F512H, para el control lógico a bordo, así como para el registro y almacenamiento en una memoria SD de datos de sensores de temperatura LM135, RTDs, sensores de navegación inercial integrados en una unidad IMU de 9 grados de libertad y un magnetómetro digital MAG3110, de tres ejes, de potencia y dimensiones reducidas.



Figura 11. Fotografía de la estratósfera sobre México.

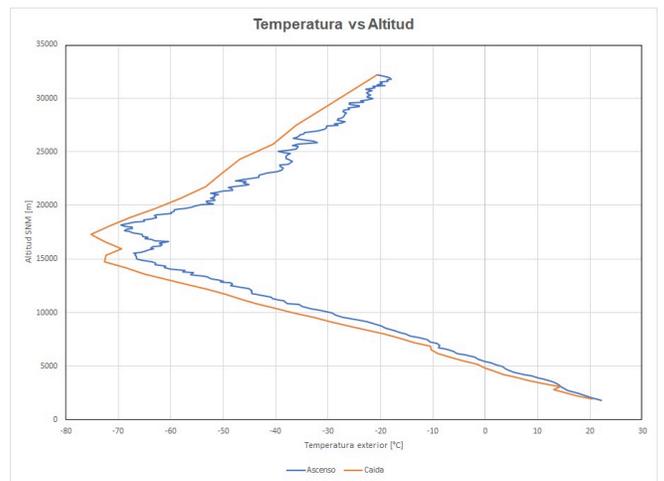


Figura 12. Registro de temperaturas a bordo de la misión CSM-2018-A.

Mientras que, en el caso de los vuelos en parapente, realizados en el Estado de México y Oaxaca, además de la instrumentación para la adquisición de datos y sensores antes descritos, se ha probado exitosamente un esquema de comunicación para la transmisión de datos de telemetría entre el módulo en vuelo en la banda de 2.4 GHz hacia una estación terrena portátil.

En lo que respecta a los primeros prototipos de instrumentación, en paralelo con las pruebas de concepto a bordo de vuelos suborbitales a la estratósfera, se ha diseñado e integrado un modelo de ingeniería para computadora de vuelo y de carga útil denominado SADM. El sistema SADM, o Sistema de Adquisición de Datos Meteorológicos, inicialmente fue concebido como un sistema básico para adquisición y almacenamiento de datos obtenidos de experimentos orientados al registro de

variables ambientales, tales como temperatura del aire, presión barométrica, humedad y otras, ha sido la base para el desarrollo de un primer sistema integrado a partir de un microcontrolador de propósito general basado en un microcontrolador de 32 bits PIC32MX340F512.

El sistema SADM se ha complementado con una segunda tarjeta electrónica de expansión, donde se encuentran acondicionadores de señales que permiten la integración de sensores y otros equipos de salida analógica que requieran ser conectados con SADM, evolucionando a un primer sistema de cómputo a bordo base, y que ha sido probado en las tres misiones suborbitales a la estratósfera, pudiendo validar exitosamente su operación durante los vuelos en condiciones de espacio cercano, y que permitirá sentar las bases para el planteamiento de un diseño de computadora a bordo para aplicación en la misión espacial TEPEU-1, como se muestra en la figura 13.



Figura 13. Sistema SADM y tarjeta de expansión para sensores y equipos periféricos.

Es importante señalar que la tarjeta de expansión del SADM, está diseñada como una tarjeta para la integración de nuevos sensores, cuenta además con terminales para entradas y salidas digitales, así como entradas analógicas y puertos de comunicaciones para periféricos como UART, SPI, I2C y de propósito general. Así mismo, cuenta con puerto para tarjeta de memoria

SD para el almacenamiento de datos a bordo. El diseño de las tarjetas electrónicas está basado y cumple con el factor de forma y características indicadas en el estándar PC-104, que es el mismo que se utiliza en el estándar Cubesat para el diseño de hardware para satélites pequeños.

7. Conclusiones

TEPEU-1 es una misión espacial científica mexicana para fines científicos y de validación tecnológica, la cual marca la pauta para la colaboración multidisciplinaria e interinstitucional en México y otras partes del mundo, representando una iniciativa para impulsar el desarrollo tecnológico nacional en materia espacial, la cual además de los sectores académicos, involucra la participación de la iniciativa privada, sectores gubernamentales estatales, así como asociaciones civiles.

La misión TEPEU-1 representa una invaluable oportunidad para poder establecer vínculos de colaboración con segmentos importantes de la sociedad (latina), tal como la comunidad de radio aficionados, los cuales representan un nicho de oportunidad de cooperación invaluable, no solo por su expertise técnico en la recepción de datos, sino también para el desarrollo de infraestructura destinada a la recepción de datos en varios puntos de la república mexicana, ampliando de manera sustantiva el área de cobertura de datos en tierra, lo cual, conforma, junto con otros elementos, el éxito de una misión espacial. TEPEU-1 no representa solo la primera etapa de un proyecto satelital mexicano con fines científicos y tecnológicos, sino también para la comunidad de radio aficionados es la puerta que se abre para que en un futuro próximo se pueda contar con un satélite propio que incluya equipos de retransmisión no solo de datos, sino también de voz. La incursión del radio aficionado en el proyecto TEPEU-1, es una oportunidad de poder refrendar su compromiso con la comunidad científica en el sector aeroespacial, extendiendo su alcance hacia la búsqueda de atender a la sociedad mexicana en casos de emergencia y otros escenarios que requieran el uso de las comunicaciones para fines benéficos en apoyo a la sociedad.

Para la infinidad de tareas a futuro y perspectivas del proyecto cuando se tengan las etapas de telemetría y telecomunicaciones, se está desarrollando un módulo de cifrado de datos que nos pueda dar servicios de seguridad en los protocolos de comunicación. Este módulo se

integrará mediante la implantación de mecanismos de seguridad en sistemas de lógica programable. El módulo puede extenderse para el intercambio de información entre los nodos de la red de radio aficionados en Tierra.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la colaboración de todos los integrantes, académicos y estudiantes del grupo académico TEPEU por sus contribuciones a la organización de este artículo y al material aquí presentado, en especial al Mtro. Octavio Plaisant Zendejas, divulgador del CDA-IPN. Finalmente, se reconoce y agradece el apoyo de la empresa Fuente Productiva Renovable, S.A. (FUPRESA) por su gran apoyo en la gestión de las subvenciones necesarias para el arranque de los trabajos de la misión TEPEU-1.

REFERENCIAS

- [1] Sosa Pedroza, J. “Las comunicaciones espaciales y la agencia espacial mexicana”. Academia de Ingeniería. Comisión de Comunicaciones y electrónica. Coloquio de especialidades 2009. Octubre, 2009.
- [2] Nava Amezcua, Rodrigo. “Historia de la industria aeroespacial en México y su vínculo con la aeronáutica”. Revista de divulgación científica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://cienciauanl.uanl.mx/?p=6263>. Último ingreso 25 de agosto de 2019.
- [3] Montaña Barbosa, Alejandro, (2015). La trayectoria de México en la exploración espacial. Ciencia MX Noticias. <http://ienciamx.com/index.php/ciencia/universo/4714-historia-de-la-astronautica-en-mexico-del-sputnik-i-a-la-agencia-espacial-mexicana>. Último ingreso 19 de agosto de 2019.
- [4] Rivera Parga, José R. “La exploración espacial: una oportunidad para incrementar el poder nacional del Estado mexicano”. Secretaria de Marina. México, agosto, 2017.
- [5] Agencia Espacial Brasileña, (2019, Dic), [Online]. https://es.wikipedia.org/wiki/Agencia_Espacial_Brasile%C3%B1a, [Ene. 15, 2020]
- [6] La estrella de Panamá, (2020, Ene), [Online]. <https://www.laestrella.com.pa/cafe-estrella/ciencia/180816/cree-nasa-panama-experta-agencia>, [Ene. 15, 2020]
- [7] Convergencia Latina, (2019, Sep), [Online]. http://www.convergencialatina.com/Nota-Desarrollo/306083-3-53-Mapa_de_Satelites_en_America_latina_2019, [Ene. 15, 2020]
- [8] Etzkowitz, H. “The triple Helix of University-Industry-Government Implications for policy and evaluation”. Science Policy Institute, SISTER, Estocolmo, 2002.
- [9] L. Benoso, A. Padrón-Godínez, A. Herrera, R. Prieto, “Modelo para predecir áreas de cobertura en sistemas de Radiofrecuencia”. XIX Congreso de Instrumentación, Pachuca, Hgo. México, 2004.
- [10] European Space Agency. Space Project Management. Project planning and implementation. ECSS-M-30B. Draft 14. July, 2006.
- [11] M.A. Diaz, J.C. Zagal, C. Falcon, M. Stepanova, J.A. Valdivia, M. Martinez-Ledesma, J. Diaz-Peña, F.R. Jaramillo, N. Romanova, E. Pacheco, M. Milla, M. Orchard, J. Silva, F.P. Mena, “New opportunities offered by Cubesats for space research in Latin America: The SUCHAI project case”, Advances in Space Research, Volume 58, Issue 10, 15 November 2016, Pages 2134-2147, ISSN 0273-1177.
- [12] FoxDelta – Satellite Antenna Tracking Interface ST2-0417 USB. August 18, 2017. <https://www.foxdelta.com/products/ST2-0417/st2-usb-do6dad.pdf>. Última consulta: 25 de agosto de 2019.
- [13] Setting up auto-tracking with SDR-Console and the FoxDelta ST2-USB Interface. <https://www.foxdelta.com/products/ST2-0417/ST2-USB%20and%20SDR-Console-V1.0.pdf>. Última consulta: 20 de Agosto de 2019.
- [14] Quintero, C. A. N., & Peralta, J. D. M. (2012). Montaje e implementación de una estación terrena satelital para el seguimiento de satélites de órbita baja.
- [15] J. Solana (2000), Ganancias y pérdidas en antenas. [Online]. <https://www.jsolana.com.mx/xel1yjs/>, [Jul. 18, 2019].
- [16] Gonzalez-Compean, J. L., Sosa-Sosa, V. J., Diaz-Perez, A., Carretero, J., & Marcelin-Jimenez, R. (2018). FedIDS: a federated cloud storage architecture and satellite image delivery service for building dependable geospatial platforms. International journal of digital earth, 11(7), 730-751.

Evaluación del consumo de energía eléctrica de acuerdo a la arquitectura bioclimática mediante el Modelo ASHRAE y Gauss T-Student

Evaluation of electricity consumption according to the bioclimatic architecture using the ASHRAE Model and Gauss T-Student

Cristian Cristóbal Cuji Cuji^{1*}, Henry David Sisa¹

¹ Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: ccuji@ups.edu.ec

RESUMEN— La presente investigación evalúa los resultados del consumo de energía eléctrica en ambientes normales con el fin de alcanzar condiciones óptimas de confort, aprovechando las condiciones bioclimáticas y aire acondicionado, proponiendo el modelo Gauss T-Student como método para estimar la frecuencia de trabajo de aire acondicionado, con condiciones de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento desde el 8 de agosto del 2018 hasta el 8 de agosto del 2019 de la localidad de Guayaquil-Ecuador. La idea clave es combinar el conocimiento previo del modelo The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), como método para el análisis de arquitectura bioclimática por ganancias de energía térmicas, para estimar la temperatura de sensación interna y controlarla por medio del modelo probabilístico. Los resultados del consumo eléctrico son aplicables a simulación del sector comercial para satisfacer las necesidades de confort.

Palabras clave— *Arquitectura bioclimática, confort, consumo eléctrico, Gauss, T-Student, ingeniería eléctrica, termodinámica.*

ABSTRACT— The present investigation evaluates the results of the consumption of electric power in normal environments in order to reach optimal comfort conditions, taking advantage of bioclimatic conditions and air conditioning, proposing the Gauss-T-Student model as a method to estimate the air working frequency conditioning, with conditions of temperature, relative humidity and wind speed from August 8, 2018 to August 8, 2019 in the town of Guayaquil-Ecuador. The key idea is to combine prior knowledge of The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE) model, as a method for the analysis of bioclimatic architecture by thermal energy gains, to estimate the temperature of internal sensation and control it by middle of the probabilistic model. The results of electricity consumption are applicable to simulation of the commercial sector to meet the needs of comfort.

Keywords— *Bioclimatic architecture, comfort, power consumption, Gauss, T-Student, electrical engineering, thermodynamics.*

1. Introducción

La presente investigación se estudia el consumo de energía eléctrica de acuerdo con la arquitectura bioclimática de la región, además esta investigación es parte de la unidad de titulación y se presentan resultados a fondo, donde se propone el modelo Gauss T-Student, para sistemas óptimos de confort en función a la arquitectura bioclimática y el uso de acondicionadores de aire dentro del sectores comerciales [1-4]. Los métodos probabilísticos proporcionan información real sobre el

comportamiento de un sistema y manejan gran cantidad de datos, como una forma de manejar incertidumbres [5], [6], además se aplica en distribuciones de variables continuas como temperatura y tiempo. Otros autores proponen como métodos para estimar el consumo de energía eléctrica por efecto de datos climáticos como cuadratura de Gauss, regresión lineal, regresión polinomial, probabilidad Kullback-Leibler, calculo integral bajo la curva y mecanismos de predicted Mean Vote para determinar el aumento de la demanda eléctrica para satisfacer las necesidades de confort [7-9]. Para

Citación: C. Cuji y H. Sisa, "Evaluación del consumo de energía eléctrica de acuerdo a la arquitectura bioclimática mediante el Modelo ASHRAE y Gauss T-Student", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 27 de febrero de 2020. **Recibido con correcciones:** 17 de junio de 2020. **Aceptado:** 17 de junio de 2020.

DOI.

Copyright: 2021 C. Cuji y H. Sisa. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

encontrar un sistema óptimo de confort, con la finalidad de satisfacer las necesidades ambientales normales del sector comercial, los sistemas de confort valoran la capacidad de mantener las condiciones ambientales dentro de los edificios, adecuando el ambiente para el confort de los usuarios [10-12]. En la investigación el inconfort representa temperaturas de sensación térmica (TST) iguales o mayores a 26°C o menores o iguales a 22°C ; la temperatura de sensación térmica es un incremento de temperatura interna por ganancias térmicas del exterior al interior del edificio [13-17], y se calcula mediante el modelo The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, que también calcula la capacidad de aire acondicionado se requiera para eliminar la temperatura de sensación térmica interna [18], [19]. El uso de aire acondicionado

representa el 40% consumo energético [20], [21], por esto se emplea estos métodos sobre datos estadísticos, como objetivo determinar el efecto del consumo de energía eléctrica en sistemas óptimos de confort en función a la arquitectura bioclimática y aire acondicionado dentro del sector comercial, en un entorno simulado. reduciendo las facturas de energía eléctrica [22-24]. El método The American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, establece la capacidad de aire acondicionado por medio de ganancias térmicas y conservación de la energía, aprovechando las condiciones bioclimáticas del exterior [13], [25-28]. Para este estudio, la compensación con aire acondicionado determina la cantidad y capacidad para obtener confort y evaluar el consumo de energía eléctrica [29-32], [33].

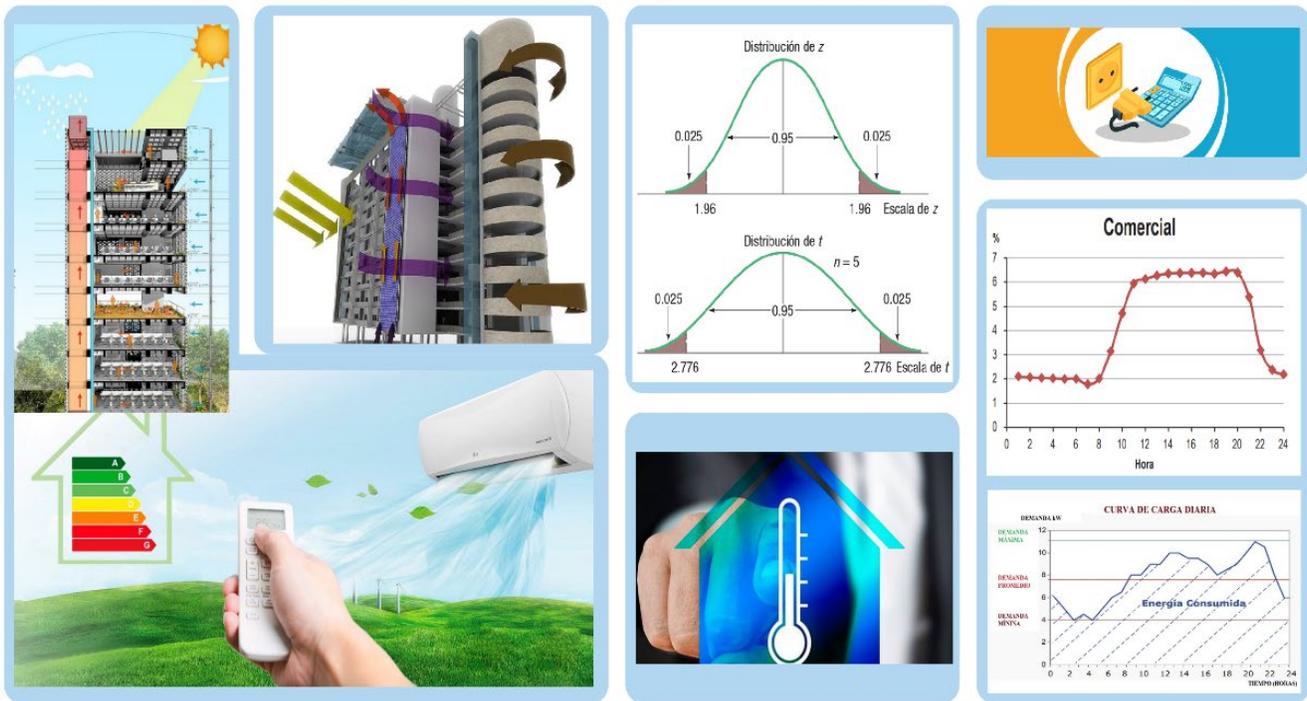


Figura 1. Sistema óptimo de confort bajo arquitectura bioclimática y aire acondicionado.

2. Modelamiento de estimación de consumo eléctrico del sistema

El empleo de aire acondicionado por sí solo, genera un consumo de energía eléctrica elevado, para disminuirlo se requiere de las características bioclimáticas, aprovechando todas las condiciones naturales exteriores, la posición sobre el nivel del mar

(msnm), latitud y longitud, de ubicación de la edificación [11], [25], [26].

También se considera los materiales de construcción (paredes, ventanas, puertas), materiales de aislamiento y ductos [31], [34-37]. Los datos de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento se toman de la base de datos del Instituto Nacional Meteorología e Hidrología del Ecuador (INAMHI). Toda esta información analiza

en un entorno simulado en software Matlab. Para el análisis se presentan en este documento un escenario, que corresponden a la ciudad y se detalla a continuación:

El escenario se encuentra ubicado en la ciudad de Guayaquil, latitud -2.219213, longitud -79.888479, sector Naval Sur, altitud 4.02msnm.

El análisis del consumo de energía eléctrica del escenario se realiza de la siguiente manera:

- Modelo Matemático ASHRAE
- Gauss -T-Student.



Figura 2. Análisis de Planta, aprovechamiento bioclimático.

2.1 Modelo Matemático ASHRAE

A partir de la adquisición de datos de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento, de acuerdo con la posición de la localidad se obtienen ganancias térmicas de exterior a interior de edificación. Esto se consigue por medio de análisis termodinámicos de conservación de energía. Es por esto por lo que se propone como método de resolución el modelo ASHRAE, para calcular todos los parámetros que involucran el aprovechamiento de arquitectura bioclimática existentes. La arquitectura bioclimática está ligada a la construcción ecológica y define parámetros de aislamiento naturales para satisfacer la necesidad de confort y reducir el uso de la energía convencional. Los parámetros como, aislamiento de paredes, techos y pisos; cristales como ventanas y lucernarios; ventilación por velocidad del viento natural; pueden definir las ganancias de calor al interior del edificio [11], [25], [26]. La investigación propone el proceso de resolución de la siguiente manera del modelo ASHRAE y se describe en la Tabla 1.:

Se debe conocer la ubicación de localidad del edificio, los datos bioclimáticos del exterior, para proceder a calcular diferentes incógnitas de confort ambiental, como por ejemplo presión atmosférica, humedad de saturación, punto de rocío y entalpia. A partir de la variable de entalpia se puede dar a conocer la temperatura interna en condiciones iniciales sin ganancia de calor [11], [25], [26].

Se debe conocer las características de construcción del edificio, espesor y área de las paredes, techos, y pisos; espesor y área de los cristales, espesor y área de ductos, si existiesen [11], [25], [26].

Tabla 1. Algoritmo ASHRAE para determinar el comportamiento bioclimático.

| | |
|---------|---|
| Paso 1 | Adquisición de datos: temperatura, humedad relativa y velocidad de viento. Msnm, latitud (GMS). |
| Paso 2 | Comportamiento termodinámico: Gráfico Psicométrico Presión Atmosférica, Temperatura absoluta, Presión de saturación, Punto de rocío, Humedad de saturación, Entalpia. |
| Paso 3 | Ganancias térmicas edificación. |
| Paso 4 | Ganancias térmicas por conducción a través de la estructura (QST). |
| Paso 5 | Ganancias térmicas por conducción interna (QIS). |
| Paso 6 | Ganancia térmica por radiación solar cristales (QV). |
| Paso 7 | Ganancia térmica por usuarios (QP). |
| Paso 8 | Ganancia térmica por iluminación (QA). |
| Paso 9 | Ganancia térmica por equipos (QEq). |
| Paso 10 | Ganancia térmica por filtración de aire (QIF). |
| Paso 11 | Cálculo Total de ganancias térmicas. $(QTCA = ST + QV + QIS + QP + QA + QEq + QIF = BTU/H)$. Cantidad de equipos aire acondicionado por capacidad de aire acondicionado ($CapAA$). |
| Paso 12 | Si $QTCA > CapAA$ $Nequipos = \frac{QTAC}{CapAA}$ Fin si |

Las ganancias térmicas por condición a través de exterior a interior e interior a interior, se involucran variables como diferencia de temperatura del exterior-interior, espesor y área de cada uno de los elementos de construcción. Las ganancias térmicas por radiación involucran a todos los elementos de cristal que posea el

edificio e iluminarias. Las ganancias por convección se obtienen a partir de la transformación de energía por cada elemento como iluminación, aparatos eléctricos u otros y personas. La ganancia térmica por infiltración de aire se obtiene a partir de la velocidad del viento que rodea al edificio, además es muy pequeña y su almacenamiento no existe al interior, pero si se involucra por términos de renovación del viento.

La sumatoria de todas las ganancias térmicas, dan lugar a la obtención de temperatura de sensación térmica, la que define si el interior de una habitación se encuentra en comodidad, si existe excedentes, es necesario la instalación de equipos que acondicionen el confort. Además de conocer las ganancias de calor totales internas, el modelo también es útil para la determinación de la capacidad de aire acondicionado.

2.2 Modelo Gauss, T-Student

Las aplicaciones para variables inciertas son base de datos que administran objetos en movimiento donde no es posible determinar las posiciones exactas de los objetivos en cada punto del tiempo. A partir de los datos experimentales de temperatura se predicen los coeficientes de tiempo y con qué frecuencia pueda ocurrir el evento. Se puede suponer una función de distribución de densidad que se puede usar para aproximar el valor de tiempo exacto observado [5], [6], [9], [38]. La función de densidad de probabilidad gaussiano con respecto a un valor medio y una desviación estándar se define con la ecuación (1) para modelar la incertidumbre a partir de la variación de temperatura.

En los sistemas de energía, la confiabilidad juega un papel importante, es por esto que estimar el correcto de tiempo aplicado de los equipos de aire acondicionado, se verá como resultado el aproximado consumo eléctrico bajo la aplicación de estos equipos con respecto al tiempo [39], [40].

$$FT(T) = \frac{e^{-\frac{(T-uT)^2}{2*SD^2}}}{SD*\sqrt{2*PI}} \quad (1)$$

Dónde:

- FT(T) Función de densidad de probabilidad gaussiana temperatura, $T \in R$.
- T Muestras aleatorias Temperatura [°C].
- uT Valor de temperatura esperado [°C].
- SD Desviación estándar de temperaturas.

Dónde:

$$uT = \frac{\sum_{i=0}^n T_i}{n} \quad (2)$$

Está comprobado que la distribución de probabilidad de la temperatura está sujeta a una distribución de densidad normal de acuerdo con la ecuación (1), si cumple:

$$\sum_{i=0}^n FT(T_i) = 1 \quad (3)$$

Cuanto sea mayor el periodo de observación mayor será la probabilidad. Sin embargo, la variación de la variable temperatura con respecto al tiempo es propensa a cambios significativos. De acuerdo con un pronóstico del tiempo, por cada hora del día corresponderá a un cambio de temperatura, considerando que ciertas horas del día puedan permanecer constantes. Es por esto que propone analizar mediante la combinación de probabilidad de densidad T-Student para el cálculo del tiempo con el diseño de muestras aleatorias más pequeñas[7], [38].

$$ZT = \frac{T_{min} - uT}{SD} \quad (4)$$

Dónde:

- ZT Función gaussiana estandarizada.
- T_{min} Muestras mínima Temperatura [°C].
- uT Valor de temperatura esperado [°C].
- SD Desviación estándar de temperaturas.

La ecuación (4), describe la función Z gaussiana estandarizada, con respecto al comportamiento de las muestras de temperatura, los resultados de esta ecuación dan paso al estudio de la probabilidad de fracaso que exista en una distribución. Es decir, la probabilidad de ZT, corresponden a los valores que no son esperados o

que no se consideran para la investigación. Por otro lado, se conoce:

$$P(ZT) = P(F) \quad (5)$$

$$P(E) = 1 - 2P(F) \quad (6)$$

Dónde:

P(F) Probabilidad de fracaso en ZT.

P(E) Probabilidad de éxito

La ecuación (6), describe la cantidad de muestras están contenidas por la probabilidad de éxito. Conociendo el tamaño de la muestra de temperaturas, y la probabilidad de éxito, se puede estimar el tiempo de que ocurra el evento de temperaturas [5]–[7], si se encuentran dentro del mismo intervalo, se obtiene con certeza la cantidad de tiempo dentro de una región de aceptación. Esta región de aceptación viene determinada por valores extremos de confianza, que corresponden a valores límites dados por:

$$txi, txs = ut \pm \frac{Dt \cdot SDt}{\sqrt{nt}} \quad (7)$$

Dónde:

txi, txs Tiempo medio requerido [h].
 ut Media muestral del tiempo [h].
 nt Cantidad de muestras con respecto al tiempo
 SDt Desviación estándar T-Student del tiempo [h].
 Dt Distribución T-Student

A partir de la ecuación (7), los tiempos, txi-txt, corresponden al valor inferior y superior, por lo tanto, la diferencia entre estas dos variables se obtiene la durabilidad del tiempo de trabajo muestral:

$$E(t) = txi - txs \quad (8)$$

Dónde

E(t) Durabilidad del tiempo trabajado muestrales [h].
 txi Tiempo de nivel de confianza inferior [h].
 txs Tiempo de nivel de confianza superior [h].

2.3 Formulación del Problema

Para la formulación del problema se tiene como algoritmo matemático el estudio del consumo de energía eléctrica en sectores comerciales de acuerdo con la arquitectura bioclimática para alcanzar zonas óptimas de confort. La estimación de consumo de energía eléctrica está asociada con la compensación de aire acondicionado y de acuerdo con la arquitectura bioclimática para alcanzar zonas óptimas de confort.

El problema está conformado por dos funciones objetivo, estimar el consumo y satisfacer las necesidades de confort por medio de condiciones óptimas de confort de arquitectura bioclimática y consumo eléctrico en un entorno simulado; además, el problema se encuentra bajo ciertas restricciones: límites de temperatura (exterior e interior), humedad, velocidad del viento, temperatura de sensación térmica, límites arquitectónicos del edificio, límites por temperatura de confort, límites por tiempo de trabajo y ganancias térmicas, todas estas restricciones analizadas por modelo AHSRAE.

Los límites de temperatura (exterior e interior) se consideran entre rango de temperatura mínima y máxima cada 24 horas, los límites de temperatura de confort se encuentran en el rango de 22-25°C, el rango de humedad se considera entre 40-70%; los límites de TST están relacionados con los límites de tiempo de trabajo en horas, por último, los límites arquitectónicos del edificio se representan por la ubicación (msnm, latitud, longitud) y características constructivas.

2.3.1 Cálculo de consumo eléctrico

Mediante las restricciones del problema y las funciones objetivo, anteriormente descritas en los modelos ASHRAE, Gauss T-Student, el modelo matemático para la evaluación del consumo eléctrico en sectores comerciales de acuerdo a la arquitectura bioclimática para alcanzar zonas óptimas de confort está determinado por:

$$TST = \frac{QTCA}{kA \cdot Q_{caudal}} + (TK - 273.15) \quad (9)$$

$$TST = \frac{22377406,09kJ}{\frac{1.012kJ}{kg^{\circ}K} \cdot 3624889,144_{caudal}} \dots \quad (10)$$

$$\dots + (286,71^{\circ}K - 273.15^{\circ}K)$$

$$TST = 19.67^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

$$kWCal = \frac{0.2929 \cdot QTCA}{1000} \quad (12)$$

$$DTF = \frac{TST - Tr}{TST - TC} \quad (13)$$

$$kWPF = \frac{kWCal}{DT} \quad (14)$$

$$kWPE = \frac{kWPF}{(EER \text{ o } COP)} \quad (15)$$

$$kWPE = \frac{kWPF}{(SEER \text{ o } SCOP)} \quad (16)$$

Por ejemplo, tenemos temperatura exterior 16°C, 15 km/h de velocidad de viento y 38% de humedad a las 17 horas. Se obtiene como resultado 19.67°C de TST, aplicando la ecuación (9), obtenidas de ganancias térmicas. A partir del cálculo de TST se puede calcular la cantidad de energía eléctrica se necesita para aumentar o disminuir la temperatura para alcanzar zonas óptimas de confort.

Dónde:

| | |
|--------------|--|
| TST | Temperatura sensación térmica [°C] |
| QTCA | Ganancia total térmica J/h |
| Q_caudal | Cantidad de fluido [m³/h] |
| kA | Calor específico del aire J/kg°C |
| TK | Temperatura interna [°K] |
| kWCal | Conversión BTU/h a Kw caloríficos. |
| DTF | Diferencia temperatura acondicionar [°C]. |
| Tr | Temperatura interior [°C]. |
| TC | Temperatura Confort [°C]. |
| kWPF | Potencia Calorífica consumida [kWcal]. |
| kWPE | Potencia eléctrica consumida por eficiencia energética [kW]. |
| EER COP | Conversión eficiencia de potencia calorífica a potencia eléctrica. |
| SEER SCOP | Conversión eficiencia energética aire acondicionado. |

2.3.2 Proceso de resolución

Los resultados, se analiza con el modelo Gauss T-Student, la distribución de TST con respecto a la distribución del tiempo dentro del mismo espacio muestra. Se maneja el software MATLAB, el cual, mediante la incorporación de datos resuelve este modelo de optimización, computando, para el efecto, lo que se conoce como la evaluación del consumo eléctrico en sectores comerciales de acuerdo con la arquitectura bioclimática para alcanzar zonas óptimas de confort.

Tabla 2. Algoritmo para la evaluación del consumo eléctrico en sectores comerciales de acuerdo con la arquitectura bioclimática para alcanzar zonas óptimas de confort.

| | |
|--------|--|
| Paso 1 | Adquisición de los datos de temperatura, humedad relativa y velocidad de viento. |
| Paso 2 | Ganancias Térmicas ASHRAE. |
| Paso 3 | Determinación de la TST por hora. |
| Paso 4 | Determinación Txs, Txi |
| | Determinación del DTF |
| | Si $TST > 25$ |
| | $DTF = \frac{TST - Tin}{TST - TC}$ |
| Paso 5 | Caso contrario |
| | Si $TST < 25$ |
| | $DTF = \frac{TC - Tr}{TC - TST}$ |
| | Fin Si |
| | Fin Si |
| Paso 6 | Determinación de kWPF, kWPE, kWCal |
| Paso 7 | Análisis de resultados |
| Paso 8 | Fin |

La conversión de energía de TST, analiza la ganancia térmica total en unidades de refrigeración BTU/H, equivalentes a potencia calorífica por la inversa de la eficiencia energética COP, EER. Esto a su vez da al resultado de consumo de energía eléctrica equivalente a la potencia calorífica confort por la inversa de la eficiencia energética SCOP, SEER [41], [42].

Mediante la utilización de MATLAB se pueden estudiar varias opciones de localización del edificio, temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, además, otros parámetros arquitectónicos como aislamientos y materiales de construcciones.

3. Análisis de Resultados

La simulación del escenario se conforma por 2 casos de estudio, el primer caso de estudio corresponde desde el 8 de febrero al 7 de marzo del 2018 y el segundo caso desde 8 de agosto hasta 8 de septiembre del 2019.

En las siguientes secciones se detallan las características de los escenarios, las variaciones de temperatura y la evaluación del consumo de energía eléctrica en cada caso de estudio.

3.1 Característica de los escenarios

Con el objeto de visualizar las ganancias térmicas del comportamiento bioclimático máximas, obtenidas por el algoritmo ASHRAE [25], [43], [44]. La figura 3, muestra 57%, de color verde por usuarios, de color naranja con 16%, por iluminación, color azul con 13%, conducción de exterior a interior, de color celeste con 9%, por radiación a través de cristales, color amarillo con 4%, equipos eléctricos y menos del 1% por conducción interna de color azul.

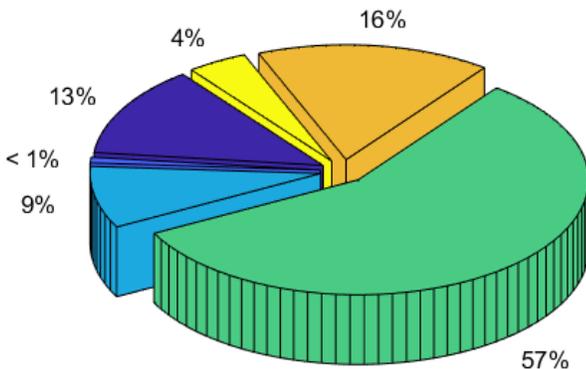


Figura 3. Distribución de cargas térmicas máxima de la Planta.

3.1.1 Modelamiento Óptimo Gauss, T-Student - Escenario

El escenario posee temperaturas hasta 31°C del exterior, por medio del análisis, los resultados de temperatura de sensación térmica requieren de aire acondicionado, para llegar a una óptima zona de confort. El primer caso de estudio obtiene 19°C hasta 34°C y el segundo caso alcanza 20°C hasta 37°C de temperatura de sensación térmica.

La figura 4, representa la distribución de temperaturas del exterior, interior y sensación térmica, con color amarillo, verde y rosa respectivamente de la Planta, que

ocurren en 672 horas desde el 8 de febrero al 7 de marzo del 2019. La temperatura de sensación térmica se analiza y corresponde al comportamiento bioclimático y al aprovechamiento ciertas cargas internas y externas.

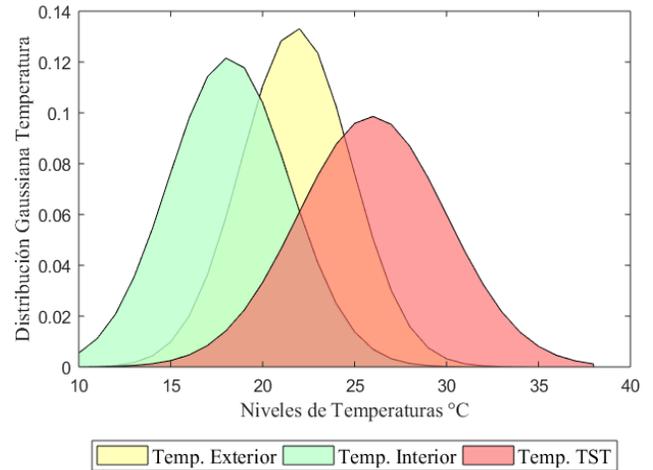


Figura 4. Distribución Gauss de temperaturas primer caso de estudio - Guayaquil.

Por lo tanto, el consumo se genera por disminuir la temperatura para alcanzar zonas óptimas de confort. Con el mismo análisis, la figura 5 representa la distribución de las temperaturas del exterior, interior y TST, de la Planta, que ocurren en 768 horas desde el 8 de agosto hasta el 8 de septiembre del 2019.

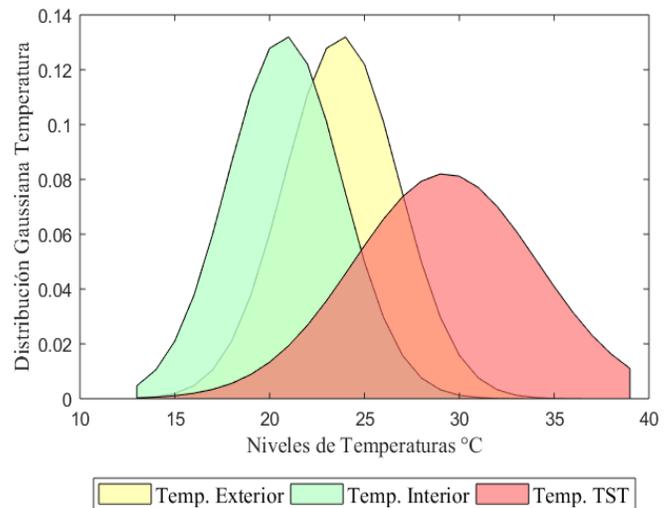


Figura 5. Distribución Gauss de temperaturas segundo caso de estudio - Guayaquil.

Las figuras 6 y 7, representan los niveles de temperatura de sensación térmica alcanzadas por

condiciones bioclimáticas, el aumento de ganancias térmico sirven para determinar la cantidad de energía se requieren para refrigerar y pasar hasta la temperatura de confort [11], [17], [25].

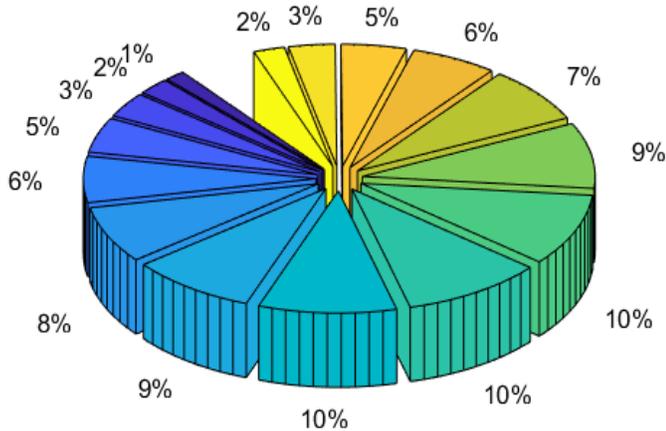


Figura 6. Distribución temperatura TST por hora primer caso de estudio - Guayaquil.

En la tabla 3, representa los niveles de temperatura de sensación térmica en el mes de febrero a marzo, se llega a tener 34 °C. La cantidad de horas representa las veces que se repiten las temperaturas dentro del periodo del primer caso de estudio.

Tabla 3. Distribución TST del 8 de febrero al 7 de marzo (2019)-Guayaquil

| °C | Horas | % |
|----|-------|----|
| 10 | 2 | 1 |
| 11 | 5 | 2 |
| 12 | 25 | 4 |
| 13 | 69 | 6 |
| 14 | 75 | 8 |
| 15 | 62 | 10 |
| 16 | 48 | 11 |
| 17 | 40 | 12 |
| 18 | 29 | 11 |
| 19 | 33 | 10 |
| 20 | 172 | 8 |
| 21 | 81 | 6 |
| 22 | 2 | 4 |
| 23 | 19 | 2 |
| 24 | 10 | 1 |

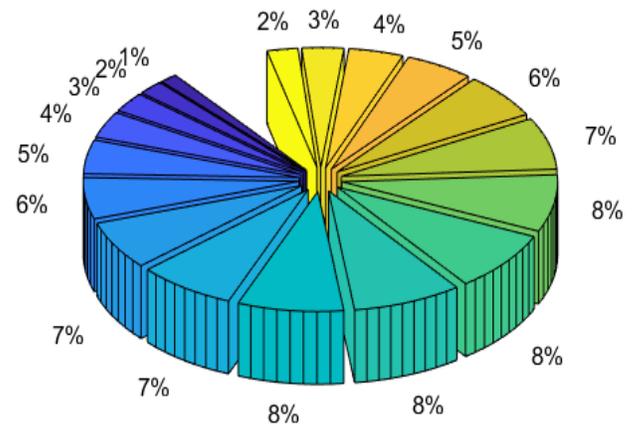


Figura 7. Distribución temperaturas TST segundo caso de estudio - Guayaquil.

Tabla 4. Distribución TST del 8 de agosto al 8 de septiembre (2019)-Guayaquil

| °C | Horas | % |
|----|-------|----|
| 10 | 4 | 2 |
| 11 | 3 | 2 |
| 12 | 23 | 3 |
| 13 | 74 | 4 |
| 14 | 91 | 4 |
| 15 | 59 | 5 |
| 16 | 64 | 5 |
| 17 | 52 | 6 |
| 18 | 19 | 6 |
| 19 | 10 | 6 |
| 20 | 20 | 6 |
| 21 | 29 | 6 |
| 22 | 14 | 6 |
| 23 | 27 | 6 |
| 24 | 21 | 5 |
| 25 | 36 | 5 |
| 26 | 28 | 4 |
| 27 | 39 | 3 |
| 28 | 39 | 3 |
| 29 | 32 | 2 |
| 30 | 36 | 2 |
| 31 | 23 | 1 |
| 32 | 21 | 1 |
| 33 | 4 | <1 |

Mientras en el mes de agosto hasta septiembre como indica la tabla 4, los niveles de temperatura son muy altos

llegando alcanzar 37 °C de sensación térmica, del segundo caso de estudio.

Por lo tanto, para los dos casos de estudio dentro de la Planta es inaceptable laborar en esas condiciones. Estos valores pueden cambiar de acuerdo con el comportamiento de la localidad del edificio, dirección o ubicación de cristales, números de personas laborando internamente, equipos que generen energía térmica.

También los valores de temperatura de sensación térmica pueden variar por las variables climáticas externas por las estaciones del año y del país.

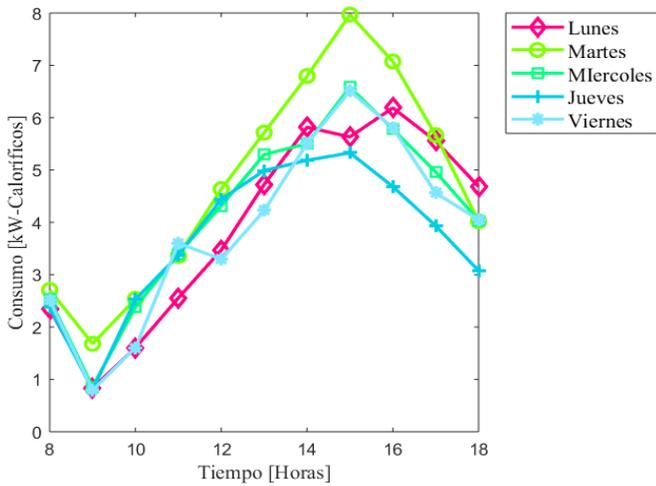


Figura 8. Consumo en kilovatios Caloríficos primer caso de estudio - Guayaquil.

La figura 8 y figura 9, representan el resultado de 5 días, de los dos casos de estudio, como la variación de la energía calorífica para refrigerar de BTU/H a kW Caloríficos por medio de los coeficientes de eficiencia energética [41], [42].

La variación que muestra la figura 8, obtiene como representación los días: lunes, 0.832 hasta 6.188kWcal; martes, 1.680 hasta 7.969kWcal; miércoles, 0.859 hasta 6.584kWcal; jueves, 0.796 hasta 5.328kWcal; viernes, 0.796 hasta 8.159kWcal.

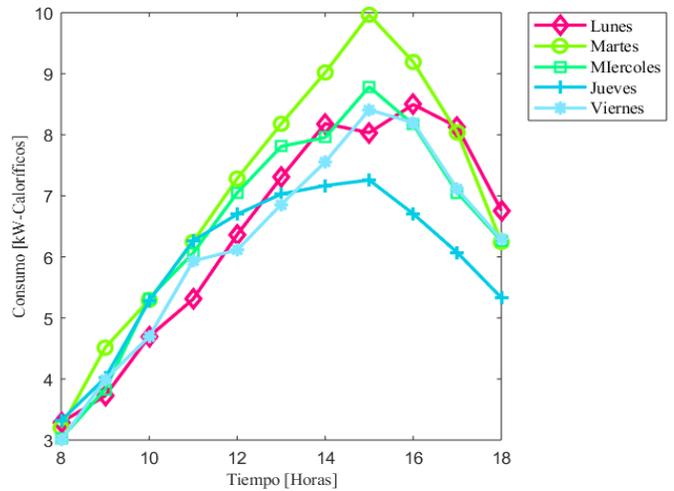


Figura 9. Consumo en kilovatios Caloríficos segundo caso de estudio - Guayaquil.

Para el segundo caso, muestra la figura 9 y obtiene como representación los días: lunes, 3.288 hasta 8.497 kWcal; martes, 3.204 hasta 9.966 kWcal; miércoles, 3.028 hasta 8.786 kWcal; jueves, 3.317 hasta 7.259 kWcal; viernes, 3.001 hasta 8.409 kWcal. Los kilovatios caloríficos son la cantidad que necesita eliminar para alcanzar 25C° de confort.

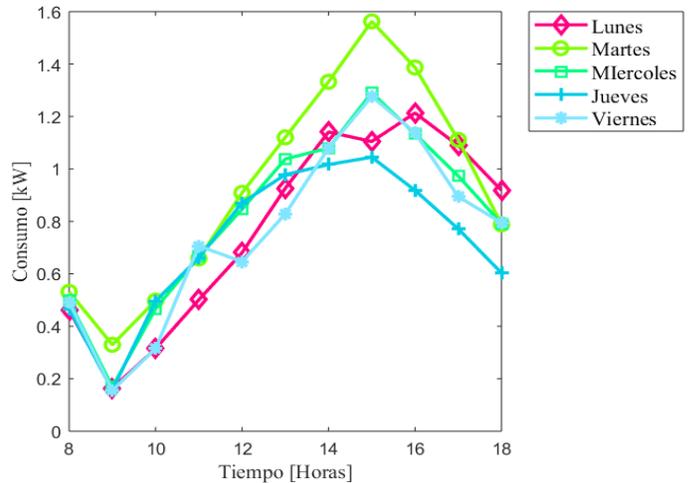


Figura 10. Consumo de Potencia eléctrica kW, alcanzando zonas óptimas de confort primer caso de estudio -Guayaquil.

La figura 10, representa el resultado del consumo de energía eléctrica, obtiene como resultado de los días: lunes, 0.16 hasta 1.21kW; martes, 0.33 hasta 1.56kW; miércoles, 0.17 hasta 1.29kW; jueves, 0.16 hasta 1.04kW; viernes 0.16 hasta 1.28kW.

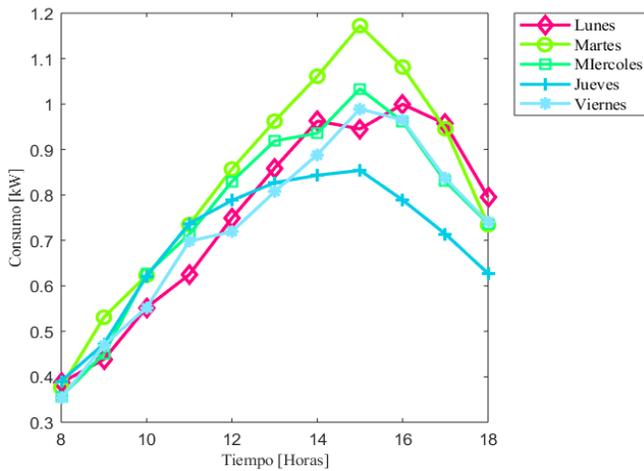


Figura 11. Consumo de energía eléctrica kW, alcanzando zonas óptimas de confort segundo caso de estudio – Guayaquil.

3.1.2 Consumo total de potencia eléctrica por sistemas óptimos de confort.

La Tabla 5, son los resultados totales del escenario, de las fechas mencionadas; X_i , representa el día inicial, X_f , el día final y H, las horas estimadas de uso de aire acondicionado y kWh, el total de energía consumida.

Se debe considerar la capacidad y el número de aire acondicionado a instalar.

En la figura 12, muestra los resultados del segundo escenario. El consumo normal corresponde a la potencia eléctrica consumida por la Planta [23], [24], de color verde. Mientras el consumo agregado por aire acondicionado se representa de color amarillo.

Tabla 5. Consumo total de potencia eléctrica mensual Escenario 2- Guayaquil

| X_i | Mes | X_f | Mes | Año | H | Kwh |
|-------|------|-------|------|------|---------------|---------------|
| 8 | Sep. | 7 | Oct. | 2018 | 162 | 326.32 |
| 8 | Oct. | 7 | Nov. | | 162 | 326.32 |
| 8 | Nov. | 7 | Dic. | | 151 | 304.73 |
| 8 | Dic. | 7 | Ene. | | 157 | 316.06 |
| 8 | Ene. | 7 | Feb. | 2019 | 111 | 224.32 |
| 8 | Feb. | 7 | Mar. | | 141 | 283.50 |
| 8 | Mar. | 7 | Abr. | | 157 | 316.08 |
| 8 | Abr. | 7 | May. | | 152 | 306.13 |
| 8 | May. | 7 | Jun. | | 159 | 319.33 |
| 8 | Jun. | 7 | Jul. | | 151 | 304.77 |
| 8 | Jul. | 7 | Ago. | | 156 | 314.66 |
| 8 | Ago. | 8 | Sep. | 161 | 323.74 | |

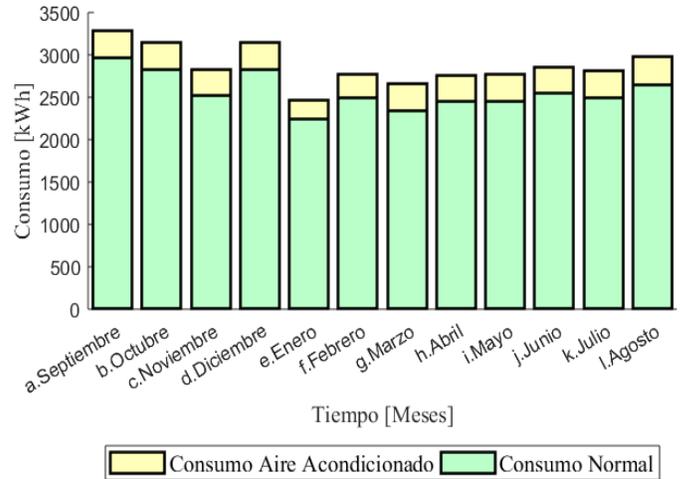


Figura 12. Consumo de energía eléctrica (kWh) total, alcanzando zonas óptimas de confort segundo escenario.

Como se observa, el consumo de potencia eléctrica para alcanzar zonas óptimas de confort, de acuerdo con la arquitectura bioclimática, por medio de aire acondicionado es el 17% del consumo normal. El aire acondicionado debe cumplir con estándares de eficiencia energética que disminuya la potencia eléctrica nominal y los costos de utilización [41], [42]. Además, el trabajo estimado toma como diferencia la temperatura de confort y sensación térmica [13].

4. Conclusiones

En base a la investigación realizada por medio del modelo Gauss T-Student, se obtuvo el total de 141 horas desde el 8 de febrero hasta el 7 de marzo del 2019 con los cuales se estima el tiempo de trabajo para llegar a 25°C de confort con un consumo de energía eléctrica de 283.502 kWh. Se obtuvo el total de 161 horas desde el 8 de agosto hasta el 8 de septiembre del 2019, con un consumo de energía eléctrica de 323.746 kWh para alcanzar 25°C de confort.

El consumo total de potencia eléctrica para alcanzar zonas óptimas de confort desde el 8 de septiembre del 2018 hasta el 8 de septiembre del 2019 se evalúa por medio del modelo el escenario 1 3009.732 kWh, 1494 horas y del escenario 2, 3666.01 kWh, 1820 horas.

Por medio de las condiciones bioclimáticas, se obtienen ganancias térmicas útiles para menorar el 17.7% del tiempo de uso de aire acondicionado y el consumo de energía eléctrica para alcanzar zonas óptimas de confort.

Mediante el Modelo propuesto, se pueden estudiar varias opciones de acuerdo con localización del edificio,

propiedades de temperatura, humedad relativa y velocidad del viento, además, otros parámetros arquitectónicos como aislamientos y materiales de construcciones.

4.1 Recomendaciones

Para mejorar el algoritmo se puede recomendar:

Realizar una investigación de otros métodos que puedan brindar soluciones en costos de inversión y costos de consumo de energía eléctrica.

Realizar instalaciones propias de fuentes renovables que satisfagan con la demanda de equipos de aire acondicionado.

Se recomienda instalar aislamientos que permitan almacenamiento de energía interna, y ventilación natural para mejora de arquitectura bioclimática y disminuir el consumo de potencia eléctrica.

REFERENCIAS

- [1] Z. Xu, Q. S. Jia, and X. Guan, "Supply Demand Coordination for Building Energy Saving: Explore the Soft Comfort," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 12, no. 2, pp. 656–665, 2015.
- [2] X. Qin, S. Lysecky, and J. Sprinkle, "A data-driven linear approximation of HVAC utilization for predictive control and optimization," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 23, no. 2, pp. 778–786, 2015.
- [3] S. Bhattacharya, V. Chandan, V. Arya, and K. Kar, "Demand response for thermal fairness in district heating networks," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 865–875, 2019.
- [4] X. Chen, J. Wang, J. Xie, S. Xu, K. Yu, and L. Gan, "Demand response potential evaluation for residential air conditioning loads," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 12, no. 19, pp. 4260–4268, 2018.
- [5] B. W. Tuinema, M. Gibescu, L. Van Der Sluis, and M. A. M. Van Der Meijden, "Probabilistic reliability analysis of future power systems-survey and example," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Conf. Eur.*, pp. 1–6, 2011.
- [6] F. Coroiu, C. Velicescu, and C. Barbulescu, "Probabilistic and deterministic load flows methods in power systems reliability estimation," *EUROCON 2011 - Int. Conf. Comput. as a Tool - Jt. with Conftel 2011*, pp. 1–4, 2011.
- [7] Y. Huang, Q. Xu, Y. Yang, and X. Jiang, "Numerical method for probabilistic load flow computation with multiple correlated random variables," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 12, no. 11, pp. 1295–1303, 2018.
- [8] C. J. Wallnerström, J. Setréus, P. Hilber, F. Tong, and L. Bertling, "Model of capacity demand under uncertain weather," *2010 IEEE 11th Int. Conf. Probabilistic Methods Appl. to Power Syst. PMAPS 2010*, pp. 314–318, 2010.
- [9] B. Jiang, J. Pei, Y. Tao, and X. Lin, "Clustering uncertain data based on probability distribution similarity," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 25, no. 4, pp. 751–763, 2013.
- [10] C. F. E. Cancino and A. C. Fuentes, "Hygrothermal comfort within the context of social housing and the perceptions of dwellers [Confort higró-térmico en vivienda social y la percepción del habitante]," *Rev. INVI*, vol. 30, no. 85, pp. 227–242, 2015.
- [11] F. Ferrelli and M. C. Piccolo, "Estudio del confort climático a escala micro-local: El caso de Bahía Blanca (Argentina)," *Bitacora Urbano Territ.*, vol. 27, no. 3, pp. 91–100, 2017.
- [12] Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda del Ecuador, "Eficiencia Energética en Edificaciones Residenciales NEC-HS-EE," p. 40, 2018.
- [13] F. B. Silva, A. L. Díaz, and C. J. R. Estébanez, "The use of humidifiers as an energetic alternative to air conditioning: Case of a teaching building in Santiago de Compostela | El uso de humidificadores como alternativa energética al aire acondicionado: Caso de un edificio docente en Santiago de Compost," *Rev. Fac. Ing.*, no. 64, pp. 22–31, 2012.
- [14] T. Wang, Y. Xu, C. Withanage, L. Lan, S. D. Ahipasaoglu, and C. A. Courcoubetis, "A Fair and Budget-Balanced Incentive Mechanism for Energy Management in Buildings," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 4, pp. 3143–3153, 2018.
- [15] R. M. Vignali, F. Borghesan, L. Piroddi, M. Strelec, and M. Prandini, "Energy Management of a Building Cooling System with Thermal Storage: An Approximate Dynamic Programming Solution," *IEEE Trans. Autom. Sci. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 619–633, 2017.
- [16] K. Sano, H. Shimizu, Y. Kondo, and T. Fujimoto, "Improving Accuracy of Temperature Distribution and Energy-Saving Technology of Air Conditioners in Data Centers," *IEEE Trans. Components, Packag. Manuf. Technol.*, vol. 8, no. 5, pp. 811–817, 2018.
- [17] R. N. Alejandra and N. Mario, "Análisis del desempeño térmico de los sistemas constructivos de un edificio de oficinas mediante simulaciones dinámicas Thermal analysis of constructive systems at an office building through dynamic simulations," vol. XIX, no. número 3, pp. 279–290, 2018.
- [18] I. Y. Joo and D. H. Choi, "Distributed Optimization Framework for Energy Management of Multiple Smart Homes with Distributed Energy Resources," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 15551–15560, 2017.
- [19] J. A. Pinzon, P. P. Vergara, L. C. P. Da Silva, and M. J. Rider, "Optimal Management of Energy Consumption and Comfort for Smart Buildings Operating in a Microgrid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 3, pp. 3236–3247, 2019.
- [20] M. Kaddari, M. El Mouden, A. Hajjaji, and A. Semlali, "Reducing energy consumption by energy management and energy audits in the pumping stations," *3rd Renew. Energies, Power Syst. Green Incl. Econ. REPS GIE 2018*, 2018.
- [21] N. Yaagoubi and H. T. Mouftah, "User-aware game

- theoretic approach for demand management,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 2, pp. 716–725, 2015.
- [22] E. Paniagua, J. Macazana, J. Lopez, and J. Tarrillo, “IoT-based temperature monitoring for buildings thermal comfort analysis,” *Proc. 2019 IEEE 26th Int. Conf. Electron. Electr. Eng. Comput. INTERCON 2019*, pp. 1–4, 2019.
- [23] CONELEC, “Regulación modelo de factura,” vol. 003, 2012.
- [24] A. de R. y control de E. (ARCONEL), “Pliego tarifario para las empresas eléctricas de distribución codificado,” *Resolución Nro. ARCONEL - 002/19*, vol. 18, 2019.
- [25] ASHRAE, *Handbook of Fundamentals, SI Edition*. 2017.
- [26] ASHRAE, “ASHRAE Handbook 2001 Fundamentals,” *Ashrae Stand.*, vol. 53, no. 9, pp. 1689–1699, 2001.
- [27] L. Herrera Sosa, “Temperatura y rangos de confort térmico en viviendas de bajo costo en clima árido seco,” *Hábitat Sustentable*, vol. 3, no. 1, pp. 26–36, 2013.
- [28] D. Bravo, F. González, and J. González, “Refrigeración solar de edificaciones. Un estado del arte,” *Rev. Ing. Constr.*, vol. 33, no. 2, pp. 115–126, 2018.
- [29] G. M. Viegas, P. J. Chevez, G. A. S. Juan, and C. A. Discoli, “Comportamiento energético de mosaicos urbanos representativos (La Plata-Buenos Aires-Argentina): influencia de las variaciones térmicas intraurbanas,” *Ambient. Construido*, vol. 18, no. 3, pp. 175–194, 2018.
- [30] J. Ávila-Delgado, M. Robador-González, J. Barrera-Vera, and M. Marrero, “La influencia del vidrio en el consumo de calefacción, refrigeración e iluminación en rehabilitación de edificios de oficinas bajo clima mediterráneo peninsular (1971-1980) ”,” *Rev. Hábitat Sustentable*, vol. 9, no. 1, pp. 68–83, 2019.
- [31] A. Kerimray, R. Bektineyev, and L. R. Rojas-Solórzano, “Energy efficiency options for buildings: Insights from buildings energy audit reports in Kazakhstan,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2016, no. CP688, 2016.
- [32] K. Raviraj, N. Gupta, and H. N. Shet, “Analysis of measures to improve energy performance of a commercial building by energy modeling,” *Proc. 2016 Online Int. Conf. Green Eng. Technol. IC-GET 2016*, pp. 1–4, 2017.
- [33] H. Sisa and C. Cuji, “Modelo Gaussiano T-Student como método para evaluar el consumo eléctrico en sectores comerciales de acuerdo a la arquitectura bioclimática para alcanzar zonas óptimas de confort,” *Electr. Eng.*, vol. 0, no. 0, p. 0, 2020.
- [34] E. H. Piña Hernández, “Prototipo de vivienda vertical social sustentable, enfoque en resistencia al cambio climático,” *Rev. INVI*, vol. 33, no. 92, pp. 213–237, 2018.
- [35] I. Ballarini, G. De Luca, A. Paragamyán, A. Pellegrino, and V. Corrado, “Integration of Thermal and Visual Comfort in the Retrofit of Existing Buildings Transformation of an office building into a nZEB,” *2018 IEEE Int. Conf. Environ. Electr. Eng. 2018 IEEE Ind. Commer. Power Syst. Eur. (EEEIC / I&CPS Eur.)*, pp. 1–6, 2018.
- [36] A. H. Tan, C. L. Cham, and K. R. Godfrey, “Comparison of Three Modeling Approaches for a Thermodynamic Cooling System with Time-Varying Delay,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 64, no. 11, pp. 3116–3123, 2015.
- [37] B. I. Wang, C. M. Lo, and M. D. Lin, “Building Energy Conservation Strategies Evaluation and Simulation,” *IEEE Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag.*, vol. 2019-Decem, pp. 1874–1878, 2019.
- [38] J. Song, G. Xue, Y. Ma, H. A. N. Li, Y. U. Pan, and Z. Hao, “An Indoor Temperature Prediction Framework Based on Hierarchical Attention Gated Recurrent Unit Model for Energy Efficient Buildings,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 157268–157283, 2019.
- [39] A. Mosaddegh, C. A. Canizares, and K. Bhattacharya, “Optimal Demand Response for Distribution Feeders with Existing Smart Loads,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 5, pp. 5291–5300, 2018.
- [40] N. Mahdavi, J. H. Braslavsky, M. M. Seron, and S. R. West, “Model Predictive Control of Distributed Air-Conditioning Loads to Compensate Fluctuations in Solar Power,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 3055–3065, 2017.
- [41] INEN, “Eficiencia Energética de acondicionadores de aire-2495.pdf.” 2012.
- [42] MINEN, “Informe Técnico Estándar Mínimo de Eficiencia Energética Equipos de Aire Acondicionado,” pp. 1–74, 2017.
- [43] ASHRAE, “Cooling and Heating Load Calculation Manual, 1979.”, *Cool and Heat Load Calc Man.* 1979.
- [44] J. Amigo Vásquez, “Ahorro energético en viviendas de países con climas tropicales,” *Universidad, Cienc. y Tecnol.*, pp. 1–12, 2006.

Revisión para la restauración óptima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad

Review optimal restoration of the operation in electric power systems based on stability and energy quality criteria

Diego Carrión Galarza¹, Jaime Francisco Quinteros Flores^{1*}, Paul Andres Masache Almeida¹

¹Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: jquinteros@ups.edu.ec

RESUMEN— Las fallas que ocurren en el sistema de energía eléctrica tienen un gran impacto en la sociedad generando grandes pérdidas económicas y pérdidas de energía eléctrica; por esta razón, es necesario tener un plan que permita restaurar el sistema eléctrico de una manera óptima y en el menor tiempo posible. Se realiza una revisión de las metodologías que permiten realizar una planificación de la restauración óptima de la SEP después de una falla debido a problemas que causan corte parcial de energía en ciertos puntos de la red. Con lo cual se puede implementar una heurística que permita elegir el camino óptimo para la restauración; es decir, proporcionará los pasos para ingresar los elementos que se ingresan, como son: las líneas de transmisión o centrales de generación, teniendo en cuenta la estabilidad del sistema y los índices de calidad que representan las restricciones del problema. Por lo tanto, los flujos óptimos de potencia se utilizan para conocer el estado del sistema posterior a la falla; de esta manera, los criterios de voltaje y potencia se utilizarán para ingresar a la heurística, además de utilizar programación lineal de entera mixta (MILP).

Palabras clave— *Flujo Óptimo, Estabilidad de voltaje, Conmutación de líneas, Sistema de Transmisión, Sistema de Generación.*

ABSTRACT— The failures that occur in the electric power system have a great impact on society, generating large economic losses and electrical power losses; For this reason, it is necessary to have a plan to restore the electrical system in an optimal way and in the shortest time. A review of the methodologies that allow planning the optimal restoration of the SEP after a failure is made due to problems that cause partial power outages at certain points in the network. Which can be implemented a heuristic that allows choosing the optimal path for restoration; that is to say, it will provide the steps to enter the elements that are entered, such as: transmission lines or generation plants, considering the stability of the system and the quality indices that represent the restrictions of the problem. Therefore, the optimal power flows are used to know the status of the post-fault system; in this way, the voltage and power criteria will be used to enter the heuristic, in addition to using linear mixed integer programming (MILP).

Keywords— *Optimum Flow, Voltage Stability, Switching Lines, Transmission System, Generation System.*

1. Introducción

Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) en la actualidad abastece de energía eléctrica a gran parte del mundo, una falla en el SEP produce grandes pérdidas económicas, técnicas y humanas, dado que el suministro eléctrico llega no solo a los usuarios comunes sino a establecimientos públicos como son; hospitales y centros de atención médica, además de servicios policiales, militares y bomberos; por esta razón, la restauración del SEP se debe realizarlo en el menor tiempo posible cumpliendo con índices de calidad y estabilidad [1–3].

Las principales causas por las que se pueden suscitar estos problemas son: fallas operativas en el SEP como; desconexión y conexión brusca de grandes consumidores y generación, provocando la desestabilización de la red y en varios casos severos causando cortes parciales en el sistema eléctrico; además, existen fenómenos meteorológicos como: descargas eléctricas, las cuales producen sobretensiones en las líneas de transmisión causando la desconexión de líneas, cargas eléctricas o generación [2–4].

Restaurar el SEP requiere de procesos y toma de decisiones complejas los cuales conllevan al seguimiento

Citación: D. Carrión, J. Quinteros y P. Masache, “Revisión para la restauración óptima de la operación del sistema eléctrico basado en criterios de calidad de energía y estabilidad”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 29 de febrero de 2020. **Recibido con correcciones:** 13 de marzo de 2020. **Aceptado:** 12 de enero de 2021.

DOI:

Copyright: 2021 D. Carrión, J. Quinteros y P. Masache. 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 varios pasos que se debe seguir, como: determinar el estado en el que se encuentra el SEP, definir las estrategias de restauración que se van a seguir, el camino a tomar para la energización de generación, el camino para la energización de transmisión, y la sincronización del sistema; el objetivo principal es restaurar el SEP en el menor tiempo posible además de disminuir los cortes de energía y así lograr que los grandes consumidores y la generación se encuentren operando bajo condiciones normales de operación de su capacidad eléctrica; todo esto, tomando en cuenta las criterios operativos y técnicos [1], [5], [6].

Para analizar el estado del SEP después de que ocurrió una falla, se pueden utilizar diferentes metodologías como: flujo de potencia AC o DC; además existen técnicas como: flujos óptimos de potencia AC o DC; cada uno de estos métodos va a depender de la complejidad del problema que se desea resolver; por ejemplo, si se habla de flujo óptimo DC se relaja al sistema linealizando las ecuaciones [7–11].

Existen varios tipos de método para realizar la restauración del SEP, en [4] proponen resolver este problema mediante el árbol de mínima expansión (MST por sus siglas en inglés); al utilizar el MST se propone disminuir el tiempo de restauración del SEP tomando en cuenta ciertos factores como: el tiempo que se demoran en arrancar los generadores y tiempos de restauración de los subsistemas; como transformadores y líneas de transmisión, están representados por pesos con sus respectivos tiempos de restauración, se toma en cuenta el efecto que causan las cargas que se despachan y son tomadas como restricciones.

Otro método usado en [12], [13] para la restauración del SEP es la programación lineal entera mixta (MILP por sus siglas en inglés), esta técnica es un parte del conjunto ya que solo es utilizado para contemplar la secuencia en la que deben ingresar los generadores a la red, además utilizan el algoritmo de Dijkstra mejorado, este lo utilizan para minimizar el tiempo de restauración en el arranque secuencial de los generadores, buscan una matriz de adyacencia considerando la corriente de las cargas para la reconexión de la red. Podemos observar que en [5] utilizan MILP para obtener la secuencia óptima en la que los generadores deben ingresar; además, utilizan la teoría de decisión sobre la brecha de información (IGDT), este método no requiere de las características que posee el sistema, el objetivo principal

de este método se basa en maximizar la potencia generada de cada una de las unidades de generación y las cargas abastecidas. Una vez que aplicaron el IGDT utilizan el algoritmo genético NSGA-II para complementar y dar solución a la restauración.

En [14] se puede apreciar la utilización del algoritmo de ciclo de agua (WCA) por sus siglas en inglés utilizando índices de calidad y confiabilidad para cada una de las islas que se genera después de una falla, cabe resaltar que en este documento solo se realiza la restauración del sistema de transmisión, definen una función multiobjetivo realizado con el conjunto óptimo Pareto, realizan la minimización de la energía no suministrada. Realiza una comparación con el algoritmo genético (GA) por sus siglas en inglés y la optimización por enjambre de partículas (PSO) por sus siglas en inglés, en la cual el WCA realiza el proceso en menor tiempo.

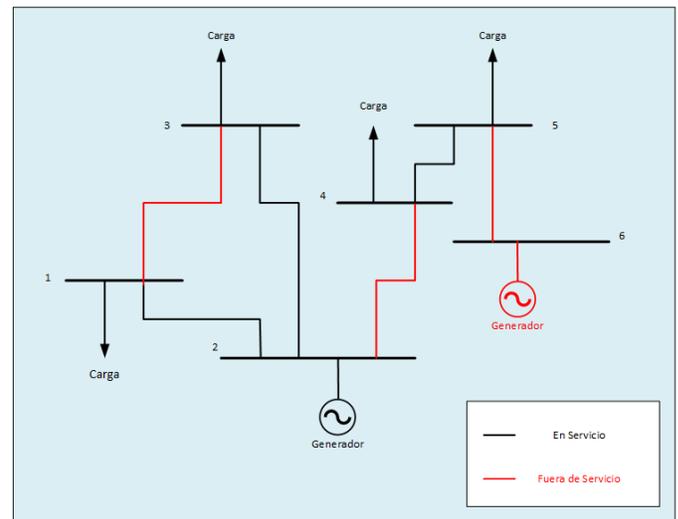


Figura 1. Esquema del sistema eléctrico de potencia después de despejar la falla eléctrica.

En la figura 1 se puede apreciar al sistema eléctrico de potencia después de que se ha efectuado un despeje de fallas eléctricas, cuando se genera un despeje de fallas, el sistema permanece operando, pero algunos elementos salen de operación para despejar la falla, dependiendo de la severidad de la falla, el número de equipos aislados varían; el peor escenario es cuando el sistema permanece en funcionamiento pero en islas; es decir, que el sistema eléctrico se dividirá en 2 subsistemas operando por separado; en este caso cuando se realice la restauración se deberá operar al sistema con normalidad; es decir, que vuelva a operar como un sistema único. En la Figura 2 se

aprecia de manera gráfica como se debería efectuar la restauración del sistema eléctrico, como se va incorporando cada uno de los equipos que fueron aislados o desconectados para mantener el servicio eléctrico; para ello se debe efectuar un análisis previo para verificar como se va a generar la restauración; estos son los que se detallaron con anterioridad; la restauración se lo debe efectuar dependiendo del nivel y del número de desconexiones que se realizaron y se debe verificar bajo los criterios de calidad y estabilidad del sistema eléctrico.

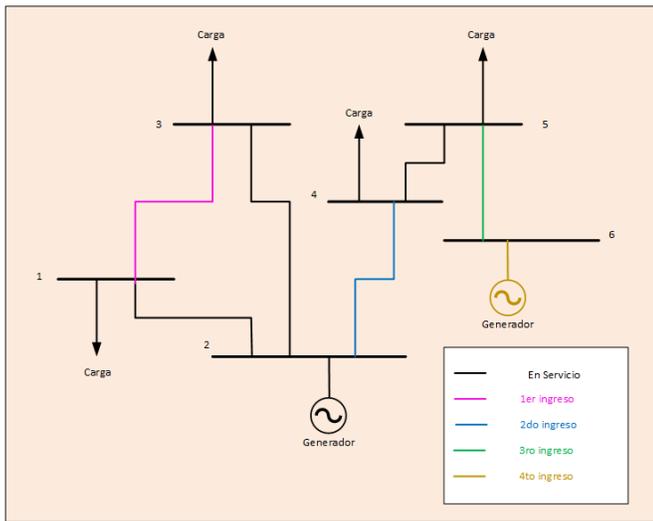


Figura 2. Esquema del sistema eléctrico de potencia después de la restauración óptima.

En el trabajo se propone realizar una reseña sobre los diferentes metodologías de planeación para la restauración óptima del SEP tomando en cuenta los índices de calidad y estabilidad, además, se utiliza flujos óptimos de potencia para conocer el estado del SEP después de que ocurrió la falla; esto permite conocer los puntos críticos del sistema y nos brindara los valores de las magnitudes de voltaje, frecuencia, corriente y potencia, con los valores obtenidos se utilizaran como escenario de partida y en conjunto con la programación lineal entera mixta, ayudara en la elección y orden en la que los generadores deben ingresar, además se realizara una heurística la cual me va a generar un árbol de decisiones que me permitirá elegir el camino óptimo para el ingreso de líneas de transmisión y generadores cumpliendo con los índices de calidad y estabilidad, es decir se realizaran pruebas no solo con la salida de líneas de transmisión sino también con salida de generación.

En el presente trabajo se presenta en la sección II la restauración del sistema eléctrico de potencia como se lo efectúa y que proceso de sede de realizar; la sección III, influencia de la calidad y confiabilidad de la energía en el SEP; en la sección IV los diferentes criterios de estabilidad que se debe tomar en cuenta para la verificación del sistema; en la sección V se realiza un detalle de la metodología planteada y la sección VI las conclusiones desarrolladas.

2. Restauración del sistema eléctrico de potencia

Un corte de energía eléctrica en el SEP, sin importar las condiciones de la falla; se debe conocer el estado en que termina el SEP después del despeje de la falla; es necesario restaurarlo, esto implica seguir distintos pasos, los mismos que se pretende detallarla más adelante. Cuando sucede fallas en el sistema que causan corte parciales o completas de energía, en general el sistema no presenta la disposición de restablecerse por sí solo, motivo por el cual es necesario que toda red posea generadores BS (Black Start por sus siglas en inglés); estos generadores son fuentes primarias de energía independientes que pueden ingresar a trabajar y proporcionar energía a la red eléctrica; es decir, que van a estar disponibles por sí se necesitan fuentes adicionales de alimentación de la red [12], [15], [16]. Los generadores BS pueden ser hidroeléctricos, a diésel y de turbinas de gas, los generadores más usados son los hidroeléctricos ya que no es necesario de una gran energía para iniciar el proceso de generación además se requiere que posea las siguientes características; rampa rápida, gran capacidad y los costos de reserva que sean bajos. Los generadores a diésel pueden aportar energía de manera rápida, sin embargo, posee una capacidad limitada de aporte de energía y finalmente las generadoras con turbinas de gas pueden ayudar a la red tomando energía de baterías locales y de esta manera iniciar el proceso de generación [6], [17].

2.1 Determinación, identificación y preparación del sistema para la restauración

El paso fundamental para iniciar la restauración del SEP es verificar el estado en que se encuentra después del corte parcial o total verificando la estabilidad del sistema y comprobando los límites de voltaje, desviación angular y frecuencia; además es indispensable verificar

la seguridad de la red, se debe comprobar que elementos de la red están disponibles después de la falla eléctrica y de los diferentes problemas que han ocurrido en la red; por lo tanto, la capacidad de evaluar al sistema va a depender básicamente de cómo está estructurada la red tanto en el sistema de generación, transmisión y distribución. Por lo general cuando existen estos cortes se desconectan todo tipo de generación renovable por su intermitencia [6], [18].

2.2 Estrategias para la restauración del SEP

Existen varios tipos de estrategias de restauración la principal es la de acumulación. La estrategia de reducción contempla primero realizar la energización del sistema de transmisión, después de ello se restaura la generación y por último las cargas. Si existen fuentes de energía como las generadoras hidroeléctricas, estas fuentes proporcionan una compensación extra, ya que la energía inicial que posee es suficiente para reestablecer el sistema de transmisión, además de lograr la estabilidad del sistema, algo que la estrategia de acumulación no puede lograr. Las tres etapas de la estrategia de acumulación son: primero la etapa de preparación que consiste en evaluar al sistema después de la falla, con lo cual se divide al sistema en varios subsistemas los cuales poseen fuentes de generación iniciales que permitan contribuir con la restauración, la segunda etapa de la restauración, consiste en que los pequeños subsistemas se reinician, se energizan las líneas de transmisión, y se conectan las principales cargas, la tercera y última etapa se conectan las cargas restantes del sistema [6], [19].

2.3 Caracterización de los subsistemas

La principal estrategia que se utiliza para la restauración de los SEP es la de acumulación, los operadores del SEP tienen el trabajo de dividir el sistema en subsistemas tomando en consideración las siguientes características: la carga de generación, la potencia reactiva del sistema. El equilibrio que debe darse entre la generación y la carga toma en consideración las características tanto de del tipo de carga como del generador; hay que tener presente que debe existir un balance en cada subsistema de la carga, debe existir una diferencia pequeña entre la capacidad de generación que se tiene en el sistema y las cargas. Hay que tener un interés especial por la potencia reactiva ya que es vital en el proceso de restauración, al ingresar las cargas estas pueden elevar el voltaje del SEP, por este motivo es

necesario que existan cargas reactivas que puedan estabilizar al sistema. Los subsistemas son la clave para interconectar a toda la red ya que, mientras más subsistemas existan habrá más puntos de conexión en el sistema, sin embargo, esto dificultaría la sincronización de la red [20–22].

2.4 Energización del sistema de transmisión

La energización del sistema de transmisión es el paso más complicado para la restauración del SEP ya que hay que tener cuidado con los límites de voltajes, para ello lo indicado es reconectar las líneas de transmisión que posean los voltajes más bajos y por consiguiente corrientes de cargas pequeñas. Para energizar el sistema de transmisión se requieren de rutas óptimas las mismas que se seleccionaran contemplando corrientes de carga o conmutación de líneas [23], [24].

2.5 Restauración de los generadores y abastecimiento de carga

La reconexión de la etapa de generación es la más complicada de todos los pasos para restaurar al SEP dado que se lo debe hacer en el menor tiempo posible, porque cuando existen cargas críticas como los hospitales, las plantas nucleares semáforos y estaciones de servicio a la ciudadanía como la policía, bomberos, son cargas eléctricas que tienen una alta prioridad y deben ser las primeras que deben ser restauradas y deben tener coordinación con el ingreso de las primeras generadoras. En este paso se verifica la estabilidad del sistema de manera coordinada verificando voltajes y frecuencia del sistema, el ingreso de la carga debe ser proporcional a la capacidad de generación que se va restaurando, pero el generador principal o la barra *slack* es la que delimita el abastecimiento de las cargas [24].

2.6 Sincronización del sistema

Cuando ya se tenga la gran parte del SEP restablecido es necesario que todos los subsistemas queden totalmente sincronizados para ello se debe verificar el ángulo de fase el voltaje y la frecuencia comprobando que en las últimas barras de cada subsistema tengan las mismas magnitudes. Se debe constatar que el sistema de transmisión cumpla con los índices de calidad de energía en el área de sincronización como el tamaño de los subsistemas y las capacidades que poseen las líneas de transmisión [25].

3. Influencia de la calidad y la confiabilidad de energía en el SEP

La calidad de energía en la restauración de un SEP es de suma importancia ya que permite determinar límites para un correcto funcionamiento, la calidad de energía se la ve desde dos puntos distintos: la calidad de potencia la cual determina las características como la magnitud, frecuencia, simetría del voltaje y corriente, además del factor de potencia; el segundo punto es la calidad del servicio de transmisión donde se evalúa la continuidad de la entrega de potencia [26].

En síntesis, las características que se utilizan para evaluar la calidad de energía en un SEP tanto en potencia como en transmisión son: [regulación gubernamental o regulaciones emitidas por estándares nacionales e internacionales] [27].

- Armónicos de voltaje y corriente
- Balance de voltaje y corriente
- Nivel de voltaje
- Factor de potencia
- Duración y frecuencia de interrupciones

Existen diversos fenómenos que inciden sobre la calidad de energía como: los transitorios electromagnéticos, variaciones de tensión de corta y larga duración, desbalances y fluctuaciones de voltaje, variaciones en la frecuencia y las distorsiones en las formas de ondas; todos estos fenómenos son llamados perturbaciones del sistema eléctrico ya que modifican las curvas de voltaje y de corriente provocando fallas en la red eléctrica [26].

El cálculo del contenido armónico se calcula con la ecuación 1 donde V_n es el voltaje fundamental, V_i es la componente de tensión que corresponde al armónico i además h es el máximo orden armónico [27].

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_i^h V_i^2}}{V_n} \quad (1)$$

La manera de analizar el balance de voltaje y de corriente viene definida por la ecuación 2 donde V_1 es la componente simétrica positiva y V_2 es la componente simétrica negativa. La misma ecuación nos sirve para calcular el balance de corriente, el cambio se da en colocar las componentes simétricas tanto positivas como negativas de la corriente [27].

$$BV = \frac{V_2}{V_1} \quad (2)$$

La duración y frecuencia de interrupciones viene dada por la ecuación 3 y 4 respectivamente, estas ecuaciones son conocidas como SAIDI o SAIFI [10], [28], [29].

$$SAIDI = \frac{\text{minutos sin servicio por cliente}}{\text{total de clientes}} \quad (3)$$

$$SAIFI = \frac{\text{total clientes sin servicio}}{\text{total clietes}} \quad (4)$$

Existen varios índices que determinan la confiabilidad que posee el SEP, donde se determina la probabilidad de que el sistema siga operando de forma normal si suceden perturbaciones o fallas, para el caso de generación y transmisión los índices que se utilizan son los siguientes:

El primer indicador que se utiliza para evaluar la confiabilidad es el LOLE, Loss Of Load Expectation por sus siglas en inglés, este indicador permite apreciar el número de horas que no se podrá suministrar la demanda total, además toma en cuenta los mantenimientos que se tienen planificados para el cálculo.

La ecuación 5 presenta la forma de cálculo del LOLE donde P_k es la probabilidad que posee el sistema para suministrar el servicio, mientras que T_k representa la cantidad de energía eléctrica no suministrada [30][31].

$$LOLE = \sum T_k * P_k \quad (5)$$

El siguiente índice representa la cantidad de horas en el año donde no se suministró la demanda total que requería el sistema, sin embargo, se suministró una cantidad determinada de energía a la demanda, se la conoce como LOLP, Loos Of Load Probability por sus siglas en inglés, la ecuación 6 representa la forma como se calcula este indicador.

$$LOLP = \frac{LOLE}{\text{horas no suministradas}} \quad (6)$$

El EENS, Expected Energy Not Server, permite evaluar la confiabilidad del sistema, este indicador determina el valor de energía no suministrada que se presenta durante un año. La ecuación 7 representa el cálculo de este índice donde P_k es la probabilidad que

posee el sistema para suministrar el servicio y E_k representa la energía no suministrada [32].

$$EENS = \sum E_k * P_k \quad (7)$$

El índice EUE, Expected Unserved Energy por sus siglas en inglés, permite determinar la energía que no va a ser suministrada en un lapso determinado. Donde L representa carga y la U determina el promedio anual en la que no se tendrá disponibilidad de servicio [32].

$$EUE = \sum L * U \quad (8)$$

El índice que señala la energía que no se suministra al sistema por falta de capacidad en generación se lo denomina LOEE, determinando si existe o no una reserva de energía para cubrir con el suministro de la demanda total. Donde P_k es la probabilidad que posee el sistema para suministrar el servicio y E_k representa la energía no suministrada [31], [32].

$$LOEE = \sum E_k * p_k \quad (9)$$

El índice EIU, Energy Index Unreability, representa la energía no suministrada cuando exista alguna falla en el sistema, representa energía no disponible [32].

$$EIU = \frac{LOEE}{E} \quad (10)$$

4. Criterios de estabilidad

El concepto de estabilidad se define como la capacidad que posee el sistema eléctrico de potencia para recuperar su condición inicial de operación al sufrir perturbaciones que desestabilicen sistema, cada una de las variables que intervienen en este, deben regresar aproximadamente a su valor en condiciones de operación normal [33].

Los SEPs deben tener la propiedad de recuperarse frente la gran variedad de perturbaciones que pueden ocurrir; por ejemplo, los cortocircuitos afectan de manera casi imperceptible al sistema, así como salida de varias líneas de transmisión, o de generadores de gran capacidad; la respuesta que debe tener el sistema debe ser

instantánea. Si al sufrir una perturbación el sistema continúa operando de manera estable, se puede considerar que el sistema es robusto, ya que no fue necesario que elementos de generación o transmisión salgan de operación para mantener su estabilidad; pero, dependiendo de la severidad de la perturbación es necesario que, generadores y líneas de transmisión se tengan que desconectar en varios tramos, y así se divide al sistema en islas permitiendo preservar cargas y generación. Con la finalidad de mantener la estabilidad del sistema existen varios parámetros que se requieren monitorear y controlar; como es la desviación angular, la variación de frecuencia y la variación de voltaje [33].

4.1 Estabilidad de ángulo

La estabilidad de ángulo está directamente relacionada con las máquinas sincrónicas, ya que depende de la capacidad que poseen las máquinas para seguir en operación y en equilibrio ante perturbaciones, es decir, que se mantenga sincronizado. La condición para que exista estabilidad de ángulo en las máquinas sincrónicas es que exista una simetría, equilibrio, entre el par mecánico y el electromagnético; si esto no sucede se puede generar oscilaciones angulares que ocasionan salida de sincronismo propio, así como pérdida de sincronismo con otras máquinas. Los generadores poseen componentes de par sincrónico relacionado con la desviación del ángulo del rotor y el par de amortiguación que hace referencia a la desviación de la velocidad [33], [34].

Existen perturbaciones pequeñas o de pequeña señal, afectan de dos maneras aumentando el ángulo del rotor o produciendo oscilaciones en el rotor; sin embargo, los generadores al estar en presencia de estas perturbaciones tienen la capacidad de seguir en operación. Si existe perturbaciones de gran tamaño producen oscilaciones severas lo que implica la salida de sincronización o la salida de uno o varios generadores del sistema [33].

4.2 Estabilidad de voltaje

La capacidad del SEP para preservar los voltajes en cada una de las barras del sistema luego de sufrir perturbaciones que afectan las condiciones iniciales de operación se denomina estabilidad de voltaje, en este fenómeno se aprecia el equilibrio que existe entre la demanda de la carga y el suministro que se debe ofrecer; si esto falla existe la posibilidad de aumento de voltaje en diferentes barras del sistema provocando la activación de

protecciones generando una aperturas en el sistema en cascada. Si el voltaje disminuye se relaciona con la inestabilidad que sufre el ángulo del rotor, así como con las cargas del sistema [35].

La principal causa de que exista inestabilidad de voltaje en el SEP son las cargas, al ingresar cargas al sistema el voltaje disminuye y aumenta el consumo de potencia reactiva; cuando esto ocurre la transferencia de potencia se ve limitada, ya que los generadores sobrepasan la capacidad que poseen [33], [35].

La estabilidad de voltaje se la puede ver desde dos puntos diferentes como: estabilidad ante grandes y pequeñas perturbaciones; al aumentar o disminuir carga se producen pequeñas perturbaciones mismas que el sistema puede mitigar sin ningún problema, mientras que, si se producen fallas como salida del sistema de generación se va a producir perturbaciones de gran tamaño afectando al sistema de tal manera que, los elementos de protección y control que posee el SEP actúan generando pérdidas parciales o totales del suministro energético [33].

4.3 Estabilidad de frecuencia

La capacidad que posee el SEP para conservar la frecuencia de operación inicial ante una contingencia o falla, resultando una variación entre la carga y generación se denomina estabilidad de frecuencia. Al ingreso o salida de carga de manera no programada produce inestabilidad de frecuencia ya que lo generado resulta ser un valor mayor o menor de lo que necesita la carga, por tanto, existe oscilaciones de frecuencia provocando pérdidas de generación, de carga o ambas [33][36].

Al existir variaciones de frecuencia el voltaje del sistema puede aumentar de manera brusca causando la salida de generación debido a la activación de relés de impedancia mal coordinados. La forma de mitigar la inestabilidad de frecuencia es generar islas o separar el sistema eléctrico en subsistemas; además, del accionamiento de dispositivos reguladores que pueden actuar en fracciones de segundos hasta varios minutos dependiendo de la gravedad de la perturbación [33][37].

5. Formulación del problema

El artículo presenta una revisión bibliográfica acerca de trabajos realizados acerca de la Restauración Óptima del Sistema Eléctrico y una recopilación de los criterios de calidad y criterios de estabilidad, donde se aprecian

las distintas metodologías utilizadas para realizar la restauración óptima bajo contingencias n-1 como flujos óptimos de potencia, Dijkstra mejorado, Programación lineal entera mixta, optimización por enjambre de partículas, además se presenta de manera detallada los pasos a seguir para restaurar el sistema en cada una de los artículos citados. Existen criterios de estabilidad y calidad exclusivos del sistema de generación y transmisión que se toman en cuenta para resolver este problema mismos que se mencionan en la sección tres y cuatro.

Realizada la revisión bibliográfica se propone realizar una restauración óptima basado en contingencias N-2; es decir, restablecer el servicio de generación o líneas transmisión, para lo cual se realizará flujos óptimos de potencia AC en varios modelos de la IEEE, se generarán contingencias N-2 aleatorias con el fin de verificar todos los posibles escenarios que se pueden presentar en el SEP y se volverá a realizar flujos óptimos AC, utilizando la heurística Árbol de decisiones se determinara el ingreso óptimo de generación y transmisión verificando los índices de calidad confiabilidad y estabilidad determinados por la normativas internacionales, el objetivo es minimizar costos de operación tanto en generación como en transmisión. En la Figura 3 se puede reflejar lo expuesto de manera resumida lo que se pretende analizar y como varios autores han realizado la metodología para resolver los problemas expuestos.

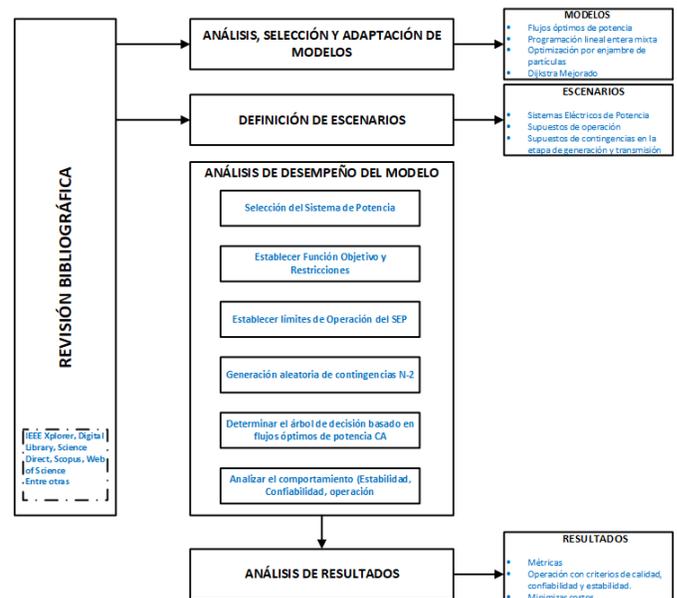


Figura 3. Metodología para la restauración del SEP.

6. Conclusiones

El sistema eléctrico proporciona, transmite y distribuye la energía eléctrica, pero cuando se produce una falla eléctrica, el sistema pierde su estado normal de operación y dependiendo de la gravedad de la falla, varios equipos como líneas de transmisión y equipos de generación pueden salir de operación al ser aislados para mantener el servicio eléctrico; cabe mencionar, que mientras más grave es la falla, existe una mayor probabilidad de que el servicio eléctrico pueda operar o mantener su operación; por tal razón, es indispensable verificar y elaborar metodologías que permitan brindar mayor robustez al sistema en caso de fallas, y de la misma forma es indispensable optar por metodologías y tecnologías que sean capaces de restablecer el servicio eléctrico en el menor tiempo y que vuelva el sistema a operar en condiciones normales.

Es fundamental que cuando se efectúa una restauración del sistema, este sistema vuelva a operar bajo parámetros normales; es decir, que vuelva a proporcionar el servicio habitual y toda la demanda sea abastecida; para ello es indispensable proporcionar metodologías que colaboren con la restauración del sistema y es de suma importancia verificar que la restauración o reconexión del sistema se encuentra funcionando bajo diferentes criterios que son importantes para brindar un servicio óptimo; estos criterios son: criterios de estabilidad, criterios de calidad y criterios de confiabilidad; cada uno de estos criterios son regularizados bajo instituciones internacionales que brindan los parámetros adecuados de funcionamiento.

6.1 Futuros trabajos

Como trabajos futuros se analizará la restauración óptima del sistema eléctrico de potencia que es afectado por contingencia N-3, con pérdidas en generación, transmisión y carga, con el cumplimiento de criterios de calidad, confiabilidad y de estabilidad, que determinan las normativas internacionales.

REFERENCIAS

- [1] M. M. Adib-i, "Power System Restoration Planning M.," vol. 9, no. 1, pp. 22–28, 1994.
- [2] H. Zhang, G. Li, and H. Yuan, "Collaborative optimization of post-disaster damage repair and power system operation," *Energies*, vol. 11, no. 10, 2018.
- [3] P. M. Pesoti, E. V. De Lorenci, A. C. Z. De Souza, K. L. Lo, and B. I. L. Lopes, "Robustness area technique developing guidelines for power system restoration," *Energies*, vol. 10, no. 1, pp. 1–16, 2017.
- [4] C. Li, J. He, P. Zhang, and Y. Xu, "A novel sectionalizing method for power system parallel restoration based on minimum spanning tree," *Energies*, vol. 10, no. 7, 2017.
- [5] P. Jiang and Q. Chen, "An optimal source-load coordinated restoration method considering double uncertainty," *Energies*, vol. 11, no. 3, 2018.
- [6] F. Qiu and P. Li, "An Integrated Approach for Power System Restoration Planning," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1234–1252, 2017.
- [7] P. Escudero Delgado and D. Carrión Galarza, "Expansión de un sistema de transmisión mediante LOPF-AC," *Inge Cuc*, vol. 14, no. 2, pp. 116–125, 2018.
- [8] Y. Li and Y. Li, "Two-step many-objective optimal power flow based on knee point-driven evolutionary algorithm," *Processes*, vol. 6, no. 12, 2018.
- [9] Z. Li, Y. Cao, L. Van Dai, X. Yang, and T. T. Nguyen, "Optimal Power Flow for Transmission Power Networks Using a Novel Metaheuristic Algorithm," *Energies*, 2019.
- [10] P. A. Masache and D. F. Carrión, "Estado del Arte de conmutación de líneas de transmisión con análisis de contingencias," *I+D Tecnológico*, vol. 15, no. 2, pp. 98–106, 2019.
- [11] G. Poyrazoglu and H. Oh, "Optimal Topology Control with Physical Power Flow Constraints and N-1 Contingency Criterion," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 6, pp. 3063–3071, 2015.
- [12] B. Goo, S. Jung, and J. Hur, "Development of a sequential restoration strategy based on the enhanced Dijkstra algorithm for Korean power systems," *Appl. Sci.*, vol. 6, no. 12, 2016.
- [13] R. Sun, Y. Liu, H. Zhu, R. Azizipah-Abarghooee, and V. Terzija, "A network reconfiguration approach for power system restoration based on preference-based multiobjective optimization," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 83, p. 105656, 2019.
- [14] M. R. Esmaili, A. Khodabakhshian, R. Allah Hooshmand, and P. Siano, "A new coordinated design of sectionalizing scheme and load restoration process considering reliability of transmission system," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 102, no. January, pp. 23–37, 2018.
- [15] Y. Liu, R. Fan, and V. Terzija, "Power system restoration: a literature review from 2006 to 2016," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 4, no. 3, pp. 332–341, 2016.
- [16] G. Patsakis, D. Rajan, I. Aravena, J. Rios, and S. Oren, "Optimal black start allocation for power system restoration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 33, no. 6, pp. 6766–6776, 2018.
- [17] D. Lindenmeyer, H. W. Dommel, and M. M. Adibi, "Power system restoration - a bibliographical survey," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 23, no. 3, pp. 219–227, 2001.
- [18] A. Ketabi, A. Karimizadeh, and M. Shahidehpour, "Optimal generation units start-up sequence during restoration of power system considering network reliability using bi-level

- optimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 104, no. May 2018, pp. 772–783, 2019.
- [19] L. H. Fink, K. L. Liou, and C. C. Liu, “From generic restoration actions to specific restoration strategies,” *Power Syst. Restor. Methodol. Implement. Strateg.*, vol. 10, no. 2, pp. 237–244, 2000.
- [20] J. Quiros-Tortos and V. Terzija, “A graph theory based new approach for power system restoration,” 2013 IEEE Grenoble Conf. PowerTech, POWERTECH 2013, 2013.
- [21] J. Quirós-Tortós, P. Wall, L. Ding, and V. Terzija, “Determination of sectionalising strategies for parallel power system restoration: A spectral clustering-based methodology,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 116, pp. 381–390, 2014.
- [22] C. Wang and V. Vittal, “Closure to Discussion of “OBDD-Based Sectionalizing Strategies for Parallel Power System Restoration”,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 3, p. 1714, 2012.
- [23] W. Sun, C. C. Liu, and L. Zhang, “Optimal generator start-up strategy for bulk power system restoration,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 26, no. 3, pp. 1357–1366, 2011.
- [24] D. N. A. Talib, H. Mokhlis, M. S. A. Talip, K. Naidu, and H. Suyono, “Power system restoration planning strategy based on optimal energizing time of sectionalizing Islands,” *Energies*, vol. 11, no. 5, pp. 1–17, 2018.
- [25] N. H. Jenkins-johnston, “United States of America,” *Free. Peac. Assem. Eur.*, vol. 30326, no. 404, 2018.
- [26] R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, and H. Wayne, *Electrical Power Systems Quality*, Second. 2017.
- [27] CONELEC, CALIDAD DEL TRANSPORTE DE ELECTRICIDAD Y DEL SERVICIO DE TRANSMISIÓN Y CONEXIÓN EN EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO, no. 15. Ecuador, 2008, pp. 1–22.
- [28] Ieee, *IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices IEEE*, vol. Std 1366-2. New York: IEEE, 2012.
- [29] D. L. Johnston and B. K. Johnson, “Comparison of reliability indices with the effect of protection failure for an electrical to hydrogen distribution system,” 41st North Am. Power Symp. NAPS 2009, pp. 1–5, 2009.
- [30] H. Lotfi, M. B. Elmi, and M. Zarif, “Reliability assessment for power grid by adding wind farm,” 2nd Int. Congr. Technol. Commun. Knowledge, ICTCK 2015, no. Ictck, pp. 170–176, 2016.
- [31] A. K. Rajeevan, P. V. Shouri, and U. Nair, “ARIMA modeling of wind speed for wind farm reliability analysis,” 2014 Annu. Int. Conf. Emerg. Res. Areas Magn. Mach. Drives, pp. 3–7, 2014.
- [32] L. Xie, L. Cheng, and Y. Gu, “Reliability assessment at day-ahead operating stage in power systems with wind generation,” *Proc. Annu. Hawaii Int. Conf. Syst. Sci.*, pp. 2245–2251, 2013.
- [33] P. Kundur et al., “Definition and Classification of Power System Stability,” *IEEE Trans. POWER Syst.*, vol. 19, no. 2, pp. 1387–1401, 2004.
- [34] Z. Shuai, C. Shen, X. Liu, Z. Li, and Z. John Shen, “Transient angle stability of virtual synchronous generators using lyapunov’s direct method,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 4, pp. 4648–4661, 2019.
- [35] A. Wiszniewski, “New criteria of voltage stability margin for the purpose of load shedding,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 3, pp. 1367–1371, 2007.
- [36] M. Sun, X. Nian, L. Dai, and H. Guo, “The design of delay-dependent wide-area DOFC with prescribed degree of stability α for damping inter-area low-frequency oscillations in power system,” *ISA Trans.*, vol. 68, pp. 82–89, 2017.
- [37] N. Amjady and F. Fallahi, “Determination of frequency stability border of power system to set the thresholds of under frequency load shedding relays,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 51, no. 10, pp. 1864–1872, 2010.

Predicción de consumo energético y su relación con la medida de conductividad térmica de materiales aislantes

Energy consumption prediction and its relationship with thermal conductivity measurement of insulating materials

Rolando Carvajal¹, José Luis Solís¹, Héctor Vergara¹, Nacari Marín^{1*}

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

*Autor de correspondencia: nacari.marin@utp.ac.pa

RESUMEN— Mediciones de temperatura y de análisis de consumo de energía fueron realizados en un recinto del Centro Regional de Azuero de la Universidad Tecnológica de Panamá durante el periodo de un (1) año, para analizar el efecto que produce el utilizar materiales con potencial para aislar térmicamente en el consumo energético. Para este estudio se contemplaron dos materiales comerciales: poliestireno expandido y el *gypsum* con lámina de aluminio. Para la medida de conductividad térmica se utilizó un prototipo de medición de conductividad térmica, basado en la norma ASTM-C177 y en la ley de Fourier de transferencia de calor por conducción. La medida de conductividad térmica se realizó también en tres materiales a base de fibras naturales y almidón de yuca: paja de arroz, bagazo de caña y estopa de coco. Con los datos de temperatura, consumo energético y de conductividad térmica obtenidos, se presenta una relación que permite predecir el potencial de aislamiento y consumo de nuevos materiales, considerando en primer lugar a aquellos materiales que se consideran desechos agroindustriales, con el objetivo de darle a estos desechos un valor agregado.

Palabras clave— *Aislantes, aprovechamiento de desechos, conductividad térmica, consumo de energía, fibras naturales, temperatura.*

ABSTRACT— Temperature measurements and energy consumption analysis were carried out in an enclosure of the Regional Center of Azuero of the Technological University of Panama during the period of one (1) year, to analyze the effect produced by using materials with potential to thermally insulate in energy consumption. Two commercial materials were considered for this study: expanded polystyrene and gypsum with aluminum foil. For the thermal conductivity measurement, a prototype of thermal conductivity measurement was used, based on the ASTM-C177 standard and the Fourier law of conductive heat transfer. The thermal conductivity measurement was also performed on three materials based on natural fibers and cassava starch: rice straw, cane bagasse and coconut bast. With the data of temperature, energy consumption and thermal conductivity obtained, a relationship is presented that allows predicting the potential for insulation and consumption of new materials, considering first those materials that are considered agro-industrial wastes, with the aim of giving This waste an added value.

Keywords— *Insulators, waste utilization, thermal conductivity, energy consumption, natural fibers, temperature.*

1. Introducción

El consumo energético elevado se debe principalmente al uso de sistemas de acondicionamiento de aire y de refrigeración. Las altas temperaturas promueven un mayor uso de los sistemas de acondicionamiento de aire. En Panamá, informes emitidos por el Banco Mundial, indican que el consumo de energía eléctrica por cápita asciende a 2,064.18kWh

(para el año 2014). Este valor de consumo ubica a Panamá en la posición número uno, siendo el país que más consume energía de la región [1]. Esta situación justifica la búsqueda de alternativas que incluyen planes de eficiencia energética. Se estima que el consumo de energía en Panamá crece entre 5% y 6% al año. Para el año 2015 se calculó que el 60% del total de la energía que ingresó al sistema nacional fue consumido en

Citación: R. Carvajal, J. Solís, H. Vergara y N. Marín, "Predicción de consumo energético y su relación con la medida de conductividad térmica de materiales aislantes", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 5 marzo de 2020. **Recibido con correcciones:** 5 marzo de 2020. **Aceptado:** 11 de enero de 2021.

DOI: 10.33412/idt.v17.1.2930

Copyright: 2021 R. Carvajal, J. Solís, H. Vergara y N. Marín. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

acondicionamiento de aire y refrigeración [2], [3]. En el año 2018, se reportó un ascenso en el consumo de 2,291kWh [4].

Por la naturaleza de las construcciones que se llevan a cabo en Panamá, por medio de las ventanas se transfiere calor por radiación solar. La poca permeabilidad y un pobre aislamiento térmico hacen que el consumo de aire acondicionado sea excesivo, debido a la entrada de calor mediante los mecanismos de convección, radiación y conducción [5]. En países del hemisferio norte, el aislamiento apropiado de las edificaciones asegura el bienestar de sus ocupantes durante los meses de invierno. Así mismo, en regiones desérticas, en casas cavadas en la roca (cuevas), el espesor de las paredes juega un papel importante en el aislamiento del recinto [6].

En la península de Azuero, conocido como la región “arco seco” de Panamá, las temperaturas ambientales oscilan entre 28°C y 33°C a lo largo del año [7]. Estas altas temperaturas inciden directamente en el consumo eléctrico de la región. Por otra parte, de acuerdo con el Informe del Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), de la Contraloría General de la República de Panamá para el año 2017/2018 [8], en la península de Azuero se registran 10,960 hectáreas sembradas de arroz y 24,320 hectáreas sembradas de maíz, siendo estos dos rubros los más importantes del país. Del total de hectáreas sembradas, en dicho informe se presenta la cantidad de la producción que se utiliza para la venta, para el consumo del agricultor, consumo animal (en el caso del maíz), para semilla y para otros fines. También se registran pérdidas de 100 hectáreas para el arroz y de 650 hectáreas para el maíz, en las provincias que conforman la península de Azuero. Esta información indica la cantidad potencial que pudiera ser aprovechada como materia prima en la elaboración de materiales naturales para aislamiento térmico. Así como para el caso de los rubros arroz y maíz, se deben considerar otros materiales de desecho y/o pérdida que se generan durante la cosecha y procesamiento de otros rubros y que pueden ser aprovechados para diferentes aplicaciones.

En este artículo se muestra el análisis de los resultados obtenidos durante las pruebas de medida de temperatura exterior e interior, así como los datos de consumo energético obtenidos a partir de un analizador de calidad de energía del salón CE-10, ubicado en el edificio del Centro Experimental de la Universidad Tecnológica de Panamá, sede Azuero, utilizando distintos materiales

aislantes y con potencial de aislamiento, que son considerados como desecho agroindustrial. Se presenta una relación de predicción en función de las temperaturas medidas, el coeficiente de conductividad térmica del material empleado como aislante y el consumo energético del recinto. La reutilización de materiales justifica el estudio desde el punto de vista de búsqueda del valor agregado de materiales que normalmente son considerados como desechos. De aquí la posibilidad de emplearlos como aislantes térmicos. Este trabajo forma parte del trabajo de graduación “Evaluación y análisis térmico y energético de distintos tipos de materiales para aislamiento térmico dentro de un recinto”.

2. Pruebas Experimentales

Pruebas de medición de temperatura y de medición de consumo energético se llevaron a cabo, considerando tres casos: sin aislamiento del recinto, con poliestireno expandido y con *gypsum* (y lámina de aluminio). Estas pruebas se realizaron de forma simultánea a lo largo de un año, entre los meses de mayo 2018 y mayo 2019, a fin de obtener mediciones de diferentes meses del año y considerando las dos estaciones que se presentan en la Península de Azuero: estación seca y estación lluviosa. Las mediciones de temperatura y de consumo de energía se registraron con y sin aislamiento térmico, para poder contar con información sobre el comportamiento de las mediciones con respecto a las mismas condiciones climáticas, es decir, para la misma época del año. Durante una misma semana se registraron los datos del salón sin aislamiento (lunes y jueves), con poliestireno expandido (martes y miércoles), con *gypsum* y lámina de aluminio (jueves y viernes). Mensualmente se obtuvieron 8 medidas, lo que da un total de 96 mediciones para cada uno de los tres casos en un año.

La medición de conductividad térmica se realizó en cinco materiales, dos de ellos comerciales (poliestireno expandido, *gypsum* con lámina de aluminio) y el resto, materiales a base de fibras naturales y almidón de yuca (paja de arroz, bagazo de caña y estopa de coco). La medida de conductividad térmica permite definir el coeficiente térmico del material y su potencial para aislar.

Con los datos obtenidos a partir de las tres pruebas realizadas se presenta una relación para la predicción del potencial de aislamiento y de consumo de energía de nuevos materiales, considerando en primer lugar a aquellos materiales que se consideran desechos

agroindustriales, con el objetivo de darle a estos desechos un valor agregado.



Figura 1. Vista del salón CE-10 modelado con Sketchup V19.0.685

2.1. Medición de temperatura

Las mediciones de temperatura en el exterior e interior del espacio estudiado se realizaron mediante el sistema JRMETER, con base en una plataforma Arduino y sensores de temperatura DHT22 [9]. Este sistema fue presentado en [10], y consiste en un sistema de análisis energético y de temperatura de las ventanas de un aula de clase con y sin aislamiento térmico, con la diferencia del cambio en el tipo de sensor empleado. Para la selección del sensor apropiado, se procedió a programar 3 tipos de sensores de temperatura, específicamente el LM335 [11], DHT11 [12] y DHT22 [9], a través de una conexión sencilla mediante Arduino. Cada sensor midió temperatura durante una hora. Se observó la estabilidad de las mediciones captadas y con un termómetro digital calibrado CIE 305/307, se comprobaron los valores de temperatura obtenidos. En la figura 3 se puede apreciar que las temperaturas medidas por el sensor DHT22 se aproximan a los valores obtenidos con el termómetro calibrado.

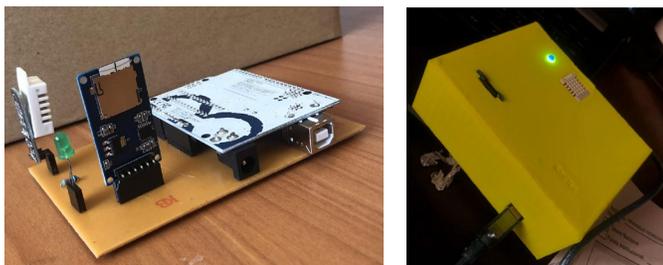


Figura 2. Dispositivo de medición de temperaturas JRMETER.

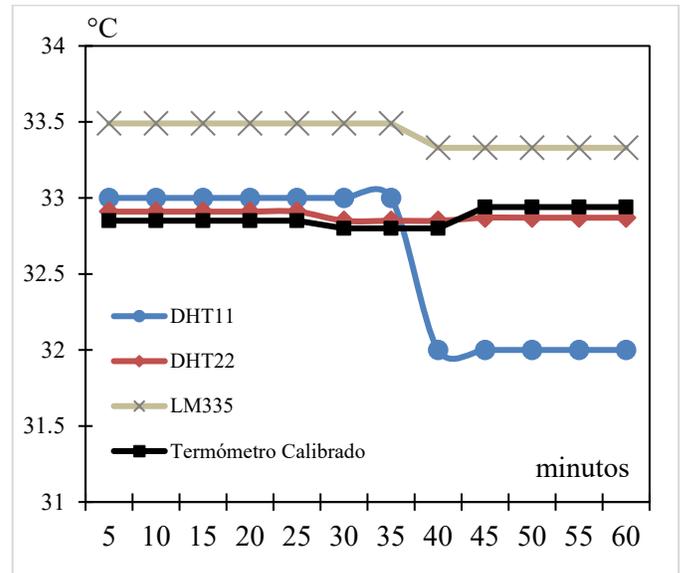


Figura 3. Comparación de los sensores

Para este estudio, se consideraron temperaturas promedio mensuales, ya que la temperatura no varía de manera significativa durante un mes, de acuerdo con los datos presentados por ETESA para los años 2018 y 2019 [7]. Esto permitió simplificar el análisis de datos, así como su representación gráfica. En la figura 4 se presentan los valores de temperatura exterior promedio, correspondiente a la temperatura ambiental de cada uno de los meses estudiados, tanto los registrados por el JRMETER, como los valores proporcionados por ETESA, en la Estación de Los Santos [7].

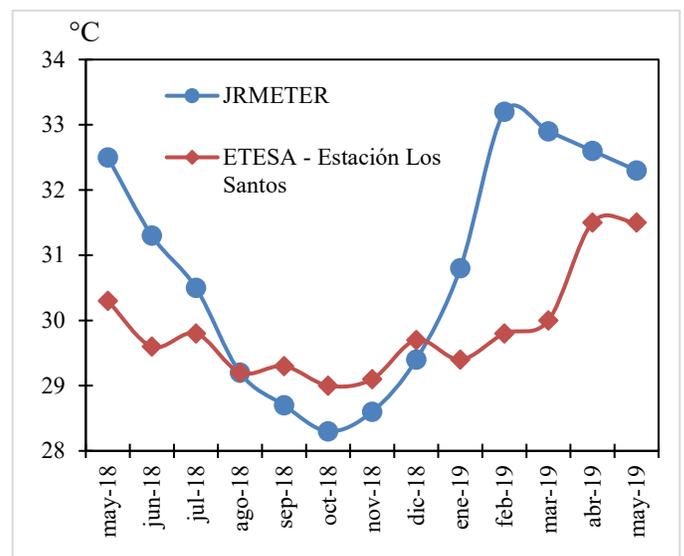


Figura 4. Temperatura exterior promedio mensual.

Por otra parte, se realizaron mediciones de temperaturas en el interior del recinto, considerando tres casos: sin aislamiento en las ventanas y aislando las mismas con materiales comerciales como el *gypsum* y el poliestireno expandido (ver figura 5). En la gráfica se presentan los valores promedio de las temperaturas interiores medidas a lo largo del año de prueba.

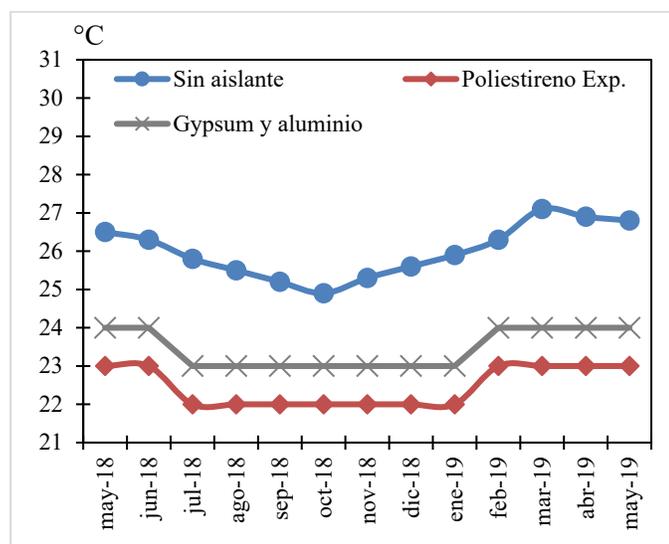


Figura 5. Temperaturas interiores promedio mensual.

2.2. Medición de consumo energético

El consumo eléctrico diario fue medido utilizando un analizador de calidad de energía AEMC PowerPad Modelo 3945-B [13].

Para las medidas sin aislante, se tienen intervalos de consumos de entre 14,995 y 16,650Wh, para el poliestireno expandido, los intervalos de medición oscilan entre 11,550 y 12,578Wh, y para el *gypsum*, los intervalos de medición oscilan entre 12,900 y 13,793Wh. Como resultado se tiene que el poliestireno expandido es el material que presenta un menor consumo de energía, con respecto al resto de condiciones evaluadas al colocarlo como aislante en ventanas.

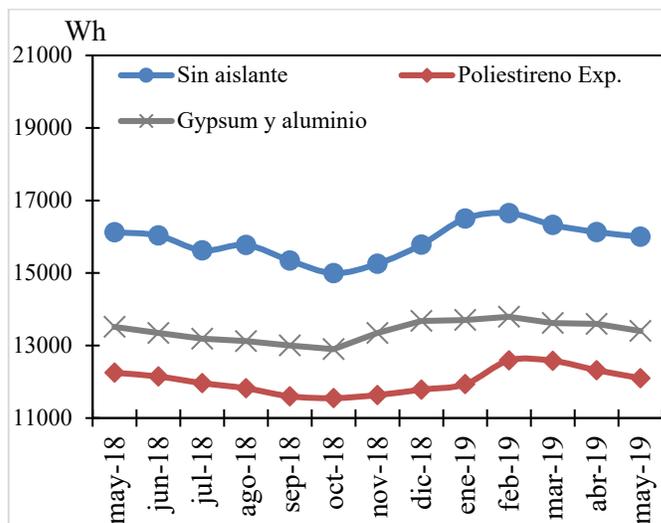


Figura 6. Consumo Eléctrico promedio mensual.

2.3. Medición de conductividad térmica

La medición de conductividad térmica se realizó en cinco materiales, dos de ellos comerciales (poliestireno expandido y *gypsum* con lámina de aluminio) y el resto, materiales base de fibras naturales y almidón de yuca (paja de arroz, bagazo de caña y estopa de coco). Para la medida de conductividad térmica se utilizó un prototipo de medición de conductividad térmica, basado en la norma ASTM-C177 [14] y en la ley de Fourier de conducción de calor unidimensional. La ley de Fourier incorpora características mecánicas del proceso de transferencia de calor en una propiedad física conocida como conductividad térmica (k), del gradiente de temperatura (dT/dx) y el área (A):

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Para muchos materiales la conductividad térmica se pueda aproximar el valor del coeficiente k con una función lineal de la temperatura sobre intervalo de temperatura limitados [5]. En la Tabla 1 se muestran los valores del coeficiente de conductividad térmica medidos para los materiales en estudio, así como dos valores de referencia obtenidos en la bibliografía para los materiales comerciales.

Tabla 1. Conductividad térmica medida

| Material | K promedio medido (W/m·K) | K bibliografía (W/m·K) [5] |
|------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Poliestireno expandido | 0.033 | 0.034 |

| | | |
|-------------------|-------|----------------|
| Gypsum y aluminio | 0.043 | 0.044 |
| Estopa de coco | 0.065 | Material nuevo |
| Bagazo de caña | 0.055 | Material nuevo |
| Paja de arroz | 0.050 | Material nuevo |

A partir del análisis de los resultados obtenidos, los materiales naturales estudiados demostraron una conductividad térmica baja, y se consideran como valores adecuados para aislar térmicamente. Los valores de conductividad térmica entran en el intervalo de aislamiento térmico que va desde 0.020W/m·K hasta 0.085W/m·K [5].

3. Predicción de consumo energético

A partir de los datos obtenidos de consumo y temperatura en el recinto estudiado, se procedió a hacer un gráfico de Consumo vs Temperatura, como se muestra en la figura 7. De la línea de tendencia, se obtuvo una relación de tipo polinómica de tercer grado y el valor del coeficiente de determinación (R^2) fue de 0.9892 (ecuación 2).

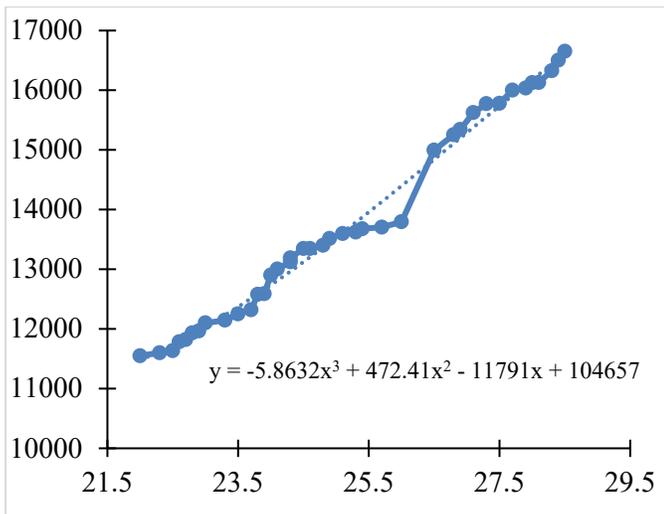


Figura 7. Gráfico de consumo (kWh) vs Temperatura (°C).

$$P = -5.8632(T_F)^3 + 472.41(T_F)^2 - 11791(T_F) + 104657 \quad (2)$$

Donde P representa la potencia en Wh y T_F la temperatura interior del recinto en °C. En la ecuación (3) no es más que una variación de la ley de Fourier, despejada para el valor de T_F .

$$T_F = T_c - \frac{E\dot{Q}}{kA} \quad (3)$$

La variación de temperatura en 3 dimensiones espaciales al cuadrado en función del cambio de la temperatura con respecto al tiempo.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4)$$

En forma abreviada el operador laplaciano para el sistema de coordenadas rectangular.

$$\nabla^2 T + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

Siendo ∇^2 es independiente del sistema de coordenadas, la forma anterior es útil si se desea trabajar en coordenadas cilíndricas y esféricas.

Para este estudio se consideró un caso con flujo de calor unidimensional y limitando la forma geométrica del estudio, en este caso una pared. Así mismo se consideró un material sin variación en su composición, estructura y espesor, con el objetivo de obtener una relación de predicción relativamente sencilla, con condiciones que permiten aproximar la situación de estudio a un problema real. El régimen en estudio fue el estacionario. No se consideraron los efectos de los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación.

4. Relación de predicción: Interpretación

Una vez expresada la ecuación (2), que relacionó la temperatura, el consumo (potencia) y el coeficiente de conductividad térmica, esta debe ser capaz de satisfacer las necesidades y de predecir el consumo energético y su relación con la medida de conductividad térmica de materiales con potencial para aislar.

De la relación de predicción (2) se pudieron obtener valores para los siguientes materiales naturales, que son considerados como desechos agroindustriales y que a su vez fueron caracterizados térmicamente con el medidor de conductividad térmica creado.

Tabla 2. Predicción de consumo para materiales aislantes con datos de conductividad térmica medido.

| Mes | Paja de arroz (kWh) | Fibra de Coco (kWh) | Bagazo de caña (kWh) |
|--------|---------------------|---------------------|----------------------|
| may-18 | 13.54 | 13.59 | 13.56 |
| jun-18 | 13.38 | 13.42 | 13.39 |
| jul-18 | 13.22 | 13.26 | 13.23 |

| | | | |
|--------|-------|-------|-------|
| ago-18 | 13.15 | 13.3 | 13.17 |
| sep-18 | 13.03 | 13.07 | 13.04 |
| oct-18 | 12.93 | 12.97 | 12.94 |
| nov-18 | 13.38 | 13.42 | 13.39 |
| dic-18 | 13.71 | 13.76 | 13.72 |
| ene-19 | 13.74 | 13.78 | 13.75 |
| feb-19 | 13.82 | 13.87 | 13.84 |
| mar-19 | 13.65 | 13.70 | 13.67 |
| abr-19 | 13.63 | 13.67 | 13.64 |
| may-19 | 13.43 | 13.48 | 13.45 |

De acuerdo con los datos obtenidos, se puede observar que los tres materiales a base de fibras naturales presentan predicciones de consumo por debajo de los datos experimentales (ver figura 6). Por otra parte, las predicciones de consumo se encuentran dentro del intervalo de los valores obtenidos experimentalmente con el poliestireno expandido y el *gypsum*.

Los valores de consumo obtenidos por medio de la relación matemática con respecto a la predicción del consumo deben corroborarse con la medición experimental, tal y como se realizó con los materiales comerciales. Sin embargo, la relación obtenida permite analizar de forma preliminar el potencial de aislamiento de dichos materiales. Esto, a su vez, permite tomar decisiones a la hora de elegir los materiales potenciales antes de proceder con la experimentación, considerando que la toma de datos se realice durante al menos un año.

Además, tomando en cuenta los valores de predicción de consumo obtenidos para los diferentes materiales a base de fibras naturales, se puede plantear en un paso siguiente un estudio de las propiedades higroscópicas del material, considerando la capacidad de absorber la humedad del entorno, así como un estudio de la difusión de vapor del material. Esto implica profundizar en el proceso de fabricación de los nuevos materiales a base de fibra, considerando la pulverización del material, y, por otra parte, la disposición y orientación de las fibras, para lograr las mejores condiciones de construcción de este.

En este estudio se aplicó la ecuación de conducción de calor unidimensional. Para ajustar los datos de energía versus temperatura se debe realizar un estudio del gradiente de temperatura, en lugar de considerar la diferencia de temperatura que se asume en el caso ideal. Esto implica una modelización matemática que incluya los efectos del espesor real de la pared (bloque, repello y pintura).

A partir de los resultados obtenidos, se espera continuar con el presente estudio incluyendo los efectos de los mecanismos de transferencia de calor por convección y radiación.

5. Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos ha sido posible plantear las siguientes conclusiones:

- Mediante las mediciones de conductividad térmica de los materiales naturales estudiados se comprobó su potencial de aislamiento. El que presentó menor conductividad térmica fue la paja de arroz con $0.050\text{W/m}\cdot\text{K}$, seguido del bagazo de caña el cual presentó $0.055\text{W/m}\cdot\text{K}$ y por último la estopa de coco con $0.065\text{W/m}\cdot\text{K}$, siendo la paja de arroz el mejor aislante de los materiales naturales estudiados.
- Es importante recalcar que, con estos resultados, se obtiene una referencia en cuanto a la implementación de materiales aislantes dentro de un recinto para la reducción en el consumo energético.
- El estudio de estos materiales naturales contribuye con los esfuerzos existentes en materia de cuidado del medio ambiente, considerando el aprovechamiento de residuos que normalmente son considerados como desecho, dándoles un valor agregado.
- Los datos arrojados en esta investigación dieron como resultado una relación de predicción de energía en función de la temperatura. Dicha relación contempla el efecto del comportamiento de la temperatura a lo largo del año y la energía requerida para bajar la temperatura. En otras palabras, el consumo energético requerido para acondicionar térmicamente el recinto.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Ingeniero Secundino Villarreal, Ingeniero Roberto Cigarruista, al Ingeniero José Muñoz y al Lic. Carlos Murillo por su asistencia técnica y evaluación del trabajo realizado para el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] G. B. Mundial, «Banco Mundial.» [En línea]. Available: <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC?end=2014&locations=PA&start=1971&view=chart>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [2] «Central America Data,» 7 Marzo 2018. [En línea]. Available: https://www.centralamericadata.com/es/article/home/Los_numeros_de_la_energia_elctrica. [Último acceso: 27 Febrero 2020].

- [3] L. Prensa, «E&N,» 13 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://www.estrategiaynegocios.net/inicio/839794-330/panam%C3%A1-se-dispara-consumo-de-energ%C3%ADa-el%C3%A9ctrica>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [4] «Index Mundi,» 1 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.indexmundi.com/map/?v=81000&r=xx&l=es>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [5] Y. A. Cengel, Transferencia de Calor y Masa, Mc Graw Hill.
- [6] D. Bozsaky, «Historical Development and Special Building Structures of In-earth Embedded Houses,» Acta Technica Jaurinensis, 2015.
- [7] «ETESA Unimos Panamá con Energía,» [En línea]. Available: https://www.hidromet.com.pa/datos_diarios.php?estacion=9&mes=12&ano=2019%20.. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [8] INEC, «Informe del Instituto Nacional de Estadística y Censo,» 20 Mayo 2019. [En línea]. Available: https://www.contraloria.gob.pa/INEC/Publicaciones/Publicaciones.aspx?ID_SUBCATEGORIA=60&ID_PUBLICACION=481&ID_IDIOMA=1&ID_CATEGORÍA=15. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [9] N. Electronics. [En línea]. Available: <https://naylampmechatronics.com/sensores-temperatura-y-humedad/58-sensor-de-temperatura-y-humedad-relativa-dht22-am2302.html>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [10] J. R. Carvajal, «Sistema de análisis energético y de temperatura de las ventanas de un aula de clase con y sin aislamiento térmico,» RIC, vol. 4, n° 2, pp. 26-30, 2019.
- [11] «Electrónicos Caldas,» [En línea]. Available: <https://www.electronicoscaldas.com/es/sensores-de-temperatura/194-sensor-de-temperatura-lm35.html>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [12] «Picuino,» [En línea]. Available: <https://www.picuino.com/es/arduprog/sensor-dht11.html>. [Último acceso: 27 Febrero 2020].
- [13] «AEMC PowerPad Modelo 3945-B, Manual de Instrucciones,» AEMC Instruments.
- [14] S. T. M. f. S.-S. H. F. M. a. T. T. P. b. M. o. t. G.-H.-P. Apparatus, «ASTM,» [En línea]. Available: <https://www.astm.org/Standards/C177>.



Conducta del concreto reforzado bajo el efecto de diferentes microclimas

Behavior of reinforced concrete under the effect of different microclimates

Alda Cedeño¹

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

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

RESUMEN— Las edificaciones de concreto ubicadas en ambientes urbano y/o marinos experimentan ataques por agentes externos que ocasionan daños en su estructura, disminuyen la durabilidad y afectan la apariencia física de estas ocasionando gastos de mantenimiento o reparación. Debido a la problemática antes descrita, el presente estudio contempla el análisis a pequeña escala del hormigón expuesto en tres estaciones en Panamá que experimentan diferencias ambientales. La duración de la investigación fue de 1.5 años. Las experiencias aplicadas consistieron en análisis fisicoquímicos, espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). Los laboratorios usados pertenecen a la Universidad Tecnológica de Panamá y el Instituto SMITHSONIAN de Panamá. Los resultados se exponen a 1 y 1.5 años de exposición mediante tablas, microfotografías, y espectros de absorbancia. Aplicar los diferentes métodos fue valioso pues se pudo ver la evolución de los parámetros evaluados en el tiempo.

Palabras claves— Concreto, espectros IR, ettringita, portlandita.

ABSTRACT— Concrete buildings located in urban and/or marine environments experience attacks by external agents that cause damage to their structure, decrease durability and affect the physical appearance of these, resulting in maintenance or repair costs. Due to the problem described above, this study covers small-scale analysis of exposed concrete at three stations in Panama experiencing environmental differences. The duration of the investigation was 1.5 years. Applied experiences consisted of physicochemical analyses, Fourier Transform infrared spectroscopy (FTIR) and scanning electron microscopy (SEM). The laboratories used belong to the University of Technology of Panama and the SMITHSONIAN Institute of Panama. The results are exposed to 1 and 1.5 years of exposure using tables, microphotographs, and absorbance spectra. Applying the different methods was valuable as you could see the evolution of the parameters evaluated over time.

Keywords— Concrete, IR spectra, ettringite, portlandite.

1. Introducción

Las edificaciones ubicadas en climas urbanos y marinos exhiben daños en el concreto de las mismas [1]. La problemática causada consiste en la disminución de la resistencia, la durabilidad y el deterioro de la apariencia física de las obras de hormigón. Los agentes agresivos que afectan a una estructura pueden ser gases, líquidos o partículas sólidas. Su agresividad está en función del entorno, la velocidad de penetración y el transporte involucrado [2]. Los agentes ambientales de una región en particular se denominan carga ambiental localizada o microclima [3]. Para abarcar regiones ambientales diferentes se escogió en el Pacífico: Tocumen, en la región central: Coclé y en el Mar Caribe: Sherman

ligadas a las estaciones meteorológicas de ETESA, denominadas Tocumen, Antón y Bocas del Toro, respectivamente [4]. Por último, se ubicó una estación de control en Tocumen.

El objetivo de este estudio es el de presentar los resultados obtenidos, al exponer por un año y medio losas de concreto armado a tres microclimas diferentes, sometidas a ensayo de espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). También se hace un análisis del cambio en pH en este periodo. La investigación desarrollada permite un mejor entendimiento de las variables puntuales del clima que afectan la durabilidad del concreto. Contribuirá con el

Citación: A. Cedeño, "Conducta del concreto reforzado bajo el efecto de diferentes microclimas," *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no_modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 6 de marzo de 2020. **Recibido con correcciones:** 12 de enero de 2021. **Aceptado:** 12 de enero de 2021.

DOI: 10.33412/it.v17.1.2931

Copyright: 2021 A. Cedeño. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

ingeniero civil y profesionales afines en el entendimiento fundamentado y valioso de los daños ocurridos y sus causas a fin de tomar la mejor decisión de diseño, mantenimiento o reparación de las edificaciones.

Estudios a pequeña escala sobre el concreto evidencian la existencia de una matriz de cemento hidratado, una red de poros, portlandita, ettringita, y una fase acuosa que están en equilibrio con los hidratos del cemento, pero no con el entorno. El equilibrio del que hablamos puede verse roto por el ataque de ácidos y producir una caída de pH [5]. El cemento consiste en sílice (S), alúmina (A), óxido de calcio (C), óxido de hierro (F), y los principales compuestos son silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A), y ferroaluminato tetracíclico (C_4AF). Las principales fases en la microestructura de pasta de cemento hidratado son el silicato cálcico (CH), silicato de calcio hidratado (C-S-H), ettringita, monosulfatos, partículas de cemento no hidratados (UH) y poros de aire. La portlandita mantiene el pH en valores altos protegiendo al concreto armado. Sin embargo, es soluble en agua y sufre lixiviación con facilidad. Al reaccionar con sulfatos se cristaliza, dando lugar a la expansión, fisuras y por último a la formación de ettringita. Al microscopio la portlandita tiene la apariencia de plaquetas hexagonales delgadas. Mientras que, la ettringita se presenta en forma de varillas alargadas. otorga cohesión al concreto cuando crece como un enrejillado en la superficie, el peligro aparece cuando se deposita y crece en las fisuras del concreto porque se acumula, se expande y ejerce presión al área donde está ubicada [6].

Para analizar la microestructura del hormigón es muy útil el microscopio electrónico de barrido que muestra imágenes en tres dimensiones, en un ambiente de alto vacío mediante un haz electrónico puntual. La ventaja que posee es la de hacer visibles objetos no perceptibles a simple vista [7]. Este método nos provee información por ejemplo de constituyentes indeseables del concreto, productos de hidratación del cemento, fisuras, y poros,

Por otro lado, el FTIR nos brinda un espectro de la absorbancia o transmitancia de energía en función del número de onda en cm^{-1} . Es una técnica que se basa en la Teoría Cuántica y es válida siempre que la molécula vibre. Para leer un espectro debemos conocer el rango del IR o infrarrojo que va desde 1.3×10^4 a 33 cm^{-1} . En esta región no podemos distinguir la luz infrarroja, por eso

nos apoyamos en los instrumentos. El IR reconoce el enlace químico y para identificar una molécula debemos observar los picos característicos que se forman en el espectro correspondiente. Existen tres zonas en el IR: el cercano (NIR) va desde 1.3×10^4 a 4000 cm^{-1} , medio (MIR) de 4000 a 625 cm^{-1} , y lejano (FIR) de 625 a 33 cm^{-1} . El NIR reconoce electrones de valencia en moléculas radicales, MIR reconoce el enlace covalente, y FIR se reconoce el enlace iónico. El enlace covalente se da entre átomos no metálicos (C, H, N, O, S). El espectrómetro mide el movimiento de la molécula y registra la radiación absorbida y la banda del IR en la que se da el máximo movimiento. Todas las señales las lee usando la Transformada de Fourier incorporada en su programa. El análisis espectral reconoce la presencia o no de grupos funcionales (dos átomos enlazados). Los grupos funcionales presentan frecuencias características o únicas. De 33 a 1500 cm^{-1} se le llama huella digital porque se ve las características de los grupos, de 1500 a 4000 cm^{-1} se les llama frecuencia de grupo. Esta zona se ha dividido en tres partes: de 4000 a 2500 cm^{-1} se ubica la frecuencia del hidrógeno, de 2500 a 2000 cm^{-1} , tenemos los triples enlaces y de 2000 cm^{-1} en adelante ocurren los doble enlaces [8], [9].

2. Materiales y métodos

Para cumplir con el objetivo propuesto, se diseñó una investigación experimental, sin manipulación de las condiciones de muestreo. Confeccionamos 12 losas de concreto reforzado. Por sus dimensiones, distancia y tiempo entre los sitios de monitoreo y mano de obra el tipo de muestra es no probabilística [10]. La metodología empleada consistió en dejar 3 especímenes en cada una de las estaciones de monitoreo y una en la de control. Para establecer la relación entre el efecto de deterioro o daño causado por los contaminantes ambientales o agentes externos de las zonas atlántica, central y pacífica sobre las losas expuestas, las mismas se ensayaron a 1 y 1.5 años de exposición con el fin de registrar datos observables y medibles en cada una de ellas. Este proceso inició en octubre de 2017 y finalizó en junio de 2019. los resultados se contrastaron con la losa patrón que reposó en la Extensión de la UTP en Tocumen en condiciones controladas.

2.1 Materiales

Para satisfacer las características de durabilidad, trabajabilidad y economía, el concreto a utilizar se dosificó por el método de volumen absoluto [11]. Se requirió concreto para losas reforzadas en ambas direcciones, expuestas a la humedad en ambientes desde insignificante a severo en presencia de cloruros y sulfatos. La resistencia a la compresión especificada es de 280kg/cm^2 (4000 lb/pulg^2) a los 28 días, no hay datos estadísticos disponibles, el revenimiento debe estar entre 25 y 75mm y agregado de tamaño máximo nominal de 25mm, bien graduado, con masa específica relativa seca en el horno de 2.68, absorción de 0.5%. Cada espécimen tendrá dimensiones de $0.6\text{m} \times 0.6\text{m} \times 0.15\text{m}$, el cemento utilizado es tipo HE (alta resistencia inicial) con masa específica relativa de 3.0, sin aditivos y sin aire incluido. El agregado fino es una arena natural, con masa específica relativa seca al horno de 2.64%, con absorción de 0.7% y un módulo de finura de 2.8 con relación agua/cemento igual a 0.4.

2.2 Métodos

Pasado el tiempo estipulado en cada caso, a cada losa se le extrajo un cilindro de 2 pulgadas para la realizar los ensayos fisicoquímicos y las técnicas de caracterización FTIR y SEM. Los núcleos de 2 pulgadas se les hizo un corte de 4 capas de 1cm de espesor, con el fin de verificar la afectación del ambiente desde la superficie hasta el interior. Correspondiendo el número de identificación 1 a la capa de la superficie o expuesta, sucesivamente 2, 3, 4 a las capas siguientes hacia el interior de la probeta. El espécimen resultante puede verse en la siguiente figura 1.



Figura 1. Probeta de 2 pulgadas cortada en capas de 1cm.

Las losas se confeccionaron a finales de octubre del 2017, se sometieron a curado y fueron trasladadas a las

estaciones en enero de 2018. En enero de 2019, un año después, se realizó el primer juego de ensayos. En junio de 2019 tuvo lugar al segundo juego de análisis. Los ensayos practicados son espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM). Los métodos se seleccionaron debido a la necesidad de contar rápidamente con información más detallada sobre productos de la hidratación y microestructura del concreto.

El ensayo por FTIR se practicó a las capas 1, 2, 3, y 4 de los cilindros arriba descritos. En la preparación de las muestras se utilizó el método KBr [12]. Las combinaciones muestra-KBr utilizadas en la confección de las pastillas fue de 1:10 (0.025 de muestra a 0.25 de KBr), la presión aplicada estuvo en el rango de 7.5 a 8.5 toneladas. El análisis se realizó a cada espécimen a 1 y año, 1.5 años. Los espectros mostrados están en el rango de infrarrojo medio ($4000 - 400\text{cm}^{-1}$), en los mismos se muestran la cantidad de energía absorbida por número de longitud de onda en cm^{-1} .

El análisis morfológico se realizó mediante el análisis de imágenes por Microscopia Electrónica de Barrido (SEM). En la preparación de la muestra o el “*sputtering*”, inicialmente se trató de recubrir con una capa muy fina de oro a las muestras para otorgarles propiedades conductoras. Sin embargo, presentaron molestias por tal motivo, se tomó la decisión de ensayarlas sin recubrimiento.

En todos los casos, presentamos la fotografía SEM solo de la capa 1 o superficial, tomadas a escala de 1,000KX ($10\mu\text{m}$) a 5,00KX ($2\mu\text{m}$).

En el análisis de pH se utilizó un potenciómetro multiparámetros de pH. Para la espectroscopia infrarroja de Transformada de Fourier contamos con Agilent Technologies, modelo Cary 660, Serie FTIR Spectrometer y la prensa hidráulica digital PIKE CrushIR, con una capacidad de 15 toneladas de presión en la confección de las pastillas. Mientras que, para el análisis morfológico contamos con el microscopio electrónico de barrido Zeiss Evo 40 VP. Los demás ensayos se realizaron con los equipos tradicionales normados [13].

3. Resultados y análisis

3.1 Inspección visual de los especímenes expuestos

En la figura 3 se muestran las losas con el deterioro físico sobre su superficie. Este ejercicio se realizó a 1 y 1.5 años de exposición a la intemperie:

Inspección visual a 1 año de exposición

- Control: se mantuvo sin variación apreciable en la superficie durante el estudio.
- Coclé: experimentó oquedades y fisuras superficiales. El acero no tenía oxidación apreciable.
- Tocumen: presentó una superficie cuarteada compuesta por grietas menudas superficiales en forma hexagonal irregular de 3mm de ancho aproximadamente y una consistencia blanda.
- Sherman: a 1 años de exposición presentó cambio de coloración superficial, oquedades, fisuras menudas superficiales sin patrón característico y corrosión en el acero expuesto.

Inspección visual a 1.5 años de exposición

- Control: se mantuvo sin variación apreciable en la superficie durante el estudio.
- Coclé: experimentó oquedades y fisuras superficiales. El acero expuesto exhibió oxidación.
- Tocumen: presentó una superficie cuarteada compuesta por grietas menudas superficiales en forma hexagonal irregular de 3mm de ancho aproximadamente y una consistencia blanda. El acero expuesto exhibió oxidación.
- Sherman: presentó cambio de coloración superficial, oquedades, fisuras menudas superficiales sin patrón característico. El acero expuesto estaba visiblemente corroído.

Este resultado puede deberse a las condiciones ambientales de cada sitio: acción solar, evaporación, y la acción del viento sobre la superficie del concreto.



Figura 2. Losas expuestas por 1 año: a) Control, b) Coclé, c) Tocumen, d) Sherman.

3.2 Medición de pH

En la tabla 1 observamos los valores obtenidos de pH en cada muestra por profundidad a 1 y 1.5 años:

pH por profundidad

El pH de todas las muestras se comportó como se esperaba, siendo la capa superficial la más vulnerable al ambiente, excepto el pH a los 1.5 años de la muestra de Coclé en la capa 4 que se obtuvo un valor de 11.57.

Comparación de pH a 1 y 1.5 años

Los resultados se muestran por estación:
Control tuvo un aumento de pH en la muestra al pasar de 1 a 1.5 años.
Coclé experimentó un aumento de pH al pasar de 1 a 1.5 años, excepto en la capa 4.
Tocumen y Sherman presentaron un aumento en pH en las capas interiores 2,3, y 4. En ambas muestras la capa superficial o la que está al contacto directo al ambiente presentaron caída en los valores de pH evidenciando la vulnerabilidad de la superficie del concreto frente al ambiente del entorno.

Tabla 1. Determinación de pH en concreto expuesto

| Tipo de muestra: Concreto reforzado expuesto a 3 tipos de ambientes naturales. | pH Cloruros (UAMC); ASTM 1218 | |
|--|-------------------------------|----------|
| | 1 año | 1.5 años |
| Muestra expuesta a: | | |
| Control | | |
| 1 | 11.93 | 12.12 |
| 2 | 12.19 | 12.52 |
| 3 | 12.44 | 12.59 |
| 4 | 12.58 | 12.57 |
| Coclé | | |

| | | |
|----------------|-------|-------|
| 1 | 11.62 | 12.54 |
| 2 | 12.49 | 12.26 |
| 3 | 12.57 | 12.54 |
| 4 | 12.61 | 11.57 |
| Tocumen | | |
| 1 | 11.70 | 11.43 |
| 2 | 11.49 | 12.57 |
| 3 | 12.54 | 12.56 |
| 4 | 12.51 | 12.55 |
| Sherman | | |
| 1 | 12.22 | 11.93 |
| 2 | 12.46 | 12.50 |
| 3 | 12.55 | 12.61 |
| 4 | 12.52 | 12.58 |

3.3 Resultados de ensayo por FTIR

3.3.1 Espectros por profundidad

En las figuras 3-6 se presentan por espectros FTIR de las muestras de concreto: de control y las de los sitios identificados como Coclé, Panamá y Colón, expuestas a 1 año en estos ambientes. En cada figura se presentan 4 espectros correspondientes a las 4 profundidades estudiadas: la muestra 1 que corresponde a la capa superficial, y las muestras 2, 3 y 4 obtenidas a 1, 2 y 3 cm de profundidad desde la superficie, respectivamente.

En términos generales se observa un patrón FTIR muy parecido al primer año en los 4 sitios y en las 4 profundidades:

En la muestra de la superficie (patrón 1) se observan las siguientes características en el patrón FTIR: una banda ancha y de intensidad media próxima a 3500cm^{-1} atribuida al grupo OH del agua y otras especies hidratadas; una banda próxima a 1400cm^{-1} atribuida a grupo carbonilo (CO_3^{2-}), que es la de mayor intensidad en el espectro; una banda ancha y de intensidad media entre 900 a 1200cm^{-1} ; que puede obedecer a la superposición de dos grupos químicos en el cemento hidratado: el gel C-S-H ($970\text{-}1080\text{cm}^{-1}$) y al SO_4^{2-} , lo cual dificulta resolver esta banda; a 875cm^{-1} se observa una banda bien definida de intensidad media que se puede atribuir al CO_3^{2-} y al enlace Al-O y Al-OH; y otra banda próxima a 700cm^{-1} débil, que se puede atribuir igualmente al CO_3^{2-} . La presencia de las bandas a 1400 , 875 y 700cm^{-1} , sugieren la existencia del fenómeno de carbonatación a nivel superficial en los 4 sitios, lo cual acontece por efecto de la reacción del CO_2 ambiental con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Se puede observar, que la intensidad relativa de la banda próxima a 1400cm^{-1} con respecto a la banda en el rango de $900\text{-}1200\text{cm}^{-1}$, es del espectro de Tocumen es mayor con respecto al control y las estaciones de Coclé y Sherman, lo que sugiere que el nivel de Carbonatación de

esta estación es mayor, y esto explica por la alta densidad de tráfico terrestre e incluso aéreo [14].

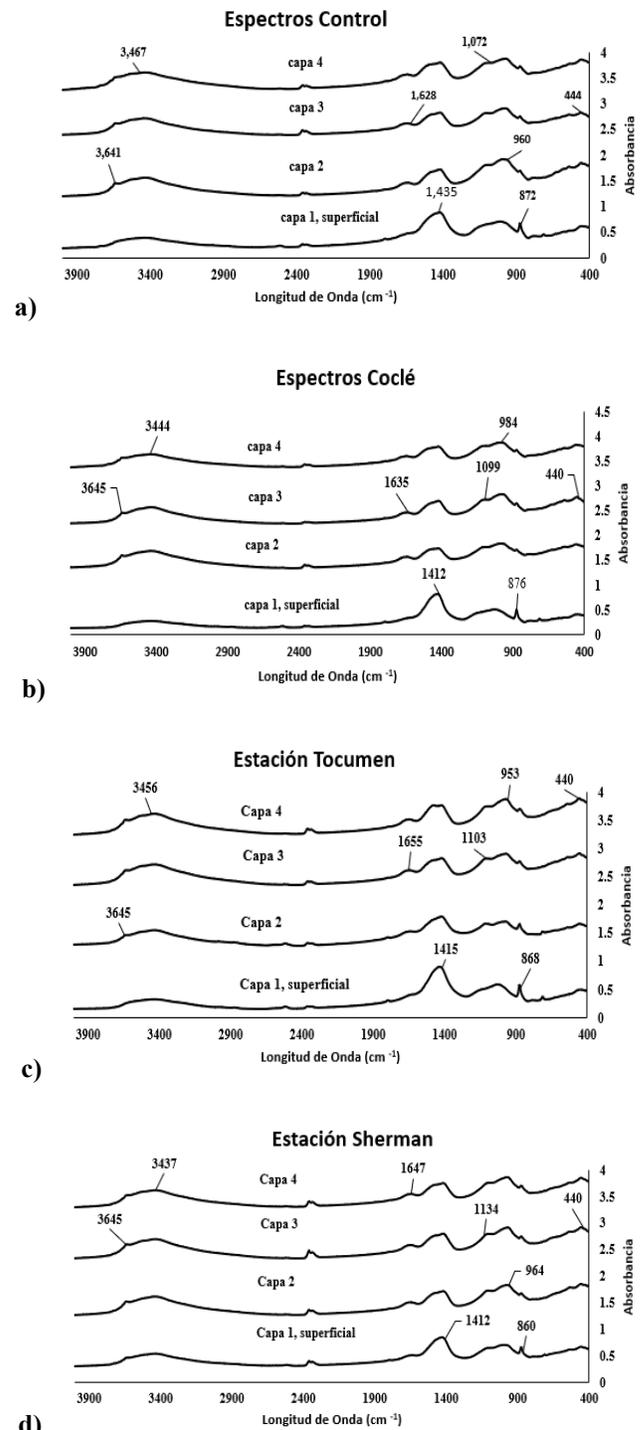


Figura 3. Espectros FTIR por profundidad: a) Control, b) Coclé, c) Tocumen, d) Sherman

En las muestras de 1, 2 y 3cm de profundidad desde la superficie (patrones 2, 3 y 4 respectivamente de cada

sitio), se observan las siguientes características en el patrón FTIR: una banda ancha y de intensidad media próxima a 3500cm^{-1} atribuida al grupo OH del agua y otras especies hidratadas, pero en este caso de mayor intensidad; una banda próxima a 1400cm^{-1} atribuida a grupo carbonilo (CO_3^{2-}), pero que disminuye su intensidad relativa en el espectro; una banda ancha que es la de mayor intensidad en el espectro entre 900 a 1200cm^{-1} ; que obedece a la superposición del gel C-S-H ($970\text{-}1080\text{cm}^{-1}$) y al grupo SO_4^{2-} , lo cual dificulta resolver esta banda; a 875cm^{-1} se observa una banda bien definida de intensidad que disminuye su intensidad y que se puede atribuir al CO_3^{2-} y al enlace Al-O y Al-OH. La banda próxima a 700cm^{-1} que aparece con intensidad débil en la muestra de superficie (y que se atribuye al CO_3^{2-}), en este caso desaparece. En los cuatro sitios, aparece una banda débil próxima a 3600cm^{-1} , que se puede atribuir a portlandita, ettringita y el C-S-H, lo cual es un indicio del mayor nivel de hidratación del cemento, a mayor nivel de profundidad. Igualmente aparece una banda a 1600cm^{-1} que se atribuye a la presencia de H_2O , así como al agua de constitución del SO_4^{2-} . Se observa igualmente una banda débil próxima a 1100cm^{-1} , que se puede atribuir tanto a la presencia de ettringita como el C-S-H. En vista que la banda próxima a 1400cm^{-1} presenta una intensidad menor que la banda en el rango de $900\text{-}1200\text{cm}^{-1}$, se puede indicar en estas 3 profundidades la muestra presenta una mejor condición, con menor probabilidad de ocurrencia de carbonatación, ya que la capa superficial representa una barrera o protección adecuada.

3.3.2 Comparación de espectros de las muestras expuestas a 1 y 1.5 años de exposición

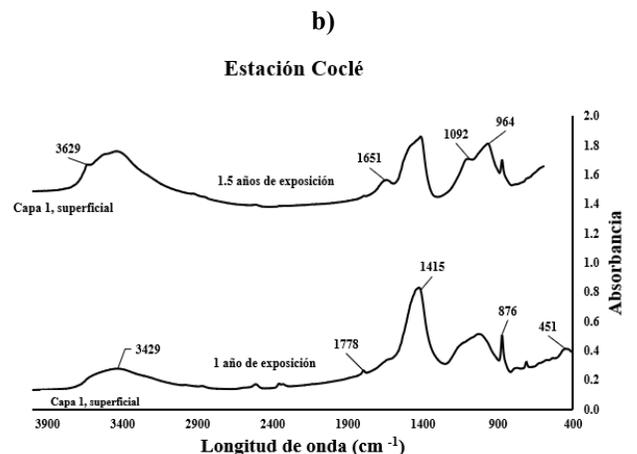
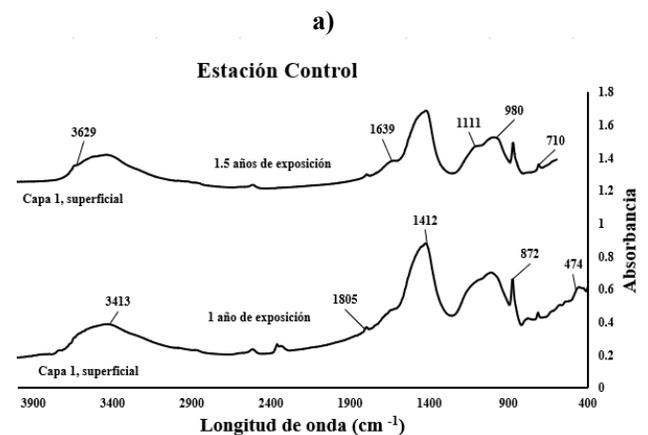
En este caso sólo se evaluará la muestra superficial.

Muestra Control: a 1.5 años no existe prácticamente diferencias significativas con respecto a la muestra de 1 año de exposición, y que se explicó en el punto 3.3.1

Muestras Coclé: a 1.5 años de exposición, en la muestra de la superficie, aparecen bandas adicionales a las descritas en el 3.3.1: una banda a 3600cm^{-1} , una banda a 1600cm^{-1} ; se observa un incremento en la intensidad relativa de las bandas a 3500cm^{-1} y a $900\text{-}1200\text{cm}^{-1}$; se observa, además, la disminución de la banda a 1400cm^{-1} . El incremento relativo de la banda en el rango de $900\text{-}1200\text{cm}^{-1}$, que se atribuye a ettringita y el C-S-H, es un indicio del mayor nivel de hidratación del cemento, a mayor tiempo de exposición. Esto significa que a 1.5 años la muestra presenta una mejor condición, con menor probabilidad de ocurrencia de carbonatación.

Muestras de Tocumen: a 1.5 años no existe prácticamente diferencias significativas con respecto a la muestra de 1 año de exposición, y que se explicó en el punto 3.3.1 lo que sugiere esta muestra se sigue exponiendo bajo condiciones de carbonatación, como se explicó previamente.

Muestras de Colón: a 1.5 años existe poca diferenciación respecto a la muestra de 1 año de exposición, y que se explicó en el punto 3.3.1 y en este caso, la intensidad relativa de la banda de 1400cm^{-1} con respecto al rango de 900 a 1200cm^{-1} , se incrementa por lo cual, hay evidencia del proceso de carbonatación.



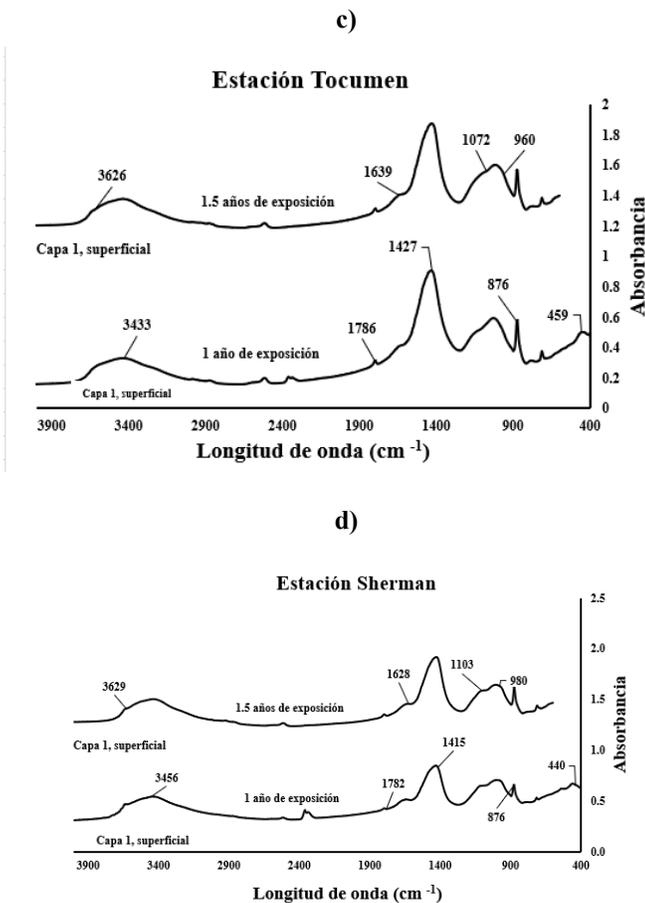


Figura 4. Espectros por estación comparados a 1 y 1.5 años.
a) Control, b) Coclé, c) Tocumen, d) Sherman.

3.4 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

3.4.1 Resultado a un año de exposición

En la figura 5a y 5b se presenta las imágenes SEM de la muestra de concreto Control, obtenida a nivel superficial. Se puede evidenciar, en la figura 5a), una morfología en la pasta hidratada con los siguientes micro defectos: (1) micro fisuras sobre los granos ($2\mu\text{m}$ de ancho), (2) poros con material en su interior, (3) gel amorfo, (4) cristales en forma de aguja, (5) cristales en forma de capas, (6) poros irregulares vacíos. En la figura 5b), se presenta una imagen SEM de un área seleccionada, a mayor magnitud, donde se puede apreciar con mayor precisión algunos de estos micro defectos: (1) el gel amorfo sobre la matriz, (2) fisuras finas en granos (3) gel amorfo rodeando los granos (4) cristales en forma hexagonal (5) cristales en forma de capas [5], [6],[15], [16], [17].

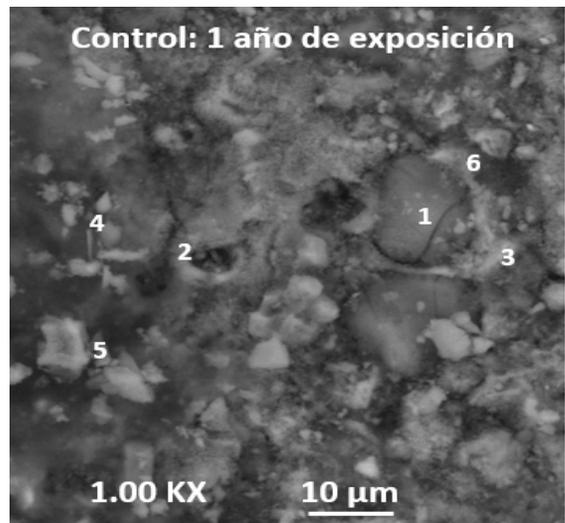


Figura 5a. Fotografía SEM, muestra control.

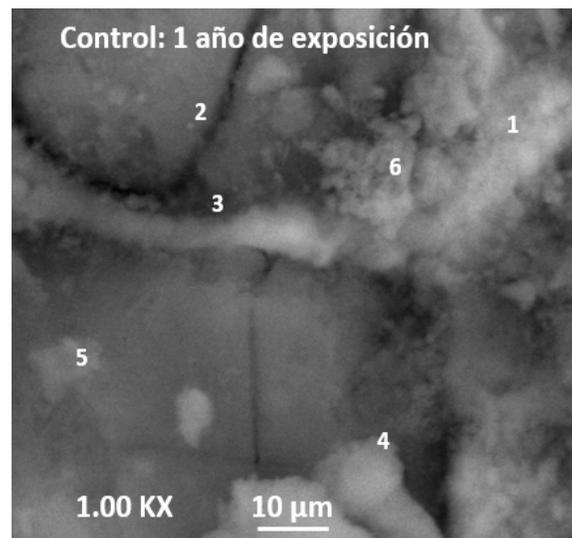


Figura 5b. Fotografía SEM, muestra control

La figura 6 presenta la imagen SEM de la muestra de concreto expuesta en la estación Coclé. En ella encontramos la microestructura del cemento hidratado, con (1) bloques blancos y cristales granulares desde $5\mu\text{m}$, (2) fracturas ($8\mu\text{m}$ de ancho), (3) poros irregulares (4) cristales dispersos (5) fisuras finas y cristales en fisura [5], [6],[15],[16].

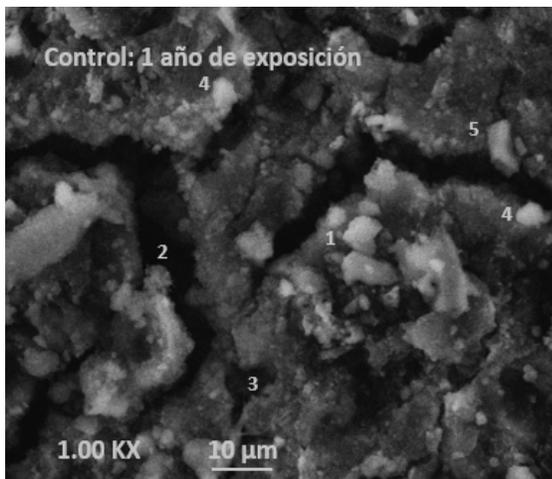


Figura 6. Fotografía SEM, muestra Coclé.

En la figura 7 se presenta la imagen SEM del concreto de la estación Tocumen. Se observa: (1) poros y cristales en forma de escamas adheridas a la superficie, (2) morfología con bloques amorfos, (3) poros irregulares limpios, (4) fisuras finas de $1\mu\text{m}$ de ancho, (5) cristales trigonales o que hacen sus paredes 60° entre sí y cristales incrustados en las fisuras. Refleja un proceso de hidratación completo y vidrio amorfo [18], [19], [20], [21].

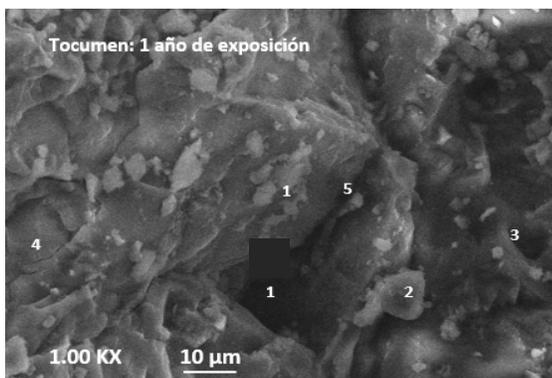


Figura 7. Fotografía SEM del concreto de la estación Tocumen.

La microestructura de la muestra de concreto expuesta en la estación de Sherman se presenta en la figura 8, y corresponde a una morfología granular. En la figura (8a) se puede apreciar: (1) cristales amorfos granulares, de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, (2) granos finos en la superficie, (3) poros con material dentro, (4) poros irregulares limpios, (5) fisuras finas de $2\mu\text{m}$ de ancho, (6) gel amorfo, muy parecidos a C-S-H. En la figura 8b se observa (1) el C-S-H ampliado [15], [16][17].

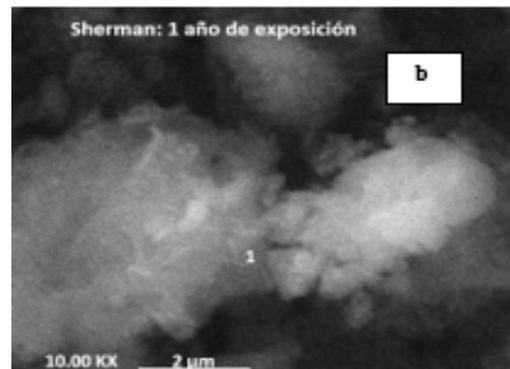
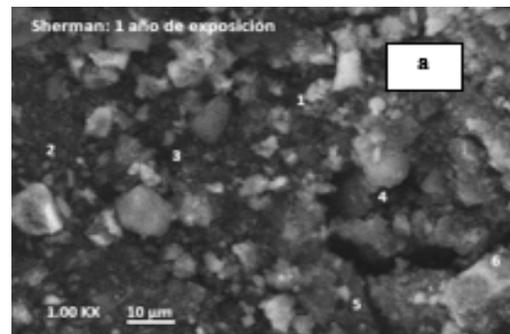


Figura 8. Fotografía SEM, muestra Sherman.

3.5 Resultados a 1.5 años de exposición

Las figura 9 corresponden a la estación Control el cual presenta el proceso de hidratación completa, una gran cantidad de cristales de hidróxido de calcio (CH) e hidróxido de calcio hidratado (C-S-H) cubriendo la matriz, (1) vacíos limpios, (2) cristales en forma de placas cruzadas en ángulos de 60° , (3) cristales hexagonales en forma de placas planas, (4) cristales sobre los vacíos, (5) fisuras de $0.02\mu\text{m}$. [18], [19], [20], [21].

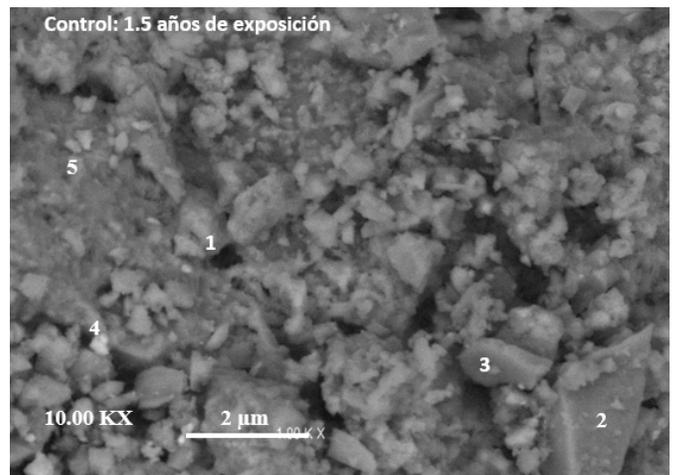


Figura 9. Fotografía SEM, muestra Control.

A 1.5 años, el concreto de la estación Coclé evolucionó, como puede verse en la figura 10 sobre una superficie completamente hidratada (1) abundantes cristales en forma de bloques blancos, (2) cristales en forma de aguja adheridos a la superficie, (3) fisuras de 1 μm de ancho, (4) cristales en forma de escamas sobre la superficie, (5) poros irregulares, (6) cristales dentro de poros, y 11b) la misma zona ampliada muestra: (1) gel blanca, y (2) cristales blanquecinos parecidos a cristales de CH similar a los productos de hidratación del cemento como el hidróxido de calcio CH, el hidróxido de calcio hidratado C-S-H y la ettringita y portlandita. (3) poros irregulares [15], [19], [20], [21].

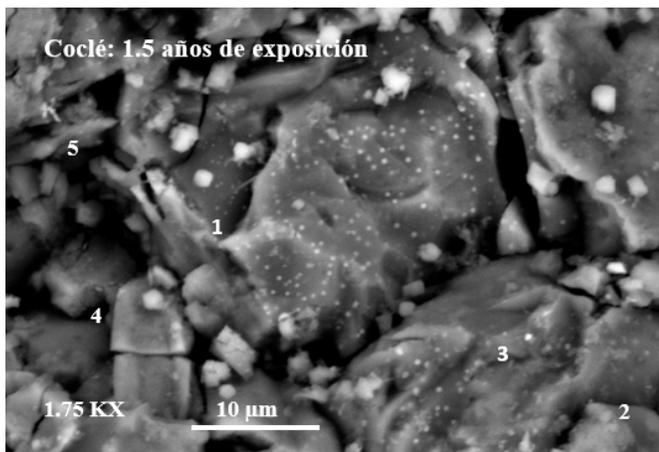


Figura 10. Fotografía SEM, muestra Coclé.

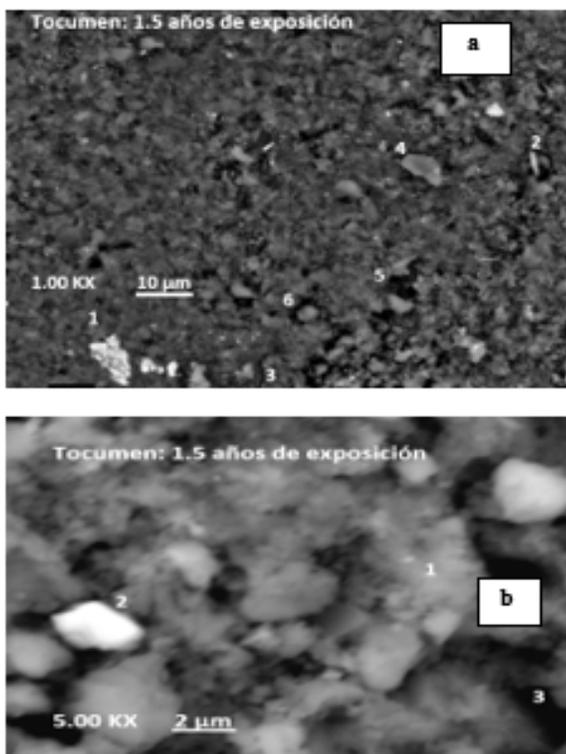


Figura 11. Fotografía SEM, muestra Tocumen.

Tocumen por su parte, presentan en la figura 11 a) una morfología hidratada de forma definida, con (1) cristales blanquecinos sobre la superficie hasta de 10 μm de largo, (2) esporádicos cristales en forma de aguja, (3) fisuras de 1 μm de ancho, (4) cristales en forma de escamas sobre la superficie, (5) poros irregulares, (6) cristales dentro de poros, y 11b) la misma zona ampliada muestra: (1) gel blanca, y (2) cristales blanquecinos parecidos a cristales de CH similar a los productos de hidratación del cemento como el hidróxido de calcio CH, el hidróxido de calcio hidratado C-S-H y la ettringita y portlandita. (3) poros irregulares [15], [16], [17], [21], [22].

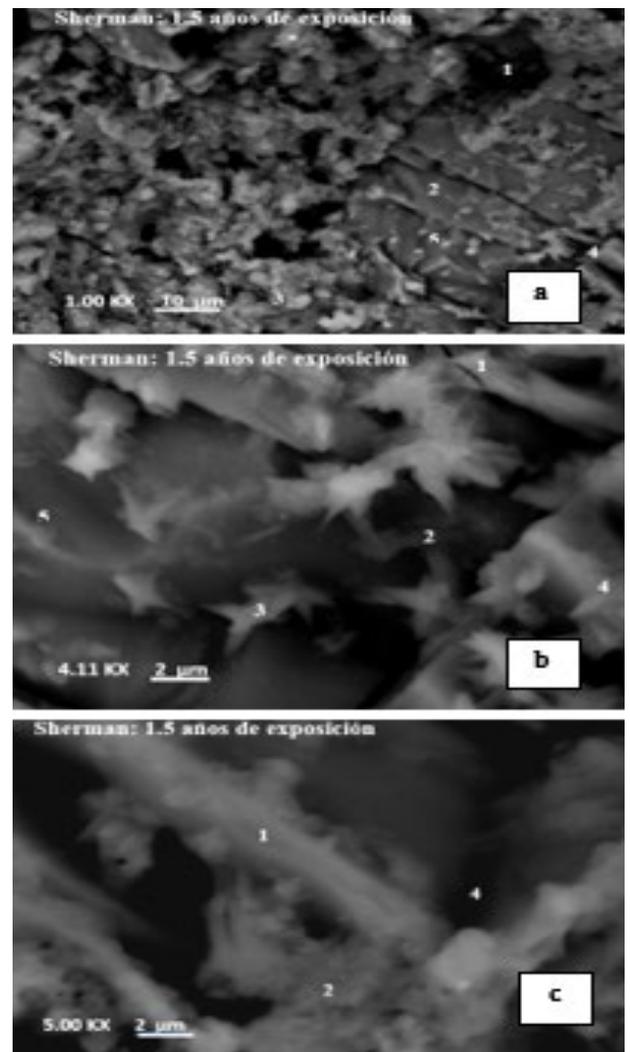


Figura 12. Fotografía SEM, muestra Sherman.

La muestra procedente de la losa expuesta en Sherman se presenta una matriz hidratada en la figura 12a) tenemos (1) poros irregulares vacíos, (2) fracturas

de granos en forma de placas, (3) cristales blanquecinos, (4) cristales en forma de placas entrecruzadas formando ángulos de 60°, (5) cristales blanquecinos diminutos. En la figura 12 b, representa la misma zona ampliada y se pueden observar: (1) fisuras de 0.01 μm de ancho, (2) poros irregulares, (3) cristales hexagonales de diferente grosor, prismáticos, cristales como agujas parecidos a ettringita y portlandita, (4) cristales en forma de placas entrecruzadas formando ángulos de 60° [6], [15], [16], [17], [20], [21], [22].

4. Conclusiones

Al comparar los resultados de la inspección visual, cambio en el pH, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y microscopia electrónica de barrido (SEM):

- En el tiempo: la muestra de Tocumen presentó mayor deterioro en el concreto con respecto al control y las estaciones de Coclé y Sherman, lo que sugiere que el nivel de Carbonatación de esta estación es mayor, y esto se explica por la alta densidad de tráfico terrestre e incluso aéreo de la zona. Mientras que la carbonatación en la muestra de Sherman se incrementa en menor grado que la muestra de Tocumen. Por otro lado, la muestra correspondiente a Coclé presentó disminución en el mismo proceso.
- Por profundidad: las muestras presentan una mejor condición, con menor probabilidad de ocurrencia de carbonatación, ya que la capa superficial representa una barrera o protección adecuada.
- En los cuatro sitios, aparece una banda débil próxima a 3600 cm^{-1} y las imágenes SEM a 1.5 años muestran cristales que se puede atribuir a portlandita, ettringita y el C-S-H, lo cual es un indicio del mayor nivel de hidratación del cemento, a mayor nivel de profundidad.
- Los métodos de análisis empleados se complementaron en el análisis del concreto bajo la influencia de los contaminantes ambientales al que fueron expuestos los especímenes en el tiempo de duración del estudio. Con ellos puede hacerse análisis diversos de correlación entre las muestras, tiempo y condiciones de exposición.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Licenciada Fidedigna V. de Ortiz, al Ingeniero Ernesto Escobar, Licenciado Mario Miranda, José M. Pérez personal técnico del Laboratorio de Análisis Industriales y Ciencias Ambientales

(LABAICA) y al Licenciado, Jesús Villar del Centro Experimental de Ingeniería (CEI) de la Universidad Tecnológica de Panamá por su apoyo técnico en el desarrollo del estudio.

De la misma forma, reconocemos a la Universidad Tecnológica de Panamá y el Instituto Smithsonian de Investigaciones Tropicales el apoyo suministrado por poner a disposición el equipo utilizado en la presente investigación.

REFERENCIAS

- [1] J. Domínguez, A. González, "Valoración Técnica del deterioro de las edificaciones en la zona costera de Santa Fe", Arquitectura y Urbanismo, Vol. 36, La Habana, abril 2015.
- [2] O. Hernández, C.J. Mendoza, "Durabilidad e infraestructura: retos e impacto socioeconómico", Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. 17, No.1, México, marzo 2006.
- [3] E. I. Moreno, F. Ayuso-Blanco, A. Torres, O. Troconis, "Efecto del ambiente en el concreto reforzado después de cuatro años de exposición urbana en Yucatán (Proyecto DURACON)", diciembre 2009, Artículo de Investigación, Ingeniería, vol. 13, núm. 3, septiembre-diciembre, 2009, pp. 53-60 Universidad Autónoma de Yucatán Mérida, México
- [4] Estaciones hidrometeorológicas de ETESA, [en línea], <http://www.hidromet.com.pa/documentos.php?sec=17>, [; http://www.hidromet.com.pa/estaciones_satelitales.php?
- [5] T. Moragues, (2013): "Proceso de Hidratación del cemento Portland microestructura del hormigón", ataque de ácidos, E.T.S.I Caminos, Canales y Puertos, [en línea], (Sliders 43/53), <https://www.yumpu.com/es/document/read/14336336/proc-esos-de-hidratacion-del-cemento-portland-microestructura-del->
- [6] M. Giraldo, J. Tobón. "Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación", Dyna, vol. 73, núm. 148, pp. 69-81, Universidad Nacional de Colombia Colombia], marzo, 2006.
- [7] J. Renau; M. Faura, "Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido", Sección de Microscopia Electrónica, Centro de Investigación, Hospital La Fe, Avda. Campanar, 21 46009 Valencia.
- [8] Lectura de Espectro IR (Infrarroja), (2016), Ciencias Químicas y Farmacología, Categoría: Ciencias y Tecnología, [en línea], Video, <https://www.youtube.com/watch?v=pI1NVcOXWHk> [Jan. 20, 2020].
- [9] Regiones básicas de un espectro de infrarrojo, [en línea], pdf, fig. IR-6 "Algoritmo para la interpretación de señales en 1850-1540 cm^{-1} , www.depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Tablas_IR_15437.pdf
- [10] A. Porras V., "Tipos de muestreo", Centro de Investigación en Geografía y Geomática (CONACYT), México, p 2-6, 2017.

- [11] ACI 211 (Práctica Estándar de Elección de las Proporciones para el Concreto Normal, de densidad elevada y masivo)
- [12] T. Piqué, A. Vásquez, "Uso De Espectroscopía Infrarroja Con Transformada De Fourier (FTIR) En El Estudio De La Hidratación Del Cemento", Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, Volumen 3, No.2, pg. 62-71, enero-junio 2012,
- [13] Normas A.S.T.M. - C 1157, C 109-M, C187, C191, C 451, C 430, C 204, C 188, C 151, C185, C 1038, Ensayos físicos al Cemento tipo HE.
- [14] M. Palacios, C. Sierra, F. Puertas, "Métodos y Técnicas de caracterización de aditivos para el Hormigón", Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, nov. 2003, Vol. 53, No. 269, pp. 89-105.
- [15] M. T. Nooman, "Effect of Zeolite Inclusion on Some Properties of Concrete and Corrosion Rate of Reinforcing Steel Bars Imbedded in Concrete", Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Al-Azhar, University, Nasr City 11884, Cairo, Egypt. IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN: 2278-1684, p-ISSN: 2320-334X, Volume 13, Issue 6 Ver. I (nov. 2016), PP 51-59 www.iosrjournals.org
- [16] F. Qing, L. Beixing, Y. Jiangang, Y. Xiaolu, "Microstructural and Microanalytical Study on Concrete Exposed to Sulfate Environment", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering,
- [17] A. Hilal, "Microstructure of Concrete", Department Civil Engineering, University of Anbar, Iraq, oct. 2016, Available: <http://dx.doi.org/10.5772/64574>.
- [18] S. Ramírez, P. Cano-Barrita, F. Julián, C. Gómez-Yáñez, Caballero, "Propiedades de durabilidad en el hormigón y análisis microestructural en pastas de cemento con adición de mucíelago de nopal como aditivo natural", *Materiales de Construcción*, vol. 62, sept 2012, [online]
- [19] N. Xie, N. Cui, "Development of durable "green" concrete exposed to deicing chemicals via synergistic used of locally available recycled materials and multiscale modifiers", Feb 2018, Center for Environmentally Sustainable Transportation in cold Climates
- [20] J. Ortiz, A. Aguado, J. Roncero, M. Zermeno, "Influencia de la Temperatura Ambiental Sobre las propiedades de Trabajabilidad y microestructurales de Pastas y Morteros de cementos", *Investigación y Desarrollo*, [en línea], 2009, Vol. 1
- [21] S. Abduljabbar Yaseen, G. Abdaljabar Yiseen, Z. Li, "Elucidation of Calcite Structure of Calcium Carbonate Formation Based on Hydrated Cement Mixed with Graphene Oxide and Reduced Graphene Oxide", *ACS Omega* 2019, 4, [en línea]. Available: [Feb. 3, 2020].
- [22] T. Subbulakshmi, B. Vidivelli, "SEM Investigation for Microstructure in high performance Concrete with binary and ternary mixes", Article Info, *Elixir International Journal*, 2016, [en línea], Available: www.elixirpublishers.com

Estado del arte despacho óptimo de energía en plantas virtuales de generación basado en flujos dinámicos de potencia

State of the art optimal energy dispatch in virtual generation plants based on dynamic power flows

Darwin Mesías Canacuán Quishpe ^{1*}, Diego Francisco Carrión Galarza ¹

¹Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Salesiana, Ecuador

*Autor de correspondencia: darwin.canacuanq@gmail.com

RESUMEN— En el presente documento se presenta una revisión de investigaciones orientadas a centrales virtuales de generación (VPP) y metodologías para incluir este nuevo concepto dentro de los sistemas eléctricos de potencia. La naturaleza estocástica y aleatoria de las fuentes de energía renovable no convencionales crean problemas en la planificación del despacho de energía en sistemas eléctricos de potencia. Para determinar la operación conjunta de las diferentes fuentes de energía renovable no convencionales y los centrales de generación térmicas e hídricas, se ha desarrollado el concepto de planta virtual de generación, la cual considera en su formación fuentes de energía renovables no convencionales (eólica, solar) y al menos una planta de generación convencional, la misma que es utilizada para entregar la energía mínima que el mercado eléctrico contrate. Por lo tanto, para establecer un escenario que considere el ingreso de una central de generación virtual al sistema eléctrico de potencia y realizar el despacho óptimo de energía, se propone abordar el problema a través de flujos de potencia dinámicos tomando en cuenta las respectivas restricciones técnicas y económicas de equipos y elementos que conforman el sistema eléctrico de potencia.

Palabras clave— *Despacho Económico, Flujos de potencia, Fuentes de energía renovable (RES), Optimización, Planificación, VPP (Central virtual de generación), Sistema de administración de energía (EMS).*

ABSTRACT— This document presents a review of research aimed at virtual generation plants and methodologies to include this new concept in the electrical power systems. The stochastic nature and randomness of nonconventional renewable energy sources creates problems in the planning of energy dispatch. To determine the joint operation of the different renewable energy sources (distributed generation units), the concept of virtual power plants has been developed. Virtual power plants consider in their formation, unconventional renewable energy sources and at least one conventional generation plant, the same that is used to generate the minimum energy that is required in the market. Therefore, to establish optimal criteria for dispatching electric power in a virtual power plant, it is proposed to address the problem through dynamic power flow considering the respective economic and technical restrictions of electrical power systems.

Keywords— *Economic Dispatch, Energy management system (EMS), Power Flow, Renewable energy source (RES), Optimization, Planning, Virtual Power Plant (VPP).*

1. Introducción

El desarrollo e investigación de tecnologías para el uso de energías renovables en el proceso de generación de electricidad ha tenido grandes progresos, destacándose las energías eólica y solar, además de la contribución para tener un desarrollo sostenible de la sociedad y así reducir la contaminación ambiental, debido a que la energía renovable no convencional ha

comenzado a ser utilizada en mediana escala en el sistema eléctrico de potencia [1].

La estocacidad y aleatoriedad de las energías renovables no convencionales influyen en el funcionamiento del sistema eléctrico de potencia en términos de confiabilidad del sistema y la calidad de la energía entregada. La variación de la demanda hora a hora y día a día, hace que la operación del sistema eléctrico sea crítica por lo que la estabilidad del sistema

que integre una planta virtual de generación depende de una buena coordinación y supervisión entre la generación y abastecimiento de la carga. Una de las medidas propuestas para la integración de energías renovables no convencionales en la redes de transmisión sin causar efectos secundarios que afectan el correcto funcionamiento de la red eléctrica es la unión de generación de energía eléctrica renovable no convencional y sistemas de almacenamiento, que pertenezcan a un mismo territorio, para formar una micro red dentro del sistema eléctrico global [1]. La micro red formada sería capaz de operar aislada y conectada al sistema de potencia general de acuerdo con los requerimientos de operación. El desarrollo de este concepto es posible debido al gran avance en tecnologías de comunicación y transferencia de datos, lo que ha permitido un gran avance en los sistemas de control y monitoreo de las redes eléctricas, permitiendo la aparición de las redes eléctricas inteligentes [2]. Dentro del estudio de las redes eléctricas inteligentes y debido a las diferentes necesidades que aparecen en los sistemas de potencia y la utilización de energías limpias para la reducción del impacto ambiental, emerge el concepto de planta de generación virtual (VPP) [3].

Previas investigaciones para resolver problemas relacionados con el despacho óptimo de energía eléctrica, han empleado diferentes métodos de programación y técnicas de optimización, los métodos convencionales incluyen programación lineal, programación no lineal, método del gradiente, programación cuadrática, programación dinámicas, etc. [4], [5]. Estos métodos requieren demasiada memoria computacional y tiempo para su ejecución, por lo cual su aplicación en el mundo de los sistemas de potencia al ser de características no lineales es compleja. Estas debilidades pueden ser superadas utilizando algoritmos metaheurísticos o algoritmos evolutivos (EA) [4], [5]. Las soluciones al problema de optimización son definidas como casos particulares dentro de un conjunto de soluciones. La evolución del conjunto de resultados ayuda a encontrar mejores resultados, se pueden utilizar métodos como algoritmos genéticos (GA), Evolución estratégica (ES), Programación genética (GP), y Programación evolutiva (EP) [6].

El objetivo de este artículo es establecer una base

teórica acerca de las plantas virtuales de generación y su integración a sistemas eléctricos de potencia convencionales, con la realización de un despacho óptimo de la energía eléctrica por medio de flujos dinámicos de potencia.

En la sección dos del artículo se presenta el concepto de una planta virtual de generación. La sección tres aborda el concepto de flujos dinámicos de potencia. En la sección se presenta el problema de la optimización en sistemas eléctricos. En la sección cinco y seis se presentan una base teórica para la solución del despacho óptimo en una planta de generación virtual.

2. Planta virtual de generación (VPP)

Una planta de generación virtual (VPP) es una entidad virtual que involucra varios interesados y comprende tecnologías heterogéneas descentralizadas, formada por la inclusión de fuentes de energía renovables no convencionales, sistemas de almacenamiento, cargas controladas, central de energía térmica o hidroeléctrica.

Este conjunto de elementos deben actuar como una unidad acorde a un sistema de comunicación, sistema de control y sistema de gestión interno, para el despacho óptimo de energía eléctrica en el mercado eléctrico, con el objetivo de minimizar pérdidas y costos de generación [7]. En la figura 1 se representa un esquema general de una planta de generación virtual.

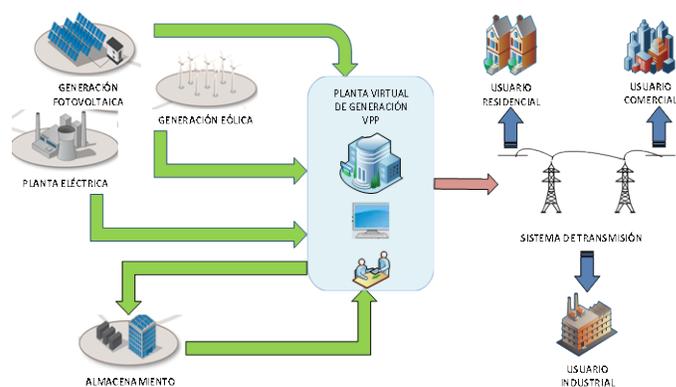


Figura 1. Planta de generación virtual (VPP).

El concepto de central o planta eléctrica virtual es un nuevo término en el sistema eléctrico asociado al desarrollo de la teoría e implementación de las redes eléctricas inteligentes. La base para el desarrollo del concepto de una planta virtual de generación es la unión

de centrales de generación de energía renovable no convencional (eólica y solar), sistemas de almacenamiento de energía y una planta de generación eléctrica con capacidad de inercia, como una entidad individual en el sistema eléctrico de potencia, debido a que una sola central de energía eólica o solar no pueden participar en el mercado de energía eléctrica por sus pequeñas capacidades de generación, por lo cual una VPP debe tener un sistema interno de gestión de la energía eléctrica (EMS), el cual debe actuar acorde a los contratos definidos en el mercado eléctrico, ya que si no entrega la energía contratada, la VPP obtendrá una penalización por parte del ente regulador del mercado eléctrico [8]. En las referencias [9], [10] se modela la entrega de energía en una VPP en dos etapas, en la primera etapa se considera las condiciones del mercado eléctrico, mientras que en la segunda etapa se regula la operación de la VPP.

El software y hardware relacionados con el sistema de potencia en una VPP deben considerar a los productores, consumidores y consumidores flexibles, en su modelo. Un consumidor flexible requiere de la existencia de tecnologías de comunicación y control, de forma que se pueda desplazar el consumo eléctrico hacia las horas del día más convenientes sin que signifique inconvenientes para el usuario.

La tecnología para la comunicación dentro de una planta de generación virtual se pueden considerar tecnologías y estándares como IEEE802.11ac, LTE, IEC 61850, IEC 62746, IEC 61968, IEC 62325, Protocolos de comunicación TCP-IP, etc.[11]. En [12] se presenta un estudio con la norma IEC 61850 basada en un protocolo de presencia de mensajes (XMPP). En [13] se analiza el despacho económico en una VPP bajo una red no ideal de comunicación.

La gestión de una VPP, es el proceso de organizar y gestionar todos los recursos y actividades, para optimizar los recursos energéticos en el sistema de generación, transmisión o distribución, alcanzando objetivos técnicos o económicos por los cuales se ha implementado la VPP [7].

Para que una planta de generación virtual entre a competir en el mercado eléctrico debe considerar los principios de la oferta y la demanda para implementar los costos respectivos, se prioriza el despacho de energía desde una VPP a pesar de sus elevados costos ya que están conformadas de plantas de generación energías

renovables no convencionales [14]. En [15] se analiza una configuración óptima de una VPP considerando riesgos y beneficios para inversionistas. Por otro lado [16] muestra que una configuración óptima económica de una VPP varía dependiendo de la disponibilidad de la energía y los costos marginales. En [17] se analiza la operación de una VPP dentro del mercado eléctrico mayorista, con el objetivo de maximizar ganancias económicas y a la vez satisfacer la demanda de energía. En [18] se analiza la formación tecnológica de una VPP versus los precios al por mayor en diferentes mercados eléctricos.

3. El problema de la optimización

El planteamiento general del problema de optimización en un SEP conduce a un modelo general, el cual puede ser resuelto por algoritmos que utilizan técnicas de optimización. Se describen los elementos básicos a tener en cuenta para la optimización de una función, dentro de sistemas eléctricos de potencia en programas computacionales [19].

Las plantas virtuales de generación en [20] son consideradas como plantas convencionales de generación, con las respectivas restricciones, mediante programación lineal. En [19] se realiza el despacho de energía tomando en cuenta restricciones en intervalos de tiempo. Particularmente en [1] se presenta el despacho óptimo de energía dentro de una planta virtual de generación.

En [6] la VPP debe satisfacer el consume flexible, mediante recursos energéticos distribuidos. Los autores en [21] consideran para el despacho de energía el costo total de generación, costos de tratamiento de contaminación, costos establecidos de arranque y parada de unidades generación, mediante algoritmos de enjambre de partículas. En [22] se presenta un modelo matemático para el despacho de energía de una VPP que se adapta a diferentes mercados, considerando restricciones del sistema.

La referencia [23] presenta un modelo matemático para el despacho económico de energía en una VPP hacia mercado eléctrico. En [24] se considera un algoritmos genético para el despacho de energía. La determinación de un estado óptimo de la red es el propósito general, en estudios de planificación la utilidad buscada es conocer como expandir o mejorar una red por ejemplo minimizar las pérdidas de potencia activa analizando diferentes

escenarios de carga. Otro problema es la minimización de costos del despacho de generación futura. Los valores estadísticos para variaciones en la carga deben ser considerados para nuevos generadores, así como predicciones, hipótesis o incertidumbres.

Otra importante área donde el flujo óptimo, es usado es para determinar la operación en tiempo real de una red, el propósito en esta área es tomar los resultados del flujo óptimo y realizar los cálculos con valores en tiempo real en una red. La optimización en tiempo real de una red es usualmente realizada por el operador, por ejemplo, los valores óptimos calculados son analizados por el operador quien cambia los controles actuales para mejorar el estado de la red tal como se obtiene en la simulación. Los resultados deben ser obtenidos dentro de un tiempo razonable, empezando desde el instante que se obtienen los datos de la red. La velocidad de cálculo es una combinación entre el hardware y el algoritmo de cálculo utilizado.

Generalmente, hay dos tipos de variables relevantes en problemas de optimización [25].

3.1 Variables independientes (control o decisión)

Son magnitudes que pueden ser modificadas para satisfacer la relación entre demanda y generación, considerando los límites operacionales del sistema. Se consideran variables de control en un sistema de potencia las siguientes magnitudes: Potencia activa y reactiva en un nodo PV, tap de transformador, voltaje en barras de generación, etc. [25].

3.2 Variables dependientes (estado)

Conjunto de variables que describen un único estado del sistema eléctrico de potencia. Se consideran variables de estado en un sistema de potencia las siguientes magnitudes: magnitud y ángulo del voltaje en las barras, potencia reactiva de generación, cargas de líneas de transmisión, etc. [25].

Para resolver el problema de optimización se debe calcular el valor óptimo para las variables de control y en base a estos valores se calculan las magnitudes de las variables de estado [25].

3.3 Restricciones

Las restricciones normalmente se clasifican en dos tipos, restricciones de igualdad y restricciones de desigualdad, estas restricciones limitan el punto de solución que satisface todas las condiciones del problema

de optimización. Las restricciones de las variables del sistema eléctrico de potencia están relacionados a características de equipos y elementos eléctricos, así como de la configuración de conexión de los mismo dentro del sistema. Las ecuaciones del flujo de potencia se encuentran dentro de las restricciones de igualdad y las restricciones de desigualdad representan los límites de operación de los equipos y elementos del sistema de potencia. Se consideran restricciones de desigualdad: restricciones de potencia activa y reactiva, voltaje en barras de generación y carga en la red se establece valores máximos y mínimos, restricciones de corriente por razones de estabilidad, posición del tap en transformadores, conexión de banco de capacitores. Las restricciones no deben superar sus límites ya que podrían causar daño al equipo o llevar al sistema eléctrico de potencia a estados inseguros de operación [25].

3.4 Función objetivo

El componente principal de un problema de optimización es la función objetivo, también llamado índice de rendimiento o criterio de elección. Este es el elemento utilizado para decidir los valores adecuados de las variables de control que resuelvan el problema de optimización. Algunos de estos criterios pueden ser por ejemplo de tipo económico (coste total, beneficio), de tipo tecnológico (energía mínima, máxima capacidad de carga, máxima tasa de producción) o de tipo temporal (tiempo de producción mínimo) entre otros.

Existen diferentes funciones objetivo en el análisis de sistemas eléctricos de potencia, que se tratan de optimizar considerando las restricciones y variables del sistema de potencia [25]:

- Costo de generación de potencia activa.
- Costo de generación de potencia reactiva.
- Energía suministrada a la red desde una fuente externa.
- Pérdidas de potencia activa.
- Emisión de gases contaminantes.
- Reducción de carga.
- Posición de tap en transformadores.
- Ajuste de carga.

La formación de cada función objetivo es diferente para alcanzar los resultados deseados, para el presente documento se considera el análisis de la minimización de costos de generación activa.

3.5 Despacho óptimo dinámico de energía

La planificación y fijación de la generación en las unidades disponibles de un sistema eléctrico de potencia se lo debe hacer de manera económica, segura y confiable [23].

El problema del despacho económico tiene dos formulaciones diferentes en la literatura, el problema de despacho económico dinámico en el cual se considera las restricciones de velocidad del generador y despacho económico estático [26]. La aplicación de tal criterio asume como variables la potencia activa generada en las barras asociadas a generadores, que se determinan de tal manera que los costos de generación sean mínimos.

Los generadores mostrarán diferentes características en el despacho económico dinámico bajo diferentes modos de operación y estrategias de programación [26]. El modelo que sea considerado para realizar el despacho óptimo de energía debe considerar las respectivas restricciones de operación del sistema de potencia y las restricciones de operación de elementos y equipos eléctricos, restricciones de generación de centrales eólicas y fotovoltaicas considerando pronósticos de clima. En [27] se analiza el despacho óptimo considerando la respuesta a la demanda y el mercado de carbón.

3.6 Flujo óptimo dinámico de potencia

El flujo de potencia es uno de los problemas básicos en el cual la carga o generación son dadas o fijadas, en la actualidad este problema puede ser resuelto con herramientas computacionales para cualquier tamaño de sistema eléctrico. El objetivo es determinar todos los voltajes nodales a partir de los cuales se encuentran las restantes magnitudes del sistema como: flujo de potencia a través de las líneas de transmisión, corrientes y las pérdidas asociadas.

El planteamiento y solución del problema es determinístico debido a que las variables independientes son fijas o consideradas exactas en el problema y de esta forma la solución factible es única para un tipo de escenario dado. Cuando se tiene incertidumbre sobre el valor de las variables independientes, la solución no se la puede tomar como exacta ya que en esta se refleja la incertidumbre de las variables independientes; entonces para tener una idea aproximada de la solución se recurre a resolver varios flujos determinísticos para diferentes valores de las variables dependientes, este proceso constituye un método de solución a estos flujos de potencia que por su naturaleza son probabilísticos [40].

El flujo óptimo de potencia considera un escenario de operación constante en un determinado instante de tiempo y en general no es posible modelar restricciones relacionadas con el tiempo por ejemplo tasas de aumento, contrato de generación, almacenamiento de combustible, capacidad de embalse, etc. Con restricciones relacionadas al tiempo y la energía el flujo óptimo de potencia se transforma en un problema dinámico (DOPF) flujo dinámico óptimo de potencia. El problema de optimización clásico en sistemas de potencia es complejo, agregar restricciones relacionadas al tiempo y nuevas variables de decisión crean un problema de mayor complejidad que abarca tanto el tiempo como las características de la red. Por lo tanto el método de solución es muy crucial para el éxito del procedimiento de solución [28].

En [28] se analiza el problema para minimizar costos de generación en un intervalo de tiempo, utilizando un método de doble punto interior no lineal. En [29], [30] se presenta un flujo dinámico óptimo de potencia de múltiples etapas considerando el ingreso de generadores eólicos.

En la referencias [31], [32] se introduce el criterio de flujo estocástico dinámico óptimo de potencia (DSOPF), para la operación de sistema eléctrico de potencia con la integración de energías renovables no convencionales.

4. Métodos de solución

La complejidad numérica de problemas de optimización se relacionan a la solución estática o dinámica del mismo. En este sentido las soluciones basadas en el método de Newton Raphson son útiles en problemas estáticos en los cuales ninguna variable es dependiente del tiempo. Para la solución de problemas en el dominio del tiempo se utilizan algoritmos basados en programación dinámica de búsqueda recursiva [25].

La separación de métodos de cálculo en dos clases se rige principalmente por existir diferentes métodos para resolver un flujo de potencia que proporcionan soluciones intermedias, además la solución óptima esta generalmente cerca de una solución existente del flujo de carga, por lo tanto existe una clase de algoritmo que se basa en un flujo de carga resuelto y el segundo método parte de una formulación rigurosa del problema a ser optimizado sin tener una solución base empleando las condiciones y técnicas de optimización. Estos dos tipos

de soluciones tienen ventajas y desventajas dependiendo de la función objetivo, tamaño del problema y aplicación.

Problemas de optimización en sistemas eléctricos de potencia se pueden resolver mediante técnicas de optimización y en general pueden clasificarse en métodos matemáticos y métodos heurísticos [25]. Algunos de los métodos matemáticos como Programación Lineal (LP), la función objetivo y las restricciones son lineales. La Programación no Lineal tiene la función objetivo y restricciones como funciones no lineales de las variables, Programación dinámica la cual consiste en tomar varias decisiones en distintas etapas de la solución, Programación de enteros, en la cual las variables de control tienen valores enteros [4], [5]. La mayoría de estas soluciones pueden garantizar una solución óptima a nivel local del problema, aunque no necesariamente alcance una solución óptima global. Los métodos matemáticos no son capaces de resolver problemas altamente complejos [25].

Los algoritmos heurísticos eliminan los principales inconvenientes de los enfoques matemáticos y pueden resolver problemas muy complejos en un tiempo computacional razonable. La mayoría de estos algoritmos se basan en comportamientos biológicos, básicamente empiezan desde un punto o un conjunto de puntos (población) y a través de una búsqueda direccionada se converge hacia una mejor solución [25].

En las referencias [4], [5] se describen varios métodos matemáticos para resolver problemas convencionales de optimización en los sistemas de potencia. En [33] se presenta una solución basada en programación cuadrática de enteros mixtos, para el despacho óptimo de energía diario en una VPP.

Los métodos convencionales para resolver problemas de optimización no presentaban soluciones efectivas, por lo cual se propone la solución con enfoques metaheurísticos. Algunos de los cuales incluye la aplicación de PSO y evolución diferencial, enfoques híbridos con redes neuronales artificiales (ANN) y técnicas de algoritmos evolutivos (EA). Con la aparición de las redes eléctricas inteligentes se tienen nuevos enfoques en la función objetivo y consideraciones adicionales en las restricciones del problema [25].

En [34] se establece un modelo de despacho económico de una VPP resuelto por un algoritmo aleatorio distribuido sin gradiente. En [35] establece un modelo de despacho estocástico en una VPP, para abordar los

riesgos asociados con la incertidumbre de los precios en el mercado eléctrico y la disponibilidad de potencia fotovoltaica. En la referencia [36] se combina una optimización a intervalos y optimización determinista para resolver el problema del despacho económico en una VPP. En [37] se integran procesos de optimización y pronóstico en el modelo para resolver el problema, considerando restricciones operativas y del mercado eléctrico. En [38] se realiza un algoritmo de optimización estocástico para el despacho de energía generado.

Tabla 1. Tendencias en investigaciones, plantas virtuales de generación.

| DATOS | | TEMÁTICA | | | | SOLUCIÓN PROPUESTA | | |
|--------------------|----------------|--------------|---------------------|----------|------------------------------|---------------------|------------------------|------------|
| AÑO DE PUBLICACIÓN | AUTOR | OPTIMIZACIÓN | ENERGÍAS RENOVABLES | DESPACHO | PLANTA VIRTUAL DE GENERACIÓN | ALGORITMOS LINEALES | ALGORITMOS NO LINEALES | HEURÍSTICA |
| 2013 | Narkhede [1] | * | * | | * | | * | |
| 2013 | Pandžić [2] | | | * | * | | * | |
| 2014 | Petersen [6] | * | | | * | | | * |
| 2018 | Peikherfeh [8] | * | * | | | | * | |
| 2019 | Gao [9] | * | | * | * | | | * |
| 2019 | Ju [10] | * | | * | | | | * |
| 2017 | Cao [13] | * | * | | * | | | |
| 2019 | Yusta [17] | * | | | * | | * | |
| 2007 | Kuzle [20] | * | | | * | * | | |
| 2012 | Hropko [21] | | | * | * | | | * |
| 2014 | Narkhede [24] | * | | * | * | | | * |
| 2001 | Xie [28] | * | | | | | * | |
| 2005 | Chen [29] | * | * | | | | | * |
| 2013 | Liang [31] | * | * | | | | | * |
| 2012 | Liang [32] | | * | * | | | | * |
| 2019 | Ko [33] | | | * | * | | * | |
| 2017 | Xie [34] | * | | | * | | * | |
| 2019 | Sun [35] | | | * | * | | | * |
| 2018 | Liu [36] | * | | | * | | | * |
| 2019 | Hany [37] | * | * | | | | * | |
| 2020 | Tan [38] | * | | * | * | | | * |

5. Conclusiones

El concepto de planta virtual de generación (VPP), tiene la capacidad de adaptarse a la naturaleza estocástica de las fuentes de energía renovable no convencionales, la dinámica de la demanda y la oferta de energía, lo cual representa una característica positiva para integrar una VPP dentro de los mercados eléctricos de forma competitiva y eficiente.

En problemas de optimización altamente complejos, los métodos no convencionales de solución presentan soluciones factibles en intervalos de tiempo pequeños en relación a la cantidad de datos analizada, por lo cual para la solución de este tipo de problemas estocásticos se han desarrollado métodos heurísticos que obtienen una solución óptima global entre mayor sea el conjunto solución analizado, en la actualidad analizar este tipo de problemas es posible gracias al incremento de la capacidad de las computadoras y desarrollo de software especializado.

Resolver un problema de optimización con corrección implica identificar claramente el tipo de función objetivo que representa, las restricciones correspondientes, las variables de decisión a tomar en cuenta y seleccionar un método de solución que se adapte a la realidad del problema, para alcanzar el objetivo final de reducir o maximizar la variable deseada.

Se ha realizado una base teórica basado en despacho óptimo de energía considerando plantas virtuales de generación, para realizar un trabajo posterior donde se debe considerar el modelamiento de la planta de generación virtual (VPP), la cual interactúe dentro de un sistema eléctrico de potencia y de esta manera realizar el despacho óptimo de energía considerando las respectivas restricciones asociadas a los elementos y equipos eléctricos, además de las restricciones de operación.

REFERENCIAS

- [1] M. S. Narkhede, S. Chatterji, and S. Ghosh, "Optimal dispatch of renewable energy sources in smart grid pertinent to virtual power plant," *Proc. 2013 Int. Conf. Green Comput. Commun. Conserv. Energy, ICGCE 2013*, pp. 525–529, 2013.
- [2] H. Pandžić, I. Kuzle, and T. Capuder, "Virtual power plant mid-term dispatch optimization," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 134–141, 2013.
- [3] V. Power, P. Emerge, A. New, and B. Model, "Virtual Power Plants Emerge As New Business Model," *Electr. J.*, vol. 31, no. 10, pp. 60–61, 2018.
- [4] 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.
- [5] J. A. Monoh, M. E. El-Hawary, and R. Adapa, "A review of selected optimal power flow literature to 1993 part ii: newton, linear programming and Interior Point Methods," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 14, no. 1, pp. 105–111, 1999.
- [6] M. K. Petersen, L. H. Hansen, J. Bendtsen, K. Edlund, and J. Stoustrup, "Heuristic optimization for the discrete virtual power plant dispatch problem," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 6, pp. 2910–2918, 2014.
- [7] K. O. Adu-Kankam and L. M. Camarinha-Matos, "Towards collaborative Virtual Power Plants: Trends and convergence," *Sustain. Energy, Grids Networks*, vol. 16, pp. 217–230, 2018.
- [8] 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.
- [9] R. Gao *et al.*, "A Two-Stage Dispatch Mechanism for Virtual Power Plant Utilizing the CVaR Theory in the Electricity Spot Market," *Energies*, vol. 12, no. 17, p. 3402, 2019.
- [10] L. Ju, P. Li, Q. Tan, Z. Tan, and G. De, "A CVaR-robust risk aversion scheduling model for virtual power plants connected with wind-photovoltaic-hydropower-energy storage systems, conventional gas turbines and incentive-based demand responses," *Energies*, vol. 11, no. 11, 2018.
- [11] L. Hernandez *et al.*, "A multi-agent system architecture for smart grid management and forecasting of energy demand in virtual power plants," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 1, pp. 106–113, 2013.
- [12] F. Nadeem *et al.*, "Virtual power plant management in smart grids with XMPP based IEC 61850 communication," *Energies*, vol. 12, no. 12, 2019.
- [13] C. Cao *et al.*, "Distributed Economic Dispatch of Virtual Power Plant under a Non-Ideal Communication Network," *Energies*, vol. 10, no. 2, 2017.
- [14] L. Toma, B. Otomega, and I. Tristiu, "Market strategy of distributed generation through the virtual power plant concept," *Proc. Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equipment, OPTIM*, pp. 81–88, 2012.
- [15] J. Wang, W. Yang, H. Cheng, L. Huang, and Y. Gao, "The optimal configuration scheme of the virtual power plant considering benefits and risks of investors," *Energies*, vol. 10, no. 7, 2017.
- [16] D. I. Candra, K. Hartmann, and M. Nelles, "Economic optimal implementation of virtual power plants in the German power market," *Energies*, vol. 11, no. 9, 2018.
- [17] J. M. Yusta, N. Naval, and S. Raul, "A virtual power plant optimal dispatch model with large and small-scale distributed renewable generation," *Renew. Energy*, no. xxxx, 2019.
- [18] B. Moreno and G. Díaz, "The impact of virtual power plant

- technology composition on wholesale electricity prices: A comparative study of some European Union electricity markets,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 99, no. September 2018, pp. 100–108, 2019.
- [19] M. Petersen, J. Bendtsen, and J. Stoustrup, “Optimal dispatch strategy for the Agile Virtual Power Plant,” *Proc. Am. Control Conf.*, pp. 288–294, 2012.
- [20] I. Kuzle, M. Zdrilić, and H. Pandžić, “Virtual power plant dispatch optimization using linear programming,” *2011 10th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC.EU 2011 - Conf. Proc.*, pp. 1–4, 2011.
- [21] D. Hropko, J. Ivanecký, and J. Turček, “Optimal dispatch of renewable energy sources included in virtual power plant using accelerated particle swarm optimization,” *Proc. 9th Int. Conf. ELEKTRO 2012*, pp. 196–200, 2012.
- [22] J. Naughton, M. Cantoni, and P. Mancarella, “A Modelling Framework for a Virtual Power Plant with Multiple Energy Vectors Providing Multiple Services,” *2019 IEEE Milan PowerTech*, pp. 1–6, 2019.
- [23] Y. Yang, B. Wei, and Z. Qin, “Sequence-based differential evolution for solving economic dispatch considering virtual power plant,” *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 15, pp. 3202–3215, 2019.
- [24] M. S. Narkhede, S. Chatterji, and S. Ghosh, “Multi objective optimal dispatch in a virtual power plant using genetic algorithm,” *Proc. - 2013 Int. Conf. Renew. Energy Sustain. Energy, ICRESE 2013*, pp. 238–242, 2014.
- [25] H. Abdi, S. D. Beigvand, and M. La Scala, “A review of optimal power flow studies applied to smart grids and microgrids,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 71, no. December 2016, pp. 742–766, 2017.
- [26] F. D. Santillán-Lemus, H. Minor-Popocatl, O. Aguilar-Mejía, and R. Tapia-Olvera, “Optimal economic dispatch in microgrids with renewable energy sources,” *Energies*, vol. 12, no. 1, 2019.
- [27] Z. Liu *et al.*, “Optimal dispatch of a virtual power plant considering demand response and carbon trading,” *Energies*, vol. 11, no. 6, p. 121693718, 2018.
- [28] K. Xie and Y. H. Song, “Dynamic optimal power flow by interior point methods,” *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.*, vol. 148, no. 1, pp. 76–83, 2001.
- [29] H. Chen, J. Chen, and X. Duan, “Multi-stage dynamic optimal power flow in wind power integrated system,” *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Transm. Distrib. Conf.*, vol. 2005, pp. 1–5, 2005.
- [30] G. Chen, J. Chen, and X. Duan, “Power flow and dynamic optimal power flow including wind farms,” *1st Int. Conf. Sustain. Power Gener. Supply, SUPERGEN '09*, 2009.
- [31] J. Liang, D. D. Molina, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, “Two-level dynamic stochastic optimal power flow control for power systems with intermittent renewable generation,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2670–2678, 2013.
- [32] J. Liang, G. K. Venayagamoorthy, and R. G. Harley, “Wide-area measurement based dynamic stochastic optimal power flow control for smart grids with high variability and uncertainty,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 59–69, 2012.
- [33] R. Ko, D. Kang, and S. K. Joo, “Mixed integer quadratic programming based scheduling methods for day-ahead bidding and intra-day operation of virtual power plant,” *Energies*, vol. 12, no. 8, 2019.
- [34] J. Xie and C. Cao, “Non-convex economic dispatch of a virtual power plant via a distributed randomized gradient-free algorithm,” *Energies*, vol. 10, no. 7, 2017.
- [35] G. Sun *et al.*, “Stochastic adaptive robust dispatch for virtual power plants using the binding scenario identification approach,” *Energies*, vol. 12, no. 10, 2019.
- [36] Y. Liu, M. Li, H. Lian, X. Tang, C. Liu, and C. Jiang, “Optimal dispatch of virtual power plant using interval and deterministic combined optimization,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 102, no. May, pp. 235–244, 2018.
- [37] A. Hany Elgamel, G. Kocher-Oberlehner, V. Robu, and M. Andoni, “Optimization of a multiple-scale renewable energy-based virtual power plant in the UK,” *Appl. Energy*, vol. 256, no. April 2019, p. 113973, 2019.
- [38] Z. Tan *et al.*, “Dispatching optimization model of gas-electricity virtual power plant considering uncertainty based on robust stochastic optimization theory,” *J. Clean. Prod.*, vol. 247, 2020.
- [39] S. Yu, F. Fang, Y. Liu, and J. Liu, “Uncertainties of virtual power plant: Problems and countermeasures,” *Appl. Energy*, vol. 239, no. December 2018, pp. 454–470, 2019.
- [40] D.M. Canacúan. Flujo óptimo de Potencia Linealizado para Minimizar Costos Operativos de Generación en Sistemas Eléctricos de Potencia. Quito, Ecuador, 2017, pp. 15-31.

Síntesis y caracterización de membranas piezoeléctricas en base al polímero fluoruro de polivinilideno, utilizando la técnica de electrospinning

Synthesis and characterization of piezoelectric membranes in based on the polyvinylidene fluoride polymer, using electrospinning technique

Adrián Miranda¹, Aurelio Boya² Elida de Obaldía^{3*}

¹ Facultad de Ciencias y Tecnología, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

² Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad Autónoma de Chiriquí, Chiriquí, Panamá

³ Vicerrectoría de Investigación Post Grado y Extensión, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: elida.deobaldia@utp.ac.pa

RESUMEN—La presente investigación está relacionada con la síntesis de membranas poliméricas con características piezoeléctricas, utilizando el material fluoruro de polivinilideno (PVDF), el cual es un polímero semicristalino termoplástico. Las membranas estarán conformadas por microfibras piezoeléctricas de este material, las cuales fueron fabricadas a través de la técnica de electrospinning, se utilizaron distancias de separación de 4.5cm, 8.5cm, 11.5cm entre la aguja hipodérmica y el cilindro electrizado colector de muestras. Se sometió a prueba la hipótesis del efecto de los parámetros del proceso de fabricación de las membranas, sobre el diámetro de las microfibras del material piezoeléctrico (PVDF) y en la estructura rotacional de la fase piezoeléctrica Beta (β). Se realizaron las siguientes técnicas de caracterización: 1) difracción de rayos X (XRD), donde la dispersión de las muestras en 18.3° , 19.9° , 20.6° tienen relación con la estructura interna rotacional α y β ; 2) microscopía por barrido electrónico (SEM), en la que se obtuvo el diámetro aproximado entre 100 a 250nm de las nano fibras del PVDF; 3) espectroscopía infrarroja por la transformada de Fourier (FTIR), en la que se aplicaron dos protocolos diferentes para el análisis de los espectros: uno donde la posición de los picos están referenciados en la literatura, y el otro donde se consideran los cambios de frecuencia comparados con la línea de base y modificado de las membranas micro fibrosas del PVDF, 4) espectroscopía Raman, con la que se determinó un espectro de 800 a 840cm^{-1} , lo cual muestra los cambios de la estructura interna rotacional del PVDF modificado y no modificado, indicado en referencias bibliográficas con un análisis cualitativo. Se encontró que entre más pequeño el diámetro de las fibras, mayor concentración de la fase (β) estructural.

Palabras clave—microfibras, Electrospinning, Estructura β , Piezoeléctrico, PVDF.

ABSTRACT— The present investigation is related to the synthesis of polymeric membranes with piezoelectric characteristics, using the polyvinylidene fluoride (PVDF) material, which is a thermoplastic semicrystalline polymer. The membranes are made of micro piezoelectric fibers of this material, which were manufactured using the Electrospinning technique. We used the distances of 4.5cm, 8.5cm, 11.5cm from the hypodermic needle to the cylinder to collect the samples. The hypothesis of manufacturing process parameters related to the diameter of the micro and nanofibers of the piezoelectric material PVDF with its rotational structure Beta (β) was tested. To characterize the samples, the following techniques were performed: XRD, where the dispersion of the samples were 18.3° , 19.9° , 20.6° , is related to the internal rotational structure α and β , for the SEM the approximate diameter of 100 to 250nm was obtained of the micro and nano fibers of the PVDF, two protocols were applied to the FTIR for the analysis of the spectra, one of them with bibliographic reference and the other with the frequency changes shown with the baseline and modified the nano fibrous membranes of the PVDF, in Raman the spectrum from 800 to 840cm^{-1} shows the changes in its internal rotational structure of the modified and unmodified PVDF by bibliographic reference is observed with a qualitative analysis. We found that the smaller fiber diameter, the more concentration of structural β phase.

Keywords— Diameter of the PVDF microfibers, Electrospinning, Piezoelectric, PVDF, Structure β .

Citación: A. Miranda, A. Boya y E. Obaldía, "Síntesis y caracterización de membranas piezoeléctricas en base al polímero polifluoruro de vinilideno, utilizando la técnica de electrospinning", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 15 de octubre de 2020. **Recibido con correcciones:** 15 de octubre de 2020. **Aceptado:** 12 de enero de 2021.

DOI: [10.33412/idt.v17.1.2989](https://doi.org/10.33412/idt.v17.1.2989)

Copyright: 2021 A. Miranda, A. Boya y E. Obaldía. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

1. Introducción

La cosecha de energía ha tomado mayor importancia en las últimas décadas, debido a la demanda que existe a nivel mundial y al desarrollo tecnológico e industrial de nuestra sociedad. Se incluye, además, problemáticas como la disminución de reservas de combustible fósil, el calentamiento global, y afecciones a nuestros recursos naturales [1]. Esto obliga a la búsqueda de fuentes de energía renovables y desarrollo de nuevas tecnologías para su aprovechamiento. Una parte integral es la transformación de energía mecánica a energía eléctrica. Existen varios mecanismos generadores de energía (hidroeléctricas, eólica, solar) y materiales específicos como los piezoeléctricos [2], [3]. Los materiales piezoeléctricos generan un voltaje alterno al aplicar una fuerza pulsante al material. De igual manera, el material se deforma cuando se aplica un voltaje. Estas propiedades poseen diversas aplicaciones en el área de las ciencias e ingeniería [5].

Para nuestra investigación se seleccionó un polímero con características térmicas, sintéticas, y con propiedades piezoeléctricas [4]. Este material es el Fluoruro de polivinilideno (PVDF), el mismo, posee una estructura cristalina que puede variar en cinco fases rotacionales α , β , γ , δ , ϵ , cada una con sus propiedades y aplicaciones [5], [1]. La estructura β , figura 1, posee características con diversas aplicaciones tecnológicas, debido a su fuerte actividad piezoeléctrica y ferroeléctrica [6], [7]; esta fase, posee un ordenamiento polar entre algunos de sus componentes moleculares: flúor-hidrogeno, siendo el flúor el elemento más electronegativo. Por otro lado, en su fase α , la estructura molecular del PVDF es no polar, como se observa en la figura 1.

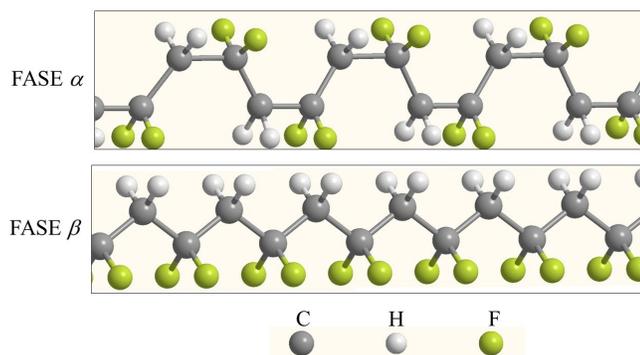


Figura 1. Conformación de la estructura de la fase α , β del PVDF.

Por lo cual, la TE provoca un aumento de las propiedades piezoeléctricas del PVDF [4], [5], [6]. Esto se ha utilizado en diversas aplicaciones en el área de ciencias e ingeniería, para la cosecha de energía, [9].

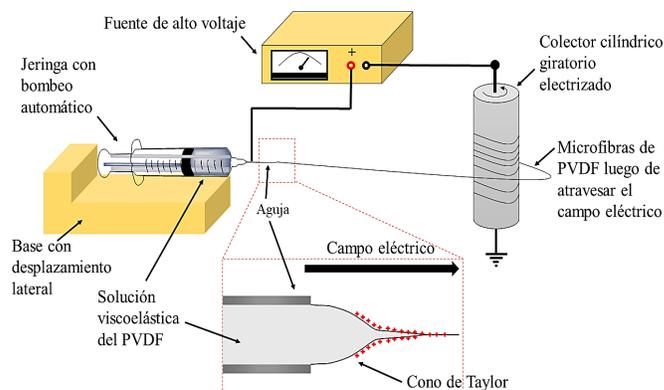


Figura 2. Esquema de la Técnica de Electrospinning o electro hilado.

Mediante la técnica de electrospinning (TE) [8], se provocan modificaciones en la fase rotacional del polímero aplicando un campo eléctrico, como se demuestra en la figura 2. Cuando se le aplica voltaje en magnitudes de kV, al polímero disuelto, el campo eléctrico induce una rotación molecular, generando predominantemente transiciones de la fase α a β . La orientación molecular, inicia en la punta de la aguja de la TE, en donde, las fuerzas generadas por el campo eléctrico sobrepasan la tensión superficial y viscosidad de la solución de PVDF, provocando la formación del cono de Taylor (figura 2) [2], [3].

La presente investigación está relacionada con la síntesis de membranas poliméricas con características piezoeléctricas, utilizando el material PVDF, el cual es un polímero semicristalino termoplástico. Las membranas fueron compuestas por microfibras piezoeléctricas de PVDF, las cuales se sintetizaron con la TE o electro hilado. Las propiedades piezoeléctricas de las membranas se caracterizaron en la Universidad de Texas en Dallas-USA, a través de la pasantía proporcionada por la Secretaría Nacional de Ciencia y Tecnología (SENACYT), en conjunto con la Universidad Tecnológica de Panamá, usando las siguientes técnicas: Difractómetro de Rayo X (XRD) para el análisis de la estructura α y β ; Microscopia de Barrido de Electrones

(SEM) para la observación de las microfibras de la membrana de PVDF; FTIR, en la que fueron utilizadas dos metodologías para el análisis de la estructura del PVDF modificado, al igual que, en la Espectroscopia de Raman. Por otro lado, la síntesis y estudio de la respuesta electromecánica de las membranas, se realizó en las instalaciones del Centro de Investigación de Física Aplicada (CIFA), ubicado en la Universidad Autónoma de Chiriquí (UNACHI).

2. Materiales y métodos

2.1 Materiales

El PVDF utilizado fue Polyk 1006, que es un polímero semicristalino de peso molecular medio-alto de fluoruro de vinilideno-granulado[7]. Los solventes utilizados fueron: N-N dimetilformamida con una masa molar de 73.09g/mol, cuya fórmula química es $\text{HCON}(\text{CH}_3)_2$, de marca MERK (REF-Merk site) y acetona del mismo proveedor, con masa molecular de 58.08g/mol y fórmula química CH_3COCH_3 . Estos materiales se utilizaron sin modificaciones adicionales.

2.2 Preparación de las membranas de PDVF

Para obtener las muestras de membranas micro fibrosas del PVDF (MMF-PVDF), se realizaron los siguientes procesos: para la disolución viscoelástica del PVDF, se agregó 2.00g de PVDF granulado en recipiente de vidrio con rosca con 5.60g del disolvente dimetilformamida DMF, luego se colocó en el agitador térmico a 80°C por 6 horas continuas, agitador magnético marca Bunsen, serie MC-8-1201. Luego, se agregó 2.40g de acetona al recipiente con la solución diluida del DMF + PVDF, seguidamente, se mantuvo por 4 horas en el agitador térmico a temperatura ambiente [5]. Posteriormente, se aplica la técnica de electrospinning, con un voltaje constante de salida de 15,0kV, a temperatura ambiente, utilizando como parámetro variable la distancia de separación de la aguja hipodérmica, con respecto al cilindro giratorio metálico electrificado, el cual recolecta la muestra de la membrana micro fibrosa del PVDF, se utilizaron los valores de 4.5cm, 8.5cm y 11.5cm. Durante el proceso, se mantuvo constante la salida de fluido de la aguja hipodérmica, calibre 18, colocando el inyector de motor de paso A-99 Razel a 1,73mL/h.

Las condiciones de humedad y temperatura se mantuvieron constante durante la realización de la síntesis de las membranas. El valor de estas variables se determinó en 70% de humedad relativa y en 25,0°C,

utilizando un medidor de humedad de la marca Habor, Hab-584Y67.

2.3 Equipo de caracterización

Para el registro del voltaje generado por las membranas micro fibrosas de PVDF, se utilizó como instrumento de medición el multímetro TEKPOWER TP5000 DE 6000 cuentas, con un rango de 0 a 600mV para corriente directa (DC), con un intervalo de tiempo de 1.0s por cada medida de la muestra. Se experimentaron tres técnicas para medir los voltajes de la membrana y se seleccionó la más confiable y repetible. La técnica que se utilizó fue el pulso de voltaje, en donde se le daba un tiempo de (7.295 ± 0.009) segundos para la deformación y reformación de la membrana micro fibrosa del PVDF, la cual se colocó en medio de cinta adhesiva conductora; es decir, un dispositivo tipo sándwich, para medición de voltaje. Para el análisis de la estructura molecular no modificada y modificada de la muestra del PVDF, se utilizaron el FTIR-ATR del equipo Nicolet is, con zona de barrido de 400cm⁻¹ a 4000cm⁻¹ y con número de barrido por muestra de 200. Por otro lado, se utilizó el Nicolet Almega XR Raman, cuya longitud de onda láser es 780nm. El análisis de XRD, fue conducido utilizando un Rigaku Ultima III XRD (40 kV, 44mA, Rigaku Co. Difracción de Rayo X, Tokyo, Japón) con una fuente Cu α , con longitud de onda de 0.15418nm. El difractor fue grabado entre ángulos $2\theta = 10^\circ$ y $2\theta = 50^\circ$, donde se realizó primero un escaneo de 0.1° , con una razón de $20^\circ/\text{min}$ para calibrar y referenciar el espectro de rayo X. Luego, se midió con 0.02° , con una razón de $3^\circ/\text{min}$ a temperatura ambiente. Por último, la morfología de las microfibras del PVDF, fueron caracterizadas por el SEM, SEISS SUPRA-40, el diámetro de las fibras se midió utilizando el programa de procesamiento de imágenes ImageJ.

3. Resultados y discusiones

3.1 Caracterización eléctrica

En la figura 3, se observan tres muestras de membranas micro fibrosas de PVDF, sintetizadas con 4.5cm, 8.5cm y 11.5cm de distancia de separación, entre la aguja hipodérmica y el cilindro metálico giratorio colector, obtenidas por la técnica de electrospinning (TE). Una apreciación visual de las membranas, indica diferencia en sus transparencias, lo cual infiere que la

membrana sintetizada a 4.5cm es más gruesa que la de 11.5cm.

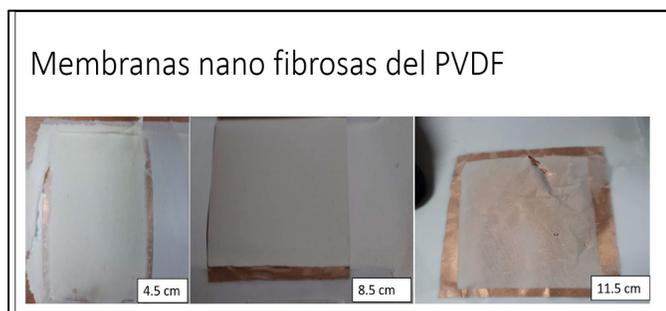


Figura 3. Resultados de la membrana nano fibrasas del PVDF con respecto a su distancia de separación.

En la figura 4, se puede observar la tabla y gráfico de la respuesta del pulso voltaje para las MMF-PVDF. Para la distancia de separación de 8.5cm, se obtuvo (2.5 ± 1.2) mV, como valor pico de voltaje y desviación estándar. En cambio, para la distancia de 11.5cm se obtuvo (1.4 ± 0.4) mV, es decir, menor generación de voltaje. La respuesta de voltaje obtenida, para la distancia de separación de 4.5cm, se aproxima a la de 8.5cm.

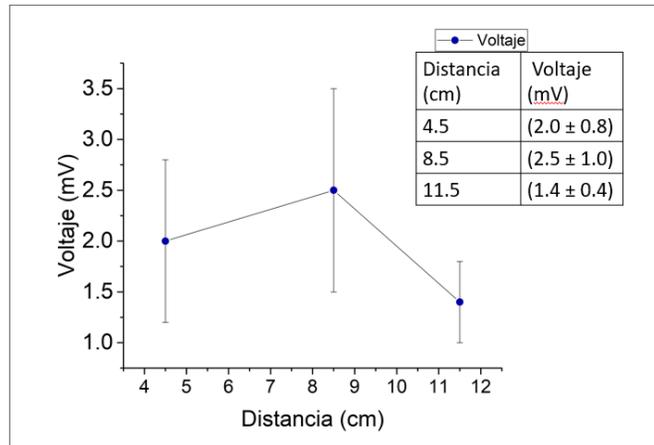


Figura 4. Resultado de los voltajes producido por la membrana nano fibrasas del PVDF mediante la técnica pulso voltaje.

Este resultado sugiere que el voltaje producido por el efecto piezoeléctrico puede depender tanto de la distancia entre la aguja y el cilindro de colección, así como el espesor de la muestra. Se necesita un mejor sistema de medición de voltaje generados para disminuir la desviación estándar de las mediciones realizadas y tener mayor confianza en las dependencias mencionadas.

3.2 Espectroscopia Raman

Como se puede apreciar en la figura 1, las diferencias estructurales entre la fase α y la fase β , se basan en rotaciones de la cadena de monómeros, lo cual provoca cambios en la polaridad de la molécula. Estas diferencias en la polaridad se pueden apreciar en regiones particulares del espectro Raman.

En la figura 5, se observan cuatro espectros Raman obtenidos en las muestras no modificadas y modificadas de la MMF-PVDF, el estudio se realizó en dos regiones específicas. En la figura 5 (A) se muestra la región $2940-3080\text{cm}^{-1}$, donde se encuentran las vibraciones de los hidrocarburos C-H [8] [9]. Se observa la presencia de una banda en todas las muestras en la vecindad de 2985cm^{-1} . La figura 5(A) muestra esta banda sin normalizar. Una vez normalizada la banda para todas las muestras, nos enfocamos en la banda a 840cm^{-1} , figura 5 (B). Como se puede apreciar, la muestra no modificada carece de intensidad en esta banda, mientras las muestras sintetizadas con la TE, presentan un aumento en esta banda, lo cual se asocia a la presencia de fase b [10].

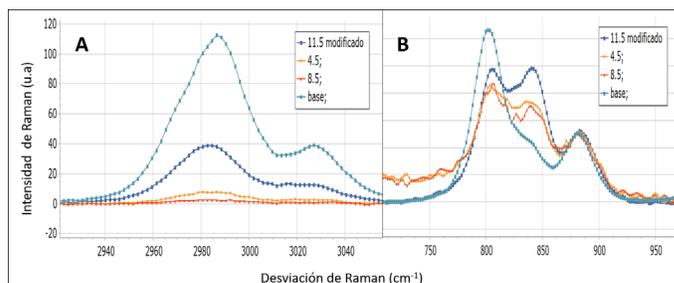


Figura 5. Representación gráfica de los espectros de Raman de la muestra no modificada (Base) y la membrana micro fibrosa del PVDF con regiones específicas ($725-925\text{cm}^{-1}$, $2940-3080\text{cm}^{-1}$).

Se analizaron dos regiones de los espectros Raman de las muestras modificadas, figura 6, registrándose diferencias entre ellas. La intensidad de la base (curva negra) es mucho mayor que las otras, debido a que posee un espesor de casi dos órdenes de magnitud mayor, en comparación con las membranas de PVDF. Si se compara la intensidad de la banda de 540cm^{-1} , a la banda de interés de 520cm^{-1} para cada una de las curvas, se puede concluir que la muestra 11.5cm (azul) posee mayor contenido de la fase piezoeléctrica original. La banda de 520cm^{-1} está relacionada con la aparición de la fase b [8], [9].

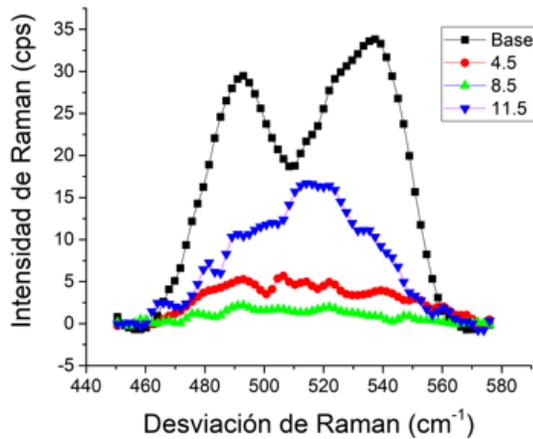


Figura 6. Espectro de Raman de la región 450-575cm⁻¹.

Otras regiones analizadas se muestran en la figura 7. La figura 7(A), corresponde al espectro normalizado en la banda de 880cm⁻¹, la cual revela las intensidades relativas en la banda 840cm⁻¹. Se observa nuevamente la misma distribución de intensidades, donde la muestra 11.5cm es mayor que las de 4.5 y 8.5cm lo cual, indica el aumento de enlaces polares propios de la fase β. Lo cual, se puede atribuir a la disminución del campo eléctrico al variar la distancia de síntesis en la TE. Estructuralmente, X. Cai *et al* [10], explica que la banda de 840cm⁻¹ está relacionado con los modos vibracionales de los C-H antisimétricos, C-C y C-F de flexión, por lo que es un indicador de la estructura β.

En la figura 7(b), al normalizar la banda a 610cm⁻¹, propia de estructura a [8], se observa otro cambio en las bandas del espectro de Raman, específicamente, en la región 450cm⁻¹ – 575cm⁻¹ del espectro, en donde se observan la disminución de dos picos ubicados en las intensidades de 485cm⁻¹ y 541 cm⁻¹, lo cual, es una característica propia de la presencia de fase b en la estructura molecular [11]. De manera similar, la banda a 510cm⁻¹ y 540cm⁻¹ [8] para la muestra sintetizada a 11.5cm, indica que es la que posee mayor cantidad de fase b.

La banda de 510cm⁻¹, además de estar relacionada con la estructura b, se relaciona con el modo vibracional de CF₂ δ y CF₂ w, de la estructura γ para las muestras del PVDF [12]

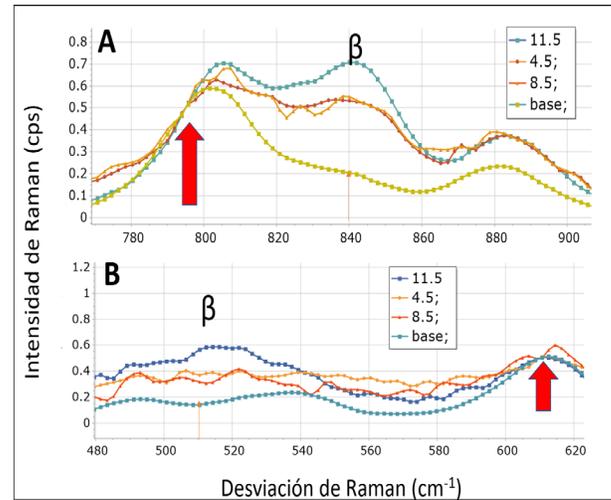


Figura 7. Espectro Raman de la región del cambio de la estructura rotacional del PVDF. Parte A: normalizado en la región 880cm⁻¹; parte B: normalizado en el pico 600cm⁻¹.

La figura 8, muestra un gráfico del conteo de intensidad Raman en la banda de frecuencia de 840cm⁻¹, para cada MMF-PVD sintetizada con la TE. Se observa que la muestra con más intensidad, es la sintetizada a 11,5cm, lo cual significa que posee mayor formación de estructura cristalina en fase b [8].

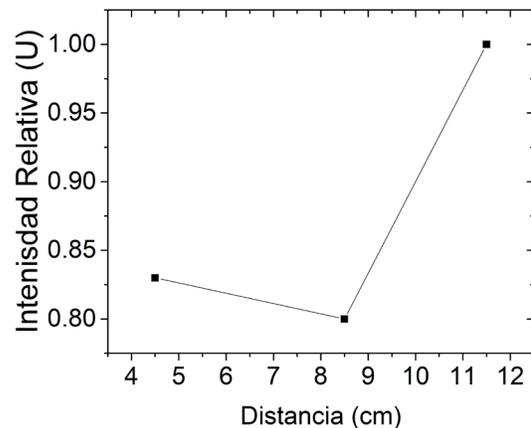


Figura 8. Gráfico de intensidad relativa del pico de 840cm⁻¹ normalizado en 880cm⁻¹ en relación con la distancia de separación de la hipodérmica y el colector de la microfibra de PDVF.

Los resultados indican que la muestra sintetizada a 4.5cm-1 tiene más fase b que la sintetizada a 8.5cm-1, lo cual, se puede atribuir a la intensidad local del campo eléctrico en la TE.

3.3 FTIR

Las muestras no modificadas y modificadas de PVDF se caracterizaron a través de FTIR_ATR, los espectros de absorbancias obtenidos se muestran en la figura 9.

En la figura 9 A, se aprecia una mayor intensidad de absorbancia para la membrana sintetizada a una distancia de 11.5cm, con un pico en la región del espectro ubicada en 1170cm^{-1} , la cual corresponde a vibraciones características de la fase *b*. De manera similar, en la figura 9 B se muestran picos de absorbancia en las regiones ubicadas en 840cm^{-1} y 875cm^{-1} , los cuales son vibraciones típicas de la fase *b* [10], presentando mayor intensidad en la membrana sintetizada a 11,5cm, lo cual confirma que es la membrana con más presencia de fase *b*.

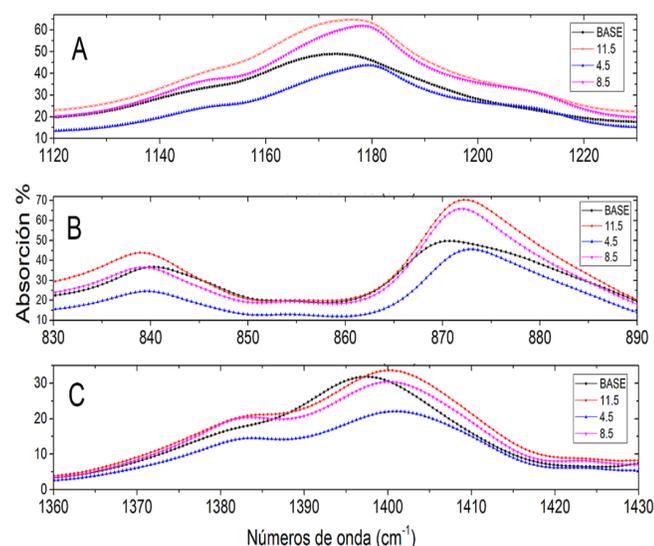


Figura 9. Regiones del espectro de frecuencia notables de las muestras no modificada y la membrana nano fibras del PVDF.

En la figura 9 C, se observan picos de absorción en otra región correspondiente a vibraciones de la fase *b*, la ubicada en 1400cm^{-1} [13], [14]. Nuevamente, se observa que la mayor intensidad corresponde a la muestra 11.5cm y la menor para la sintetizada a 4.5cm.

Para cuantificar los resultados, se normalizó la banda de 613.5cm^{-1} , la cual corresponde a la fase *a*, para comparar con la intensidad relativa de la banda a 840cm^{-1} , correspondiente a la fase *b*. Esta técnica es utilizada como un método rápido para determinar la estructura de la muestra [15]. Estos resultados se encuentran en la figura 10. Mediante este método, se encuentra que la mayor cantidad de fase *b*, se presenta en la membrana sintetizada a 11.5cm. Sin embargo, no se observan

cambios significativos entre las muestras sintetizadas a 4.5cm y 8.5cm similar a los resultados de la figura 8.

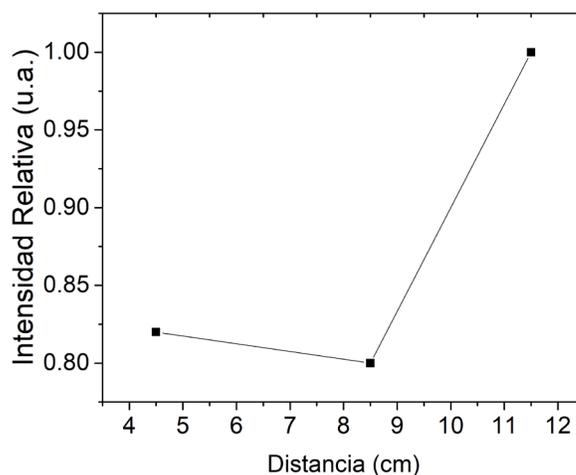


Figura 10. Relación de absorción de los espectros de la MNF-PVDF en comparación con el parámetro de la distancia de separación de la TE.

3.4 XRD

En la figura 11, se observa las difracciones de las muestras no modificada del PVDF granulado y las modificaciones de la MMF-PVDF, realizadas con el sistema electrospinning con recolector estacionario y automatizado, con variaciones en la de distancia de separación.

Se tomó como referencia el XRD de la muestra no modificada del PVDF granulado, sus picos difractados, en $2\theta = 18.3^\circ$ y 19.9° , corresponden a una difracción total en los planos (020) y (100), propios de una celda unidad monoclinica en fase cristalina α . El pico en $2\theta = 20.6^\circ$, corresponde a las reflexiones en el plano (200) de la fase cristalina β , propio de celdas unidades ortorrómbicas [10], no visualizado en la muestra base, pero si en las MMF-PVDF sintetizadas a diferentes distancias [15], [16].

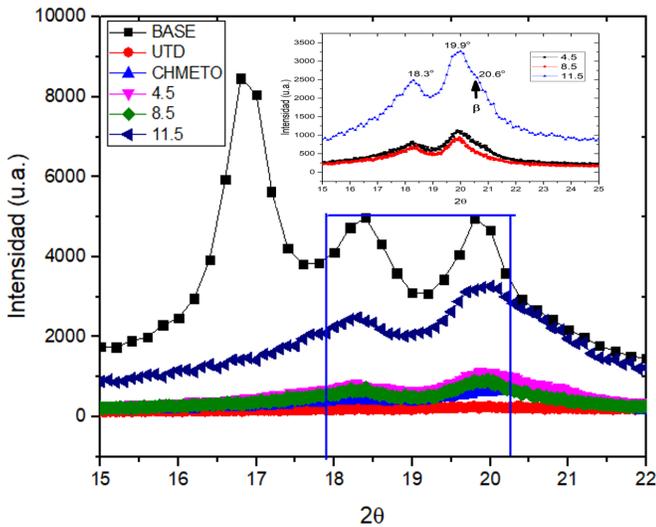


Figura 11. XRD. PVDF no modificado, capacitación de UTD, CH-CIFA estacionario, 4.5cm, 8.5cm y 11.5cm.

Para determinar el contenido de la fase b, presente en la muestra se realizó un ajuste en la región que contienen los picos de difracción de 18.3°, 19.9° y 20.6° utilizando el programa Fitek como se muestra en la figura 12 de la membrana sintetizada a 11.5cm. Este análisis se realizó en todas las muestras. Para el ajuste, el programa podía manipular la intensidad y el ancho de cada gaussiana, pero mantenía la posición de los picos bloqueados.

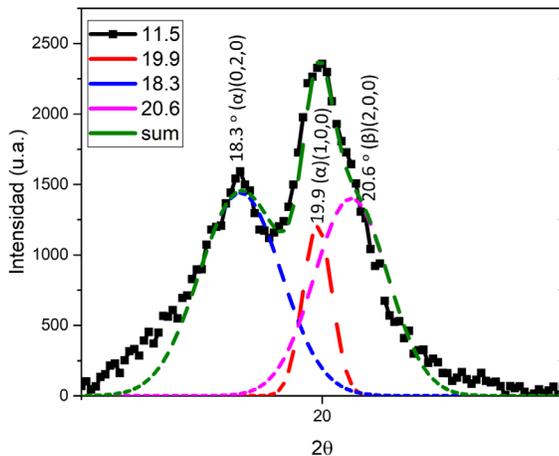


Figura 12. XRD- Áreas calculada de los ángulos de difracción 18.3°, 19.9°, 20.6° de la muestra modificada de la membrana nano fibrosa del PVDF de la distancia de separación 11.5cm.

En la figura 13, se muestra la relación del área de las gaussianas utilizadas en el ajuste de la reflexión en $2q = 20.6^\circ$ con la distancia de síntesis de las membranas. Este

análisis, permite obtener información sobre la cantidad de fase piezoeléctrica b presente en cada muestra [17]. Se obtuvo un área de $4300u^2$ para la muestra sintetizada a 11,5cm, en las de 4,5cm y 8.5cm se registraron $1400u^2$ y $880u^2$, respectivamente. Esto indica que la muestra sintetizada a 11.5cm posee mayor cantidad de estructura rotacional de fase β , en comparación a las otras dos muestras.

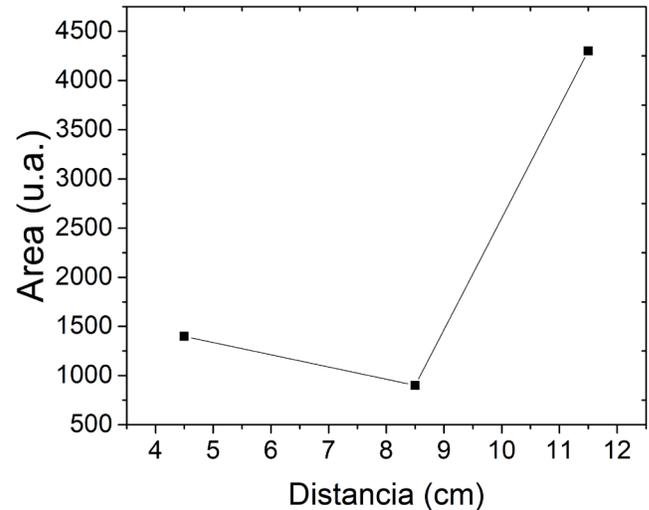


Figura 13. XRD. Área de la regiones de difracción para $2q = 20.6^\circ$ vs la distancia de separación del sistema electrospinning.

3.5 SEM

La figura 14 muestra las imágenes SEM obtenidas para las membranas de PVDF sintetizadas. En la Figura 14 (A), se presenta la muestra no modificada del PVDF granulada, el cual se observa en forma de una pasta gruesa. En cambio, para la muestra de la UTD de la Figura 14 (B), se obtuvo una aleatoria distribución de las microfibras de PVDF. En la Figura 14 (C) poseen una distribución aleatoria con diámetros en la escala de los micrómetros. De manera similar, en la Figura 14 (D) y (E), para las muestras sintetizadas a 4.5cm y 8.5cm, se obtuvieron microfibras con diámetros promedios de (185 ± 128) nm y (196 ± 99) nm, respectivamente. En la figura 14 (F), para la muestra de 11.5cm, se observan distribuciones de microfibras con diámetros promedio de (104 ± 37) nm.

En la figura 15, se observa las distribuciones del diámetro de las microfibras (nm), para las tres muestras sintetizadas a las distancias de 4.5cm, 8.5cm y 11.5cm por la TE. Para este análisis se utilizó el programa Image J, que es un programa procesador de imágenes en la que

se pueden medir distancias, una vez se calibre la regla con las escalas presentes en las figuras.

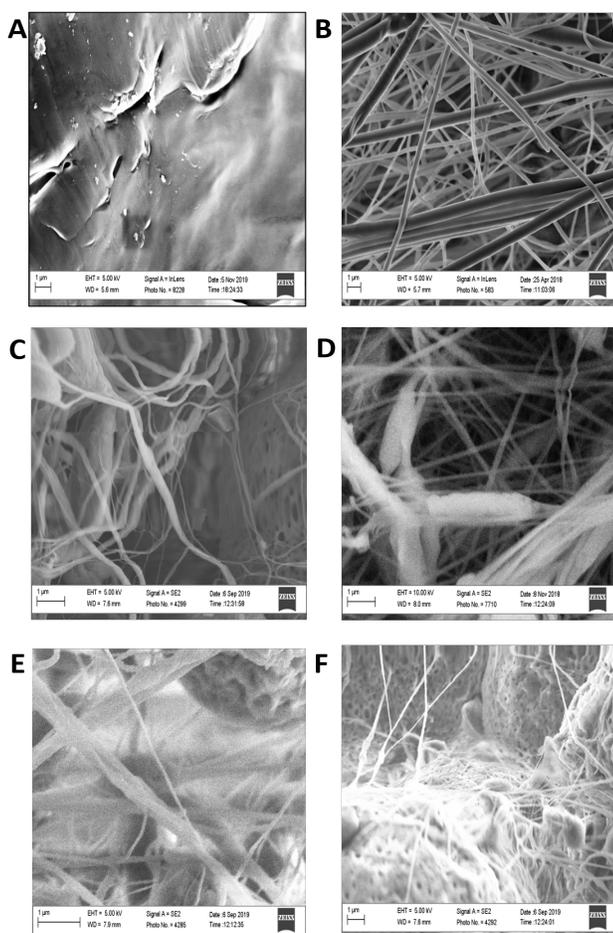


Figura 14. Imágenes SEM a escala de 1,0mm. Morfología del PVDF: (A) No modificado; (B) UTD; (C) CIFA-EST; (D) 4.5cm; (E) 8.5cm; (F) 11.5cm.

Se puede indicar que, las microfibras de las muestras de 4.5cm y 8.5cm, poseen distribuciones aleatorias y su tendencia es para diámetros de fibras mayores a 200nm. En cambio, para la muestra de 11.5cm, el diámetro de sus fibras posee distribuciones menores a los 150nm. El diámetro de las microfibras se encuentra relacionado con la presencia de la estructura rotacional de la fase β [3], ya que, el engolamiento de las fibras a través del campo eléctrico en la TE, produce rotaciones en la estructura molecular del polímero.

Los resultados de las observaciones realizadas en este trabajo están resumidos en la figura 16. Los resultados del SEM muestran que aumentos en la separación de la aguja y el cilindro colector, provocan disminuciones del diámetro de las fibras de PVDF.

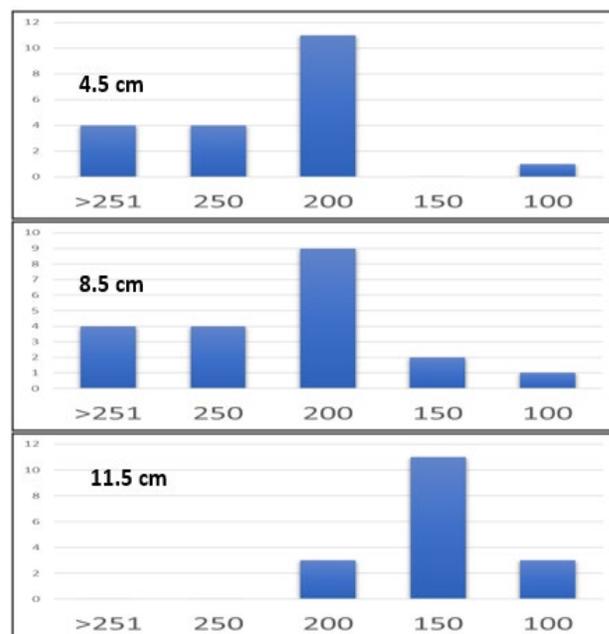


Figura 15. Distribución de frecuencia del diámetro de fibras (nm).

Al mismo tiempo, los resultados presentados en las pruebas estructurales de FTIR-ATR, Raman y XRD, fueron acordes con la aparición de la fase piezoeléctrica β [17], [18], principalmente, en la muestra sintetizada a una distancia de 11.5cm. Esto nos da a entender que existe una relación entre el diámetro de las microfibras del PVDF con la presencia de la fase β . La prueba que no corrobora esta hipótesis es la de pulso voltaje. Sin embargo, como se puede apreciar en la figura 3, la muestra a 11.5cm es porosa y delgada, y esta característica afecta la respuesta piezoeléctrica.

Los resultados indican que, el campo eléctrico producido entre la aguja y el cilindro colector tiende a alinear los monómeros del PVDF hacia la estructura β . Entre más distante entre la aguja y el colector de la TE, más posibilidad de elongar la fibra, haciéndola más delgada y aumentando la densidad de la estructura β . Para lograr una muestra con mayor espesor, el tiempo de fabricación se debe aumentar.

Las diferentes técnicas de caracterización estructural aplicadas, (figuras, 8, 10 y 13) indican que la muestra sintetizada a 4.5cm contiene más estructura β que la muestra de 8.5cm, lo cual se puede atribuir a la intensidad del campo eléctrico local producido por el TE.

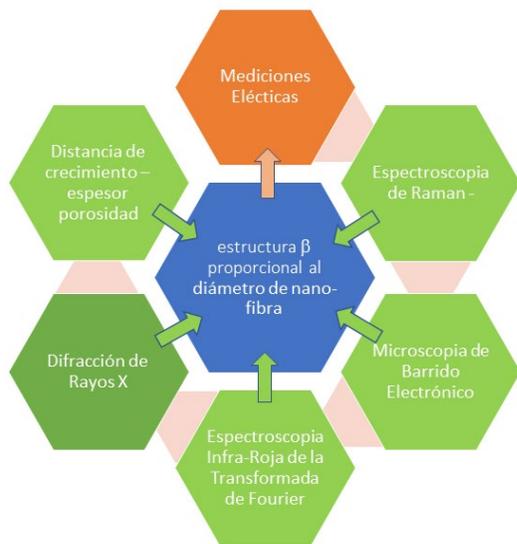


Figura 16. La estructura β del PVDF está relacionada con el diámetro de las fibras (idea principal de la investigación), es confirmada por cinco de las pruebas realizadas. Las pruebas eléctricas son inconclusas debido a la diferencia de espesor y densidad de las muestras.

4. Conclusiones

Se logró obtener membranas micro fibrosas del PVDF por la técnica de electrospinning, a partir de una solución viscoelástica del polímero, variando la distancia de separación con respecto a la aguja hipodérmica al cilindro colector. Los resultados indican que la estructura rotacional presente en las membranas de PVDF sintetizadas era predominante la fase piezoeléctrica β . Las membranas micro fibrosas presentaron superficie porosa. La medición de la respuesta de voltaje permitió obtener valores picos de 2.0mV, no repetitivos, atribuido al espesor no constante de las membranas y al ruido en las mediciones. Las técnicas de caracterización Raman y FTIR, presentaron bandas de absorción típicas de estructuras cristalinas en fase piezoeléctrica β , presentando mayor proporción de esta fase, la membrana sintetizada a una distancia de 11.5cm con la TE. Específicamente, el FTIR presentó mayor cambio en la región de 2900cm^{-1} a 3000cm^{-1} , lo cuales son cambios de frecuencias asociados con los hidrocarburos. De manera similar, en la caracterización por XRD, el pico de difracción en $2\theta = 20.6^\circ$, confirma la presencia de estructura rotacional β , con mayor proporción en la muestra sintetizada a 11.5cm.

Los resultados en espectroscopia SEM, indicaron que el diámetro y distribución de micro fibras en las MMF-

PVDF es afectado por la distancia de síntesis utilizada en la TE.

Para ampliar la investigación se sugiere realizar las siguientes recomendaciones: Encontrar el método y/o condiciones óptimas para la preparación solución viscoelástica del PVDF, ajustando el conjunto de variables propios del proceso de síntesis. Evaluar el método y/o condiciones óptimas para la técnica de electrospinning para la membrana micro fibrosa del PVDF, ajustando las variables como flujo del inyector, diámetro de la aguja hipodérmica, voltaje aplicado de la fuente. Mejorar la técnica de medición eléctrica de las propiedades piezoeléctricas. Medir las propiedades ferroeléctricas de la membrana micro fibrosa del PVDF. Diseñar un modelo apropiado utilizando la membrana micro fibrosa del PVDF, para almacenamiento y transferencia de energía en dispositivos electrónicos.

Con la TE se pueden producir membranas piezoeléctricas utilizadas en dispositivos con múltiples aplicaciones en la cosecha de energía mecánica. R. Guigon comprobó [19] que mediante la utilización de caídas de gotas agua, con diámetros de 3.0mm, a una velocidad de caída 4.5m/s, que una membrana piezoeléctrica de PVDF, se puede generar $17\mu\text{W}$ como pico de potencia.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Doctor Orlando Auciello por la oportunidad de caracterizar la muestra en la Universidad de Texas en Dallas. Al Dr. Eleicer Ching por haber proporcionado el equipo de electrospinning, como guía para esta investigación. Además, a la Dirección de Relaciones Internacionales y Senacyt por su apoyo de financiamiento de pasantía. Al Dr. Majid Minari por la capacitación en la preparación de la solución viscoelástica y técnica de electrospinning, en el Departamento de Ingeniería Mecánica del Instituto de Nano Tecnología de la Universidad de Texas en Dallas, con la colaboración del Magister Salvador Moreno. Por último, a la Universidad Autónoma de Chiriquí, por prestar sus instalaciones del Centro de Investigación de Física Aplicada, con el apoyo de los Doctores Pablo Weigandt. Además, al profesor Armando González y la estudiante María Bryden, en la preparación de las muestras. La Dra. Elida de Obaldía agradece el apoyo de la Universidad Tecnológica de Panamá. Esta investigación fue posible gracias al apoyo del Sistema Nacional de Investigación

(SNI) de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Panamá).

REFERENCIAS

- [1] K. Tashiro, K. Takano, M. Kobayashi, Y. Chatani, and H. Tadokoro, "Structural Study On Ferroelectric Phase Transition Of Vinylidene Copolymers (111) Dependence Of Transitional Behavior On Vdf Molar Content Fluoride-Trifluoroethylene," *Ferroelectrics*, vol. 57, no. 1, pp. 297–326, 1984, doi: 10.1080/00150198408012770.
- [2] D. H. Reneker and A. L. Yarin, "Electrospinning jets and polymer nanofibers," *Polymer*, 2008, doi: 10.1016/j.polymer.2008.02.002.
- [3] J. Doshi and D. H. Reneker, "Electrospinning process and applications of electrospun fibers," *J. Electrostat.*, 1995, doi: 10.1016/0304-3886(95)00041-8.
- [4] M. Baniasadi *et al.*, "High-performance coils and yarns of polymeric piezoelectric nanofibers," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 7, no. 9, pp. 5358–5366, 2015, doi: 10.1021/am508812a.
- [5] J. Chang, M. Dommer, C. Chang, and L. Lin, "Piezoelectric nanofibers for energy scavenging applications," *Nano Energy*, 2012, doi: 10.1016/j.nanoen.2012.02.003.
- [6] A. Gheibi, M. Latifi, A. A. Merati, and R. Bagherzadeh, "Piezoelectric electrospun nanofibrous materials for self-powering wearable electronic textiles applications," *J. Polym. Res.*, 2014, doi: 10.1007/s10965-014-0469-5.
- [7] "Polyk lab." <http://www.polyk-lab.com/product-1102>.
- [8] Y. A. Barnakov *et al.*, "Light intensity-induced phase transitions in graphene oxide doped polyvinylidene fluoride," *Opt. Mater. Express*, 2018, doi: 10.1364/ome.8.002579.
- [9] J. M. Pastor, T. Jawhari, and C. Merino, "CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES POLÍMEROS MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE LA MICROESPECTROSCOPIA VIBRACIONAL Revista Iberoamericana de Polímeros Pastor , Jawhari y Merino," *Rev. Iberoam. polímeros*, 2003.
- [10] X. Cai, T. Lei, D. Sun, and L. Lin, "A critical analysis of the α , β and γ phases in poly(vinylidene fluoride) using FTIR," *RSC Adv.*, vol. 7, no. 25, pp. 15382–15389, 2017, doi: 10.1039/c7ra01267e.
- [11] Y. Leng, *Materials characterization: Introduction to microscopic and spectroscopic methods: Second edition*. 2013.
- [12] Y. U. R. I. A. B. Arnakov *et al.*, "Light intensity-induced phase transitions in graphene oxide doped polyvinylidene fluoride," vol. 8, no. 9, pp. 2579–2585, 2018.
- [13] H. Xu, Z. Y. Cheng, D. Olson, T. Mai, Q. M. Zhang, and G. Kavarnos, "Ferroelectric and electromechanical properties of poly(vinylidene-fluoride-trifluoroethylene-chlorotrifluoroethylene) terpolymer," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78, no. 16, pp. 2360–2362, 2001, doi: 10.1063/1.1358847.
- [14] P. Martins, A. C. Lopes, and S. Lanceros-Mendez, "Electroactive phases of poly(vinylidene fluoride): Determination, processing and applications," *Progress in Polymer Science*, vol. 39, no. 4. Elsevier Ltd, pp. 683–706, 2014, doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.07.006.
- [15] T. Lei, L. Yu, G. Zheng, L. Wang, D. Wu, and D. Sun, "Electrospinning-induced preferred dipole orientation in PVDF fibers," *J. Mater. Sci.*, 2015, doi: 10.1007/s10853-015-8986-0.
- [16] Y. J. Park, Y. S. Kang, and C. Park, "Micropatterning of semicrystalline poly(vinylidene fluoride) (PVDF) solutions," *Eur. Polym. J.*, 2005, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2004.11.022.
- [17] J. Liu, X. Lu, and C. Wu, "Effect of preparation methods on crystallization behavior and tensile strength of poly(vinylidene fluoride) membranes," *Membranes (Basel)*, 2013, doi: 10.3390/membranes3040389.
- [18] B. Mohammadi, A. A. Yousefi, and S. M. Bellah, "Effect of tensile strain rate and elongation on crystalline structure and piezoelectric properties of PVDF thin films," *Polym. Test.*, 2007, doi: 10.1016/j.polymertesting.2006.08.003.
- [19] R. Guigon, J. J. Chaillout, T. Jager, and G. Despesse, "Harvesting raindrop energy: Experimental study," *Smart Mater. Struct.*, 2008, doi: 10.1088/0964-1726/17/01/015039.



Inspección del uso de la exergía en el marco de la sostenibilidad: Un caso aplicado a la combustión interna

Inspection of Exergy usage under a Sustainability Framework: A Case of Application for Internal Combustion

Mariana Bencid¹, José Delgado¹, Dafni Mora¹, Miguel Alejandro Chen Austin^{1*}

¹ Grupo de Investigación Energética y Confort en Edificaciones Bioclimáticas (ECEB), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: miguel.chen@utp.ac.pa

RESUMEN— Debido a la crisis climática que se vive hoy en día a nivel mundial y con el objetivo de proponer sistemas más eficientes y sostenibles que contribuyan al cumplimiento de los ODS planteados por la ONU, este artículo busca proponer un marco de referencia basado en análisis exergéticos para evaluar la eficiencia y nivel de sostenibilidad de un sistema, específicamente el caso de motores de combustión interna (MCI). A modo de contexto, se provee un estado del arte sobre la exergía y principales aportes recientes para el mejoramiento de los MCI basados en exergía. Se definen las ecuaciones necesarias para realizar un análisis exergético para el caso de un ciclo Diesel, considerando los procesos de combustión y transferencia de calor como fuentes de generación de entropía. De igual manera, se estableció un indicador de sostenibilidad a partir del balance exergético para un sistema. Se aplicaron estas ecuaciones para un caso de estudio de un MCI y se realizaron pruebas con varios tipos de combustibles a modo de comparar su eficiencia, de los cuales el etano (C_2H_6) resultó ser el combustible más eficiente y con mayor nivel de sostenibilidad comparado con los demás. Sin embargo, se obtuvo que las reacciones químicas en general, representan un gran porcentaje de pérdidas en la calidad, así como una amenaza a la sostenibilidad del sistema.

Palabras clave— Combustión, eficiencia, exergía, irreversibilidad, sostenibilidad.

ABSTRACT— Due to the climate crisis that is being experienced today worldwide and to propose more efficient and sustainable systems that contribute to the fulfillment of the SDGs proposed by the UN, this article seeks to propose a reference framework based on exergetic analysis for evaluating the efficiency and level of sustainability of a system, specifically the case of internal combustion engines (ICM). As a context, state of the art on exergy and main recent contributions for improving exergy-based ICMs are provided. The necessary equations are defined to carry out an exergy analysis for a Diesel cycle, considering the combustion and heat transfer processes as sources of entropy generation. Similarly, a sustainability indicator was established based on the exergy balance for a system. These equations were applied to a case study of an ICM, and tests were carried out with various types of fuels to compare their efficiency. Ethane (C_2H_6) turned out to be the most efficient fuel and with the highest sustainability level compared to others. However, it was found that chemical reactions, in general, represent a large percentage of quality losses, as well as a threat to the sustainability of the system.

Keywords— Combustion, efficiency, exergy, irreversibility, sustainability.

1. Introducción

Desde el desarrollo de los primeros motores de combustión interna en la década de 1860 [1], el ser humano ha estudiado incansablemente distintos mecanismos de mejora para aumentar la eficiencia de dichos motores. Sin embargo, durante muchos años, estos estudios estuvieron basados en la primera ley de la

termodinámica, que se limita a evaluar conservación y cantidad de energía, sin analizar fuera de las fronteras de un sistema, de manera que este es un enfoque que no se involucra con las características ambientales que rodean al sistema y que por ende se ven afectadas por el mismo.

No obstante, debido a la necesidad de contribuir a la solución de distintos problemas ambientales a los cuales

Citación: M. Bencid, J. Delgado, D. Mora y M. Chen, “Inspección del uso de la exergía en el marco de la sostenibilidad: Un caso aplicado a la combustión interna”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 22 de enero de 2021. **Recibido con correcciones:** 22 de enero de 2021. **Aceptado:** 10 de febrero de 2021.

DOI: 10.33412/idt.v17.1.3026

Copyright: 2021 M. Bencid, J. Delgado, D. Mora y M. Chen. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

nos enfrentamos actualmente, se han buscado otras maneras de poder medir y evaluar distintos procesos y sistemas (entre los cuales se encuentran los sistemas termodinámicos) para así poder localizar aquellos factores que amenazan la sostenibilidad y eficiencia de un sistema y de esta manera estudiar oportunidades de mejora que estén alineadas con los objetivos de desarrollo sostenible propuestos por la ONU.

Estos dos conceptos, sostenibilidad y eficiencia se unen en el concepto de exergía que, a través de los principios de la primera y segunda ley de la termodinámica, permite realizar un análisis profundo sobre las irreversibilidades de los procesos que disminuyen la sostenibilidad y eficiencia de un sistema. Para este caso de estudio, un MCI.

1.1 Aplicaciones y avances de la exergía

No fue sino hasta el siglo XX que autores como Darrius (1931), Hausser & Hegelman (1950), Frieder (1953), Lange & Schmidt (1953), Grassmann & Kammerer, Nesselman (1955) Bock y Mattarolo (1956), habiendo evaluado las definiciones de eficiencia según la primera ley de la termodinámica, proponen que un nuevo parámetro de desempeño basado en la segunda ley debe ser utilizado [2].

Estas publicaciones sentaron las bases para múltiples estudios entre los cuales resalta el artículo “Disponibilidad e irreversibilidad” publicado por Joseph Keenan en 1951, el cual está basado en los aportes de Gibbs, quien a través de sus obras implementó la utilidad de los gráficos para representar las propiedades termodinámicas de las sustancias mediante superficies y explicó un método que relaciona la energía, entropía y volumen como superficie. En su artículo, Keenan profundiza estos estudios deduciendo expresiones para un trabajo máximo basándose en coeficientes de rendimiento, irreversibilidad cuantificable y disponibilidad de varios tipos de sistemas. Este artículo y otros trabajos de Keenan proporcionaron ejemplos y métodos para ampliar los hallazgos de Gibbs en el ámbito termodinámico y permitieron que el análisis de la segunda ley se aplicara a sistemas reales [3].

Poco después de esta publicación, el físico alemán Kant publicó un artículo introduciendo el término exergía para connotar el trabajo reversible realizado de un proceso cíclico. Kant creó el término “exergía” combinando el griego *exo* que significa fuera y energía, en alemán “*exergie*”. Años después, su compatriota, D. Baehr, definió la exergía como la energía total convertible que de igual manera puede transformarse en

otra forma de energía. Después de esto, el término exergía ganó aceptación científica y se volvió un término estándar [2].

Al combinar los principios tanto de la primera como la segunda ley de la termodinámica, la exergía puede ser utilizada como indicador de eficiencia ya que permite localizar las irreversibilidades dentro del sistema que causan degradación en la energía y cuantificar de esa manera, el remanente de energía disponible para convertirse en trabajo útil. Esto se traduce en una evaluación profunda de la cantidad y calidad de la energía, razón por la cual, autores como Gong [4] establecen que para mejorar la eficiencia de procesos de conversión de energía es necesario aplicar los conceptos de exergía y análisis exergético. Sin embargo, para lograr esto, es necesario establecer de manera precisa las fronteras de nuestro sistema y un estado de referencia que nos indiquen los parámetros bajo los cuales se alcanza el máximo trabajo útil posible [5]. Muy comúnmente, el estado de referencia está definido por las condiciones ambientales, razón por la cual han surgido definiciones recientes como la propuesta por Lucía, que define la exergía como “la energía disponible para conversión desde las propiedades definidas de un reservorio a unas propiedades específicas, usualmente las del ambiente” [6]. Otra definición ampliamente aceptada es aquella publicada por Boroumandjazi en la que explica la exergía como “la cantidad máxima de trabajo que puede ser producida por un sistema, un flujo de masa o energía en equilibrio con sus alrededores” [7].

Añadido a las ventajas previamente mencionadas, el concepto de exergía como indicador de calidad de energía cobra vital importancia al ser relacionado específicamente con la crisis climática mundial que se vive actualmente ya que, en contraste con los métodos convencionales de evaluación de desempeño, un análisis exergético vincula las irreversibilidades de los procesos y su impacto en la degradación de energía relacionada con el ambiente. De esta manera la exergía de un sistema no sólo es aplicable para la optimización de procesos sino que a la vez funciona como un indicador de sostenibilidad [6]. Por estas razones, los análisis exergéticos se vuelven claves al estudiar distintos sistemas termodinámicos, entre los cuales resaltan los motores de combustión interna (MCI), especialmente porque el uso de combustibles fósiles es la primera fuente de emisión de gases de efecto invernadero como el CO₂ [8]. Esto ha llevado a numerosos científicos a realizar estudios sobre este tipo de motores y su desempeño

utilizando la primera y segunda ley de la termodinámica, así como el concepto de exergía.

1.2 Aplicaciones y avances de la exergía en MCI

A continuación, un listado de los avances en orden cronológico sobre los principales estudios realizados a motores de combustión interna, aplicando la segunda ley de termodinámica y conceptos de exergía, subdivididos en dos períodos: primeros avances (1957-2000) y avances recientes (2000-2015).

Primeros avances (1964-2000). Patterson & Van Wylen (1964): Realizaron un trabajo pionero, describiendo la simulación del ciclo termodinámico con motor encendido por chispa. Este incluía los valores de entropía que determinaron la exergía de tiempo de compresión y expansión. Además, como avance importante, fueron capaces de aislar la destrucción de exergía asociada con el proceso de transferencia de calor y combustión [9].

Primus, utilizando la segunda ley, evaluó mejoras del turbocompresor para mejorar la refrigeración del aire. Mostró que a medida que la combustión disminuye, la destrucción de exergía aumenta debido a maximizar el volumen y minimizar la mezcla [10].

Flynn, presentó un análisis basado igualmente en la segunda ley, describiendo los procesos dentro de un motor Diesel en comparación con el análisis tradicional de la primera ley. Utilizaron la conservación de masa y energía para sus cálculos y las relaciones combustible-aire para sus simulaciones [10].

Alkidas, su investigación fue diferente a los demás, aplicando la primera y segunda ley a un sólo cilindro del motor Diesel de cámara abierta. Como resultado obtuvo que la segunda ley fue más eficiente y concluyó que la mitad de la energía de los gases de escape podrían utilizarse para la producción de trabajo [11].

Datta & Som, desarrollaron un modelo teórico sobre el análisis de exergía, basado en la transferencia y disponibilidad de flujo en el proceso de combustión para evaluar la irreversibilidad. Utilizando las dos fases del motor fue capaz de calcular numéricamente los campos de velocidad, temperatura y concentración en el proceso de combustión [12].

Avances recientes (2000-2015). Rakopoulos & Giakoumis, basaron sus estudios en el rendimiento de energía y exergía de un motor Diesel turboalimentado con un análisis computacional. Incluyen características novedosas para la simulación de este modelo, como separar los procesos de cada cilindro y la fricción mecánica del combustible. Concluyeron que, a diferencia

de la energía, la exergía es destruida dentro del sistema, y esta destrucción, conocida como irreversibilidad, puede conducir a un pobre rendimiento del motor [9].

Jafarmadar, realizó el análisis en la cámara principal de un motor Diesel de inyección directa para dos cargas con motor de par de máxima velocidad. Su trabajo demostró que el modelado multidimensional puede utilizarse en cámaras de geometría completa para obtener información sobre los campos de flujo en la combustión, basándose en la segunda ley [13]. Abassi, basó su investigación en el efecto que causa variar el diámetro del orificio de la boquilla de un motor Diesel de inyección directa. Concluyó que el maximizar el diámetro, conduce a un aumento en la exergía de trabajo, así como la pérdida de disponibilidad y disminución en irreversibilidad de combustión y disponibilidad de escape [14]. Ozkan, utilizando un motor de cuatro tiempos, se hizo funcionar con diferentes presiones de inyección. El estudio demostró que, al maximizar presión de inyección, aumenta la eficiencia de exergía en un MCI [5].

Debido a la inminente necesidad de aplicar conceptos más eficientes a la hora de evaluar el desempeño y sobre todo la sostenibilidad de un sistema, este artículo presenta la formulación y aplicación de la eficiencia exergética y su aplicación para motores de combustión interna, con el propósito de hacer un análisis profundo de las irreversibilidades y degradación de energía de los procesos que ocurren en estos motores. De esta manera, proponer soluciones prácticas para la mejora de la eficiencia del motor, que a su vez tomen en consideración el impacto ambiental que estos acarrear.

2. Materiales y métodos

Para iniciar un análisis exergético que permita estudiar correctamente el rendimiento de un sistema, es necesario definir las ecuaciones que expresen a través de los principios de la segunda ley de la termodinámica, la máxima eficiencia exergética posible de alcanzar (figura 1).

2.1 Definición de la eficiencia exergética

Teniendo en cuenta que la eficiencia se define como la razón entre el valor de salida deseada y la entrada requerida, es posible expresar la eficiencia η de un proceso en términos de exergía de la siguiente manera:

$$\eta = 1 - \frac{\text{Exergía destruida}}{\text{Exergía suministrada}} \quad (1)$$

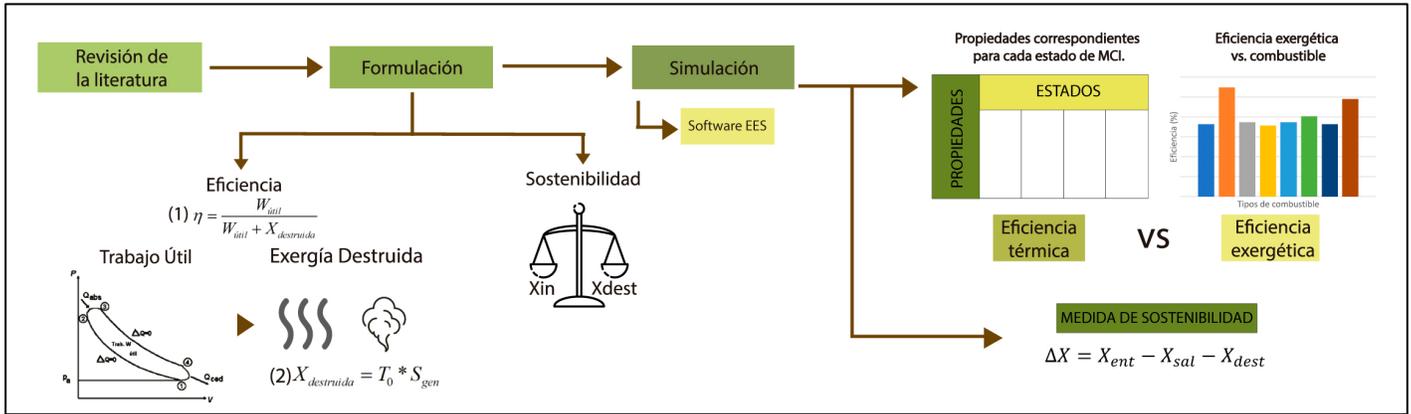


Figura 1. Representación esquemática de la metodología utilizada para el estudio.

Como se puede observar de la ecuación (1), la eficiencia máxima se obtiene cuando no se destruye exergía (proceso ideal sin irreversibilidades).

Una vez conocida la definición de eficiencia a partir de la segunda ley de la termodinámica, corresponde formular las ecuaciones que representen la exergía asociada con las distintas formas de energía capaces de realizar trabajo.

Al abordar la exergía transferida desde o hacia el sistema por calor, el análisis es diferente, puesto que el calor representa energía de menor calidad y por esta razón, no tiene la capacidad de convertirse completamente en trabajo. Para este caso, la exergía transferida por calor (X_{calor}) corresponde a la ecuación (2):

$$X_{calor} = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (2)$$

Donde T representa la temperatura del sistema, Q el calor transferido y el subíndice 0 representa el estado muerto o estado en equilibrio con el ambiente ($T_0 \sim 30 \text{ °C}$ y $P_0 \sim 1 \text{ atm}$). Aquellos estados sin subíndice se refieren a los estados especificados inicialmente para el proceso.

Entonces, a través de un balance de energía y el uso del concepto de entropía, se deduce que un sistema cerrado que experimenta un proceso reversible que involucre transferencia de calor y que alcanza el equilibrio con el punto de referencia, entrega un trabajo útil total (W) representado por la ecuación (3):

$$W = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) \quad (3)$$

Donde U se refiere a la energía interna y S a la entropía dada en cada estado correspondiente. P, V y T,

corresponden a la presión, volumen y temperatura, respectivamente. Para un sistema que inicialmente posee energía cinética y potencial, la exergía transferida (X) puede representarse mediante la ecuación (4), donde:

$$X = (U - U_0) + P_0(V - V_0) - T_0(S - S_0) + m \frac{v^2}{2} + mgz \quad (4)$$

De lo anterior, la ecuación (4) puede ser escrita de forma intensiva como en la ecuación (5):

$$\phi = (e - e_0) + P_0(v - v_0) - T_0(s - s_0) \quad (5)$$

donde e representa el conjunto de formas de energía que incluye energía interna, cinética y potencial.

Por lo tanto, el cambio de exergía entre dos estados, el cual representa el máximo trabajo posible (o mínimo requerido en caso de resultar positivo) en un proceso reversible (W_{rev}) está dado por la ecuación (6):

$$\Delta\phi = (e_2 - e_1) + P_0(v_2 - v_1) - T_0(s_2 - s_1) = W_{rev} \quad (6)$$

Así, tratándose de motores de combustión interna, en los cuales, la salida deseada es el trabajo neto producido por el motor y tomando en cuenta que la exergía suministrada es igual a la suma de las exergías recuperada y destruida, es posible escribir la ecuación (1) como en la ecuación (7):

$$\eta = \frac{W_{útil}}{W_{útil} + \sum X_{destruida}} \quad (7)$$

2.2 Análisis exergético para MCI

En la figura 1 se muestran los procesos internos de un MCI, donde el proceso 1-2 corresponde a una compresión adiabática, lo que quiere decir que, para este proceso, la exergía será igual al trabajo realizado por el

cambio de volumen. En el proceso 2-3, como consecuencia de la transferencia de calor al sistema, ocurre la combustión, reacción química que, al ser un proceso irreversible, produce destrucción de exergía ($X_{química}$). En el proceso 3-4 se expande el fluido adiabáticamente, por lo cual la exergía se analiza de la misma manera que en el proceso 1-2. Por último, en el proceso 4-1 se rechaza calor al ambiente, preparándose así el motor para iniciar nuevamente el ciclo.

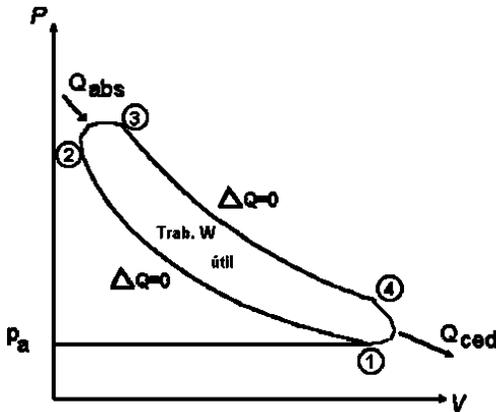


Figura 2. Ciclo de combustión interna genérico. Donde Q_{abs} y Q_{ced} serán nombrados como Q_H y Q_L , respectivamente [15].

Para este caso de estudio, se analizará un MCI funcionando con ciclo Diesel, en el cual la transferencia de calor al sistema (proceso 2-3) ocurre a presión constante. En este caso, el trabajo útil del sistema está dado por $W_{útil} = Q_H - Q_L$. Donde Q_H y Q_L representan el calor absorbido y cedido por el sistema respectivamente.

Es importante recordar que cada transferencia de calor a través de una diferencia finita de temperatura conlleva generación de entropía y, por lo tanto, destrucción de exergía. Esta destrucción de exergía por transferencia de calor (X_{TC}) puede ser representada como en la ecuación (8):

$$X_{TC} = T_0 \sum \frac{Q}{T} \quad (8)$$

Como se mencionó anteriormente, la combustión también representa una destrucción de exergía. Para cuantificarla, es necesario determinar primero, la entropía que se genera en el proceso. Un balance de entropía, en este caso, puede ser representado a través de la ecuación (9):

$$S_{generada} = S_{producto} - S_{reactivo} - \sum \frac{Q_{in}}{T} \quad (9)$$

La entropía de cada componente puede calcularse como: $S_i = N_i \bar{s}_i(T, P_i)$. Donde N_i representa el número de moles del componente a estudiar y P_i la presión de dicho componente.

A partir de la ecuación anterior y la (9), se puede generar una ecuación para la exergía destruida por combustión como la siguiente: $X_{química} = T_0 [\sum (N_i \bar{s}_i)_{producto} - \sum (N_i \bar{s}_i)_{reactivo}]$. Donde \bar{s}_i a una temperatura y presión determinada está dada por: $\bar{s}_i(T, P_i) = \bar{s}_i^o(T, P_0) - R_u \ln |y_i P_{mezcla} / P_0|$, en donde, y_i representa la fracción molar y s^o la entropía absoluta del componente.

2.3 Exergía como medida de sostenibilidad

Si bien es cierto que conocer la cantidad de exergía disponible en un sistema por sí sólo no es indicador de sostenibilidad, es posible realizar un balance que exprese el cambio de exergía en el sistema y sea útil para medir la sostenibilidad del mismo [16]. El cambio negativo (ΔX) representará más exergía perdida que la transferida hacia el sistema inicialmente. Esto significaría que, debido a los procesos e irreversibilidades, se ha agotado el potencial de trabajo posible del sistema, y se ha destruido la exergía del ambiente, ya que la exergía no puede ser generada. En otras palabras, un balance de exergía negativo indica un proceso o sistema no sostenible.

$$\Delta X = X_{ent} - X_{sal} - X_{dest} \quad (10)$$

La ecuación (10) corresponde al balance de exergía donde X_{ent} y X_{sal} representan la exergía transferida por calor y trabajo hacia y desde el sistema respectivamente y para nuestro caso pueden ser calculadas a través del cambio de exergía en cada proceso.

2.4 Combustibles para el estudio

Para comprobar el método científico en el proyecto, se escogieron aleatoriamente distintos combustibles de trabajo que se sometieron al mismo estudio. Los combustibles utilizados se listan en orden alfabético a continuación:

- Benceno (C_8H_{18})
- Butano (C_4H_{10})
- Etano (C_2H_6)
- Hidrógeno (H_2)
- Metano (CH_4)
- Octano (C_8H_{18})
- Propano (C_3H_8)

- Propileno (C_3H_6)

3. Análisis de resultados y discusión

Se realizó un análisis exergético para un ciclo Diesel operando entre los estados definidos en la tabla 1. Todos los resultados fueron obtenidos con el software EES [17].

Si a partir del trabajo útil entregado por el motor, se calcula la eficiencia térmica (primera ley), obtenemos una eficiencia total de 52.04%, valor que entra en el rango usual para la eficiencia de MCI [1] y que será comparado con los valores de eficiencia exergética (segunda ley).

Tabla 1. Propiedades correspondientes para cada estado del MCI.

| | Estado 1 | Estado 2 | Estado 3 | Estado 4 |
|------------------------|----------|----------|----------|----------|
| T (°C) | 30 | 513.8 | 1301 | 605.2 |
| P (kPa) | 100 | 3115 | 3115 | 289.7 |
| u (kJ/kg) | 216.6 | 582.1 | 0.145 | 656.9 |
| s (kJ/kmol-K) | 5.716 | 5.716 | 6.519 | 6.519 |
| v (m ³ /kg) | 0.8701 | 0.07251 | 0.145 | 0.8701 |
| h (kJ/kg) | 263.7 | 807.9 | 1726 | 1973 |

Para este análisis, se tomaron en cuenta las reacciones de combustión de los distintos combustibles, con el propósito de hacer una comparación entre la exergía destruida por cada uno de ellos. Estos resultados se muestran en la tabla 2, ordenados descendientemente. A partir de esta tabla se puede apreciar que al utilizar etano como combustible, se destruye una menor cantidad de exergía en la combustión, comparada con la de los otros combustibles.

Tabla 2. Exergía destruida por combustión por combustible.

| Combustible | Xquímica [kJ/kg] |
|------------------------|------------------|
| Octano (C_8H_{18}) | 13 449 |
| Propano (C_3H_8) | 13 295 |
| Metano (CH_4) | 13 116 |
| Propileno (C_3H_6) | 12 943 |
| Benceno (C_6H_6) | 12 357 |
| Hidrógeno (H_2) | 9745 |
| Butano (C_4H_{10}) | 9307 |
| Etano (C_2H_6) | 8672 |

Utilizando esta tabla como comparación entre la exergía destruida por combustión, y la destruida por transferencias de calor ($X_{TC} = 477.7$ kJ/kg), se concluye que durante los procesos de combustión se destruye una cantidad de exergía considerablemente mayor a la destruida por la transferencia neta de calor en el sistema. Estos resultados permiten observar la capacidad que tienen los análisis exergéticos para localizar aquellas irreversibilidades que amenazan en mayor medida la eficiencia del MCI.

Con los resultados del trabajo útil y la exergía total destruida durante los distintos procesos del motor, se calculó la eficiencia exergética definida por la ecuación (7) para los combustibles mencionados. Como se dedujo de la ecuación, aquellos combustibles que producen más entropía en la combustión reflejan una menor eficiencia, puesto que destruyen mayores cantidades de exergía. De esta manera, resulta ser el etano el combustible más eficiente en comparación a los demás, alcanzando un valor de eficiencia de 5.485% (figura 2).

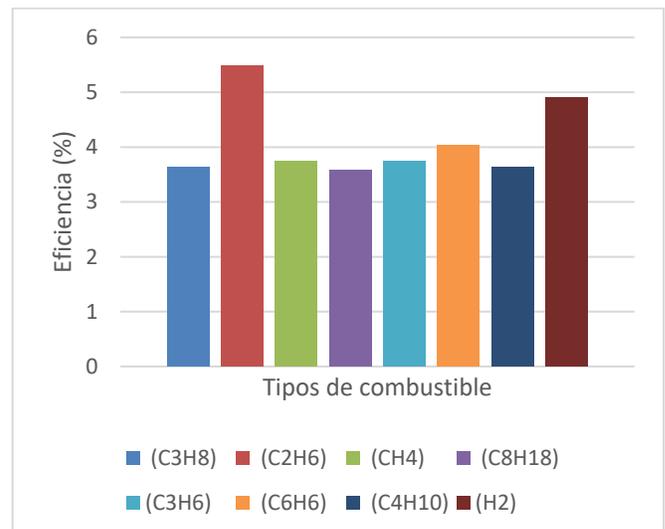


Figura 3. Valores de eficiencia exergética para un MCI operando con distintos combustibles.

Comparando las eficiencias del motor según primera y segunda ley, se puede observar una amplia diferencia entre ambas que se debe a que los principios de la primera ley que formulan la eficiencia toman en cuenta la cantidad de energía en un sistema, mas no la calidad de esta. En otras palabras, la eficiencia térmica falla en evaluar qué tanta de la energía del sistema está realmente disponible para realizar trabajo útil. Razón por la cual la eficiencia térmica puede resultar engañosa, mostrándonos un desempeño más alto del verdadero. De

esta manera, se resaltan los estudios realizados por otros autores [2], donde se enfatiza en la necesidad de combinar los principios de la segunda ley con los de la primera, para obtener un indicador de eficiencia más preciso. A pesar de que los resultados entre ambas eficiencias muestran una gran diferencia, se han realizado otros estudios, como el de Novak [16], en el cual se demuestra que dependiendo del sistema estudiado, las eficiencias pueden diferir hasta en un 80%.

Como último punto y con el propósito de aplicar el concepto de exergía como indicador de sostenibilidad, se calculó el cambio de exergía neto expresado en la ecuación (10) para cada caso de combustible, obteniendo como resultado únicamente cambios negativos de exergía, lo que se traduce en que, debido a la gran cantidad de entropía generada durante los procesos, el sistema destruyó más exergía que la transferida a él inicialmente. De esta manera se concluye que, para los combustibles utilizados, un MCI operando en ciclo Diesel, no puede considerarse sostenible. En la figura 3, se muestra una gráfica radial que indica el balance exergético para cada combustible.

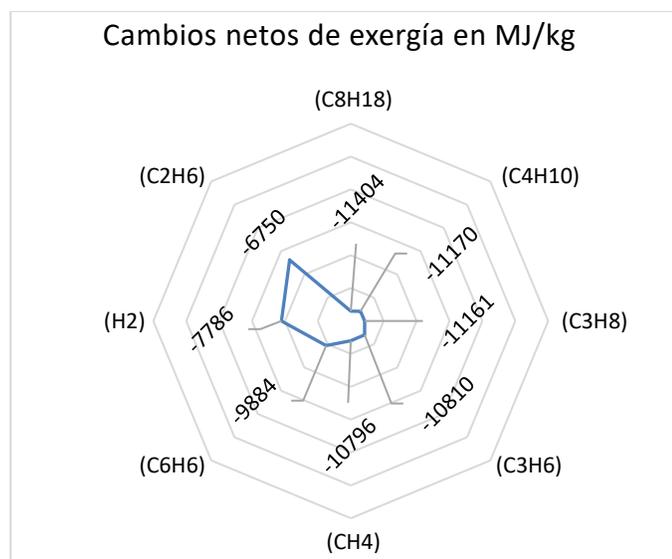


Figura 4. Cambios de exergía para distintos combustibles.

4. Conclusiones

El análisis exergético para el caso de estudio con distintos combustibles demostró ser eficaz al localizar las irreversibilidades del sistema que disminuyen la eficiencia. Bajo los parámetros utilizados, se mostró que a través de los procesos de combustión disminuye cuantiosamente la calidad de la energía contenida en el

sistema incluso más que en los procesos de transferencia de calor.

Al ser comparado este análisis con el método de eficiencia según la primera ley, queda en evidencia que el último resulta obsoleto al momento de evaluar la energía disponible para realizar trabajo útil.

Por otro lado, los resultados obtenidos con el indicador de sostenibilidad demuestran que los sistemas que involucran procesos de combustión tienden a ser poco sostenibles. Sin embargo, se recomienda ampliar el análisis exergético a otros tipos de combustible como por ejemplo los biocombustibles (bioetanol, biometano, biodiesel). De igual manera, se recomienda investigar otros indicadores de sostenibilidad basados en la exergía como, por ejemplo, aquellos que toman en cuenta las emisiones de CO₂.

Es importante destacar que para este proyecto no se tomó en cuenta la entropía generada por efectos de la fricción, lo cual, de haberlo hecho, resultaría en un análisis y resultados más cercanos a la realidad sobre la cantidad de exergía destruida en el sistema.

REFERENCIAS

- [1] J. Gaviria Rios, J. Mora, and J. Agudelo, "Historia motores de combustión," *Rev. Fac. Ing.*, no. 26, pp. 68–78, 2002.
- [2] E. Sciubba and G. Wall, "A brief commented history of exergy from the beginnings to 2004," *Int. J. Thermodyn.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–26, 2007, doi: 10.5541/ijot.1034000184.
- [3] J. H. Keenan, "Availability and irreversibility in thermodynamics," *Br. J. Appl. Phys.*, 1951, doi: 10.1088/0508-3443/2/7/302.
- [4] M. Gong and G. Wall, "Exergy analysis of the supply of energy and material resources in the Swedish society," *Energies*, vol. 9, no. 9, pp. 1–16, 2016, doi: 10.3390/en9090707.
- [5] P. S. Varbanov, H. H. Chin, A. E. P. Popescu, and S. Boldyryev, "Thermodynamics-based process sustainability evaluation," *Energies*, vol. 13, no. 9, May 2020, doi: 10.3390/en13092132.
- [6] U. Lucia and G. Grisolia, "Exergy inefficiency: An indicator for sustainable development analysis," *Energy Reports*, vol. 5, pp. 62–69, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.egy.2018.12.001.
- [7] G. Boroumandjazi, B. Rismanchi, and R. Saidur, "A review on exergy analysis of industrial sector," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 27, pp. 198–203, 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.06.054.
- [8] "Global Greenhouse Gas Emissions Data." <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>.

- [9] C. D. Rakopoulos and E. G. Giakoumis, "Simulation and exergy analysis of transient diesel-engine operation," *Energy*, 1997, doi: 10.1016/S0360-5442(97)00017-0.
- [10] R. J. Primus and P. F. Flynn, "ASSESSMENT OF LOSSES IN DIESEL ENGINES USING SECOND LAW ANALYSIS," 1986.
- [11] A. C. Alkidas, "The use of availability and energy balances in diesel engines," 1989, doi: 10.4271/890822.
- [12] A. Datta and S. K. Som, "Effects of spray characteristics on combustion performance of a liquid fuel spray in a gas turbine combustor," *Int. J. Energy Res.*, 1999, doi: 10.1002/(SICI)1099-114X(19990310)23:3<217::AID-ER473>3.0.CO;2-U.
- [13] S. Jafarmadar, R. Tasoujiazar, and B. Jalilpour, "Exergy analysis in a low heat rejection IDI diesel engine by three dimensional modeling," *Int. J. Energy Res.*, 2014, doi: 10.1002/er.3100.
- [14] H. Dave, B. Sutaria, and B. Patel, "Influence of nozzle hole diameter on combustion and emission characteristics of diesel engine under pilot injection mode," 2020, doi: 10.1088/1757-899X/810/1/012041.
- [15] A. Martinez v., "Motores de combustion interna," vol. 4, no. 2, pp. 1–94, 2007, doi: 10.1515/dmvm-1996-0202.
- [16] P. Novak, "Exergy as Measure of Sustainability of Energy System," *Int. J. Earth Environ. Sci.*, vol. 2, no. 2, Oct. 2017, doi: 10.15344/2456-351x/2017/139.
- [17] "EES software." <http://fchartsoftware.com/ees/>.



Interoperabilidad de objetos de aprendizaje en la plataforma Canvas, utilizando SCORM y el estándar IEEE 1484.12.1

Interoperability of learning objects on the Canvas platform, using SCORM and the IEEE 1484.12 standard

Rosa López P.^{1*}

¹Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación, Universidad de Panamá, Panamá

*Autor de correspondencia: yariselopez@gmail.com

RESUMEN— La interoperabilidad de los objetos de aprendizaje está relacionado con el conjunto de factores que tienen las plataformas e-learning para el manejo de estos contenidos, por lo que, es indispensable desarrollar los OA, tomando como referencia los modelos de estándares y normas relacionados con los contenidos para estos recursos, desde una perspectiva de interoperabilidad de las plataformas e-learning, en la actualidad diferentes recursos de tecnología administran, estructuran y guardan contenidos e-learning, para ser utilizados de una mejor forma. Es por ello, el proceso de distribución de los contenidos e-learning a través de Internet mediante el uso e interacción de una plataforma virtual está compuesto por texto, gráficos, animaciones, contenido multimedia, de forma ordenada para ubicar un curso en particular en una plataforma e-learning. En este estudio se tomó como referencia los componentes de los paquetes SCORM consiste en una serie de módulos que se encargan de controlar el progreso, puntuación y tiempos. La creación de objetos digitales de aprendizaje con Exelearning, ha permitido la incorporación de nuevas actividades, como se ha mencionado un OA: cualquier recurso con una intuición formativa, compuesto de uno o varios elementos digitales, descritos con metadatos, que pueda ser reutilizado dentro de un entorno e-learning. Por lo que, los OA en Exelearning y probando la interoperabilidad en CANVAS, se muestra que el nivel de la valoración de la evaluación por expertos en un 97% de aceptación de la interoperabilidad de los OA, utilizando el modelo SCORM y el estándar IEEE 1484.12.1.

Palabras clave— *Interoperabilidad, learning Objects, Canvas Platform, SCORM, IEEE 1484.12.1.*

ABSTRACT— The interoperability of learning objects is related to the set of factors that e-learning platforms have for the management of these contents, so it is essential to develop OA, taking as reference the models of standards and norms related to content for these resources, from an interoperability perspective of e-learning platforms, currently different technology resources manage, structure and save e-learning content, to be used in a better way. That is why, the process of distribution of e-learning content through the Internet through the use and interaction of a virtual platform is composed of text, graphics, animations, multimedia content, in an orderly way to locate a particular course in a e-learning platform In this study, the components of the SCORM packages were taken as a reference, consisting of a series of modules that monitor progress, punctuation and timing. The creation of digital learning objects with Exelearning, has allowed the incorporation of new activities, as an OA has been mentioned: any resource with a formative intuition, composed of one or several digital elements, described with metadata, that can be reused within An e-learning environment. Therefore, the executing companies in Exelearning and testing the interoperability in CANVAS show that the level of evaluation assessment by experts in 97% acceptance of the interoperability of the LOs, using the SCORM model and the IEEE 1484.12 standard .one.

Keywords— *Interoperability, Learning Objects, Canvas Platform, SCORM, IEEE 1484.12.1.*

1. Introducción

La interoperabilidad de los objetos de aprendizaje (OA), representa una forma en que los contenidos puedan ser reutilizados en cualquier plataforma tecnológica,

Citación: R. Lopez, "Interoperabilidad de objetos de aprendizaje en la plataforma Canvas, utilizando SCORM y el estándar IEEE 1484.12.1", *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 19 de julio de 2019. **Recibido con correcciones:** 31 de julio de 2019. **Aceptado:** 3 de julio de 2020.

DOI: 10.33412/idt.v17.1.3027

Copyright: 2021 R. Lopez. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

debido al auge en la utilización y la gran demanda de producción e intercambio de OA, es por ello por lo que los desarrolladores toman en cuenta los modelos de diseño de OA, estándares y normas con que se pueda cumplir la interoperabilidad de los contenidos.

Con este estudio se pretende analizar la reutilización de los OA, utilizando el modelo SCORM (Modelo Referenciado de Objetos de Contenido Compartible) los cuales deben estar bajo las especificaciones LMS (Learning Management System), y que cumplan con una serie de requerimientos de modo tal, que los objetos de aprendizaje (OA), estén normalizados para su respectivo uso en la plataforma de e-learning denominada CANVAS.

Para el desarrollo de este estudio, se inicia con la extracción de los datos, esta información se codifica de forma explícita de forma encapsulada para utilizarse con diversos propósitos y funciones, para que pueda ser interoperable con otras plataformas que manejen XML (Lenguaje de marcado extensible), SCORM, IEEE 1484.12.1, utilizando estos estándares se elaboran los objetos de aprendizaje utilizando Exelearning, y así ser incorporados en la Plataforma CANVAS, este estudio finaliza con la validación de aspectos por medio de la prueba LORI_ESP, con la población de expertos en objetos de aprendizajes en plataformas virtuales para la evaluación, como instrumento de evaluación de objetos de aprendizaje. Para así, analizar la interoperabilidad entre los objetos de aprendizaje en una plataforma tecnológica CANVAS mediante la elaboración de un OA y su aplicación en este de la metodología SCORM y su evaluación mediante el estándar, IEEE 1484.12.1

2. Fundamentos teóricos

Cuando trabaja en el desarrollo de algunas estrategias de aprendizaje en casa, uno de sus hijos jugaba con piezas de lego, en ese momento se dio cuenta que era necesario desarrollar piezas de aprendizaje interoperables que denominó: objetos de aprendizaje. Los organismos como IEEE, NIST (Instituto Nacional de Estándar y Tecnología), Cisco System en 1998, incorporan en el modelo de desarrollo de objetos de aprendizaje para plataformas e-learning aspectos tecnológicos para que puedan ser utilizados en cualquier plataforma procurando el tema de la movilidad, interoperabilidad y automatización[1].

En el año 2002, se habla sobre los OA, como una entidad, digital o no digital que puede ser utilizada para el aprendizaje en la educación virtual (IEEE), cuando se inicia con la interoperabilidad de OA, se indica que se debe hacer con la finalidad de evitar la redundancia en el material disponible, en la producción y reelaboración de los OA [2]

Debido al auge en la utilización de las plataformas y la gran demanda de producción e intercambio de OA, se hace evidente que los desarrolladores de esta información tomen en cuenta los modelos de diseño de OA, y los estándares que norman y se pueda cumplir con la interoperabilidad de los contenidos.

Para el año, 1999 el Departamento de defensa de los Estados Unidos, tomo las iniciativas existentes en la industria en línea y desarrollo una nueva versión de modelos de referencia. Las organizaciones que integran la norma SCORM son: Alliance of Remote Instructional Authoring & Distribution Networks for Europe (ARIADNE), IEEE, ASD (Aerospace and Defense Industries Association of Europe, TPSMG (Technical Publication Specification Maintenance Group), basados en el modelo han sido muchas plataformas que incorporan el modelo de SCORM, este modelo maneja dos tipos básicos de objetos ASSET: texto, imágenes, páginas web, documentos, multimedia y SCO, los objetos de aprendizaje compuestos por objetos ASSET, con la diferencia que pueden comunicarse con la plataforma e-learning. Las plataformas e-learning que sean compatible con SCORM, deben tener la posibilidad de ejecutar los contenidos SCORM, el nivel de integración de los contenidos SCORM se realizan cuando se da el intercambio de los OA.

Es indispensable desarrollar los objetos de aprendizaje tomando como referencia los modelos de estándares y normas relacionados con los contenidos para estos recursos tecnológicos, desde una perspectiva de interoperabilidad de las plataformas e-learning, según Martínez (2002) enumera lo siguiente [2]:

- Contenidos con formatos semánticos
- Soluciones de interoperabilidad basadas en metodología, como SCORM.
- Modelos de metadatos
- Protocolos para la disseminación del contenido

Por otro lado, es conveniente llevar a cabo esta investigación porque, todos estos aspectos mencionados anteriormente, presentan una opción para mejorar la

interoperabilidad entre los objetos de aprendizaje, información de contenidos e-learning, entre otros.

Por lo tanto, los beneficios se traducen, en la interoperabilidad de estos objetos de aprendizaje en la plataforma de e-learning, en nuestro caso Canvas, ya que utilizamos la estandarización en los OA con la metodología SCORM y los evaluamos mediante el estándar IEEE 1484.12.1 lo que permite llevar a cabo, el intercambio, combinación de los contenidos de múltiples y diversas fuentes de información [1].

Sin embargo, la utilidad que deriva de este estudio, es el proceso inicial de la gestión de los contenidos en una plataforma e-learning comienza con la extracción de los datos, esta información se codifica de forma explícita de forma encapsulada para utilizarse con diversos propósitos y funciones, esta información debe estar normada para que pueda ser interoperable con otras plataformas que manejen XML (Lenguaje de marcado extensible), SCORM, IEEE 1484.12.1, enfocan sus objetivos para lograr la interoperabilidad en la plataforma Canvas.

Evidentemente, que este estudio sirve para la interoperabilidad entre los objetos de aprendizajes en las plataformas de e-learning basados en SCORM y la norma IEEE 1484.12.1, forman un conjunto estructurado y normado, con la capacidad de que una plataforma tecnológica pueda exhibir contenidos independientemente de quién y cómo fueron creados y de producir contenidos diferente de la plataforma en la cual serán incorporados.

Dentro de la educación virtual se hace referencia a los documentos que sean innovadores para la educación a distancia implementando las nuevas tecnologías en conjunto con la gestión de la información, las herramientas e-Learning como la educación línea que tiene, como característica principal el uso de Internet, dentro de las herramientas que son utilizadas en conjunto para mejorar la educación de las personas y la capacitación de los integrantes de una empresa.

Un sistema que combina diferentes componentes e-Learning, administra recursos, programas analíticos de la asignatura y catálogos, horarios y sistemas de inscripciones a cursos [3].

Tomando en cuenta lo descrito anteriormente, para el uso de interoperabilidad en el proceso de gestión de contenidos es fundamental el gestor LMS y el modelo para la creación de los objetos de aprendizajes por lo

tanto para este fin en esta investigación en particular se hará uso de la metodología SCORM.

Un paquete SCORM es un bloque de material web empaquetado de una manera que sigue el estándar SCORM de objetos de aprendizaje. Estos paquetes pueden incluir páginas web gráficas, código embebido en Jscript, presentaciones flash, entre otros aspectos. El módulo SCORM permite cargar fácilmente cualquier paquete y convertirlo en parte de una asignatura [3].

SCORM tiene la característica de fácil acceso y los módulos se puede utilizar cuando sean necesarios, con este paquete pueden combinar elementos antes mencionados, que hacen fácil la comprensión por parte del alumno y alumna, la utilización de las herramientas virtuales es la utilización de los paquetes SCORM, como motor de aprendizaje en línea, estos paquetes poseen un estándar que se comunica en cualquier plataforma de tipo e-Learning [4].

La versión actual de SCORM incorpora varios estándares IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers), desarrolló un estándar para los objetos de aprendizaje, los cuáles, se divide en diferentes partes: una primera en donde se describen el modelo de datos LOM (Learning object metadata), en donde se especifica que se deben describir los aspectos de un objeto de aprendizaje y que vocabularios se pueden utilizar.

2.1 SCORM

Los componentes de los paquetes SCORM consiste en una serie de módulos que se encargan de controlar el progreso, puntuación y tiempos. Dentro de este paquete se puede manejar dos tipos de contenidos ASSET (recurso), el cual corresponde a recursos de tipo texto, imágenes, evaluaciones, por otro lado esta SCO (Objeto de Contenido Intercambiable), que es una colección de uno o más recursos que se pueden comunicar y ser lanzados por medio de una plataforma, con la diferencia que SCO puede comunicar con el LMS a través de un API (Interfaz de Programación de Aplicaciones), el cual permite que se dé un estado de inicialización y terminación del contenido.

SCORM, utiliza un modelo de empaquetado en el cual el contenido debe contar con: documento XML, que define la estructura y los ficheros físicos con el contenido total del paquete dentro del manifiesto se encuentran los siguientes componentes [4]: Metadatos, Organizaciones, Recursos. Submanifiestos.

Los componentes de un paquete SCORM [4]:

- General: presenta una serie de campos que describen el objeto SCORM como un todo
- Meta-metadatos: permite anotar la información sobre el archivo de metadatos en sí mismo, al permitir su identificación, especificar un autor, y verificar la versión actual.
- Ciclo de vida: agrupa la información sobre la historia, desarrollo el estado actual del objeto de contenido.
- Aspectos técnicos: permite describir las características y requerimientos técnicos de los componentes SCORM.
- Aspectos educativos: describe las características educativas o pedagógicas del objeto SCORM, y aquellos componentes que utiliza: profesores, gestores, autores y estudiantes. Dentro del modelo de SCORM se da el mecanismo de secuenciación que se basa en la especificación IMS (Secuenciación Simple). Esta parte está enfocada a la secuenciación de la especificación SCORM y sus comportamientos y funcionalidades que un LMS compatible con SCORM debe implementar para procesar la información de secuenciamiento.

Por otro lado, IEEE 2002: Indica que un objeto de aprendizaje es cualquier entidad digital o no digital que puede ser usada, reusada o referenciada para el aprendizaje soportado en tecnología.

Según la Universidad de Antioquia implica el trabajo coordinado de diferentes actores, que partieron de un conocimiento interdisciplinaria, desarrollan componentes técnicos, académicos y metodológicas con el fin de hacer de OA coherentes y sobre todo útil para el alcance de los objetivos de aprendizaje por parte del estudiante señala que los OA tienen un fin, como:

- Logro de metas pedagógicas
- Facilidad de uso
- Calidad del entorno audiovisual
- Interacción con los contenidos
- Calidad de los contenidos temático

Exelearning, es una herramienta que permite la creación de objetos de aprendizajes, de código abierto (open source), que facilitan la creación de contenidos educativos sin necesidad de ser expertos en desarrollo HTML (Hyper Text Markup Language), la cual facilita la exportación del contenido generado a multiples formatos: HTML, SCORM y IMS [5].

Dentro de los pro y contras que ofrece exelearning se tienen:

- Permite crear un árbol de navegación básico
- Permite escribir texto y copiarlo
- Permite incluir imagen, pero no editarlo
- Permite incluir videos y animación, pero no edición

2.3 Elaboración de OA en Exelearnig

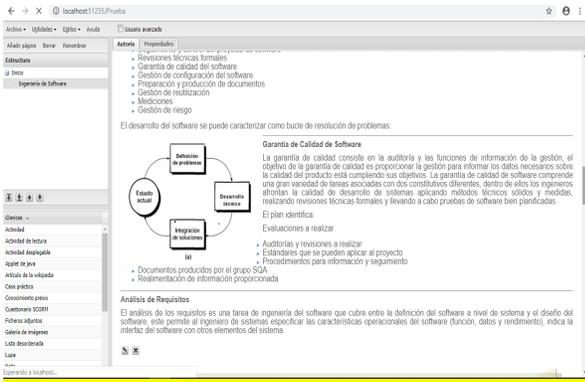


Figura 1: Interfaz de Canvas.

Un contenido SCORM debe estar en formato .zip, que se refiere a que esta información tiene un formato y especificaciones descritas, el proceso de manejo a un contenido LMS, y que este contenido tenga nombres y referencias [5].

2.2 Elaboración de un OA

El término de objeto de aprendizaje por primera vez en 1992 por Wayne, quien asoció los bloques LEGO con bloques de aprendizaje normalizado con fines de reutilización en procesos educativos [5].



En la figura 1: se muestra el interfaz de la plataforma CANVAS, que se encuentra dividida en secciones: menús como configuración de cuenta, páginas de inicio

(módulos), los cursos, las carpetas que contienen los archivos que se manejan dentro de la plataforma, en esta pantalla está un buscador de archivos que se cargan en la biblioteca de CANVAS.

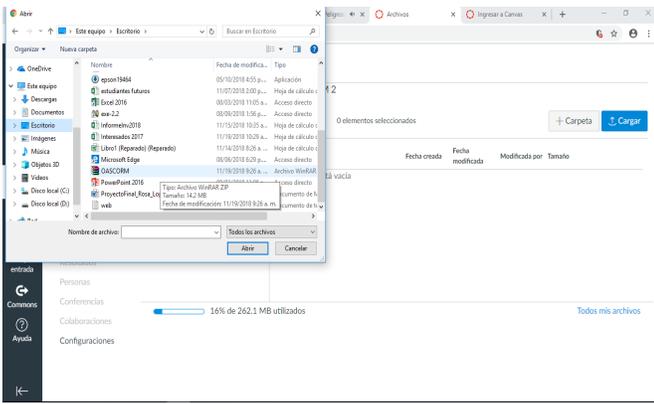


Figura 2: Paquete SCORM.

En la figura 2, se muestra en la Página la carpeta archivos: SCORM, los OB creados reposan en una carpeta con diferentes extensiones: common, extend, unfiled, unique y vocab, dentro de los cuales reposan información de los OB que se cargan en la plataforma CANVAS.

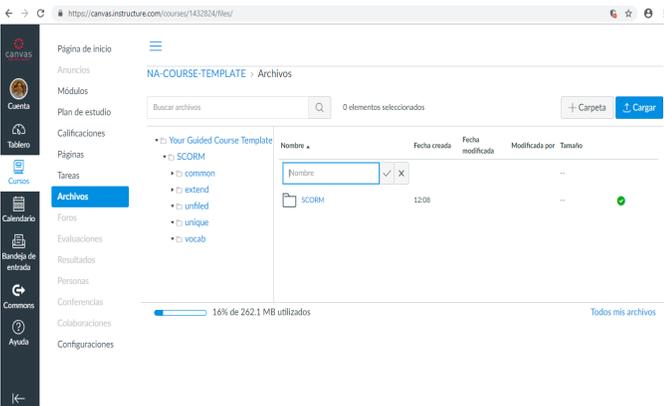


Figura 3: Archivo OAScORM.RAR.

Al momento de descomprimir el archivo OAScORM.RAR, como se muestra en la figura 4, se observan los archivos que contienen los OB, elaborados con SCORM, cada objeto se encuentra organizado y contiene la fecha creada, fecha de modificación, igualmente el tamaño del archivo.

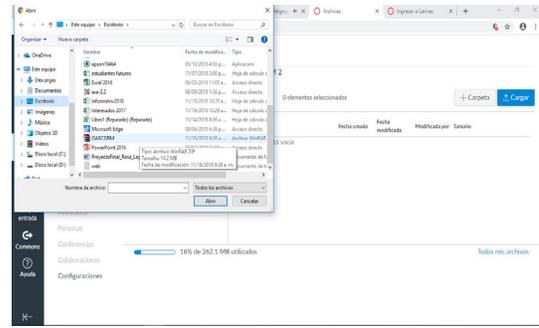


Figura 4: Objeto de Aprendizaje.

En esta figura 5, muestra parte del inicio del OB, en donde se prueba que es totalmente reutilizable dentro de la Plataforma CANVAS, se presenta la introducción a una clase de Ingeniería de Software.

3. Evaluación del OA mediante IEEE 1484.12.1

Los objetos de aprendizaje tienen valor como recurso de aprendizaje cuando se crea basado en una necesidad de disponer de ella, compartirla y reutilizarla, para solucionar problemas de incompatibilidad entre diversas plataformas. Tomando en cuenta la referencia que una unidad con un objetivo de aprendizaje, caracterizada por ser digital, independiente, con una o pocas ideas relacionadas y accesible a través de metadatos con la finalidad de ser reutilizadas en diferentes contexto y plataformas.

La accesibilidad se refiere a la posibilidad de acceder a los metadatos de los objetos, de esta manera de forma automatizada sería posible conocer las características de los objetos para su reutilización. Mediante la forma en que los OA permitan ser reutilizados en diferentes plataformas, se tiene la capacidad de ser interoperables sin tener problemas de compatibilidad con otras plataformas y perdurar así en el tiempo.

El Sistema de Gestión de Objetos de Aprendizaje de Calidad, incorpora el desarrollo de estándares para e-learning y las características propias de los OA, lo cual posibilita la gestión de los recursos educativos [5] Para normalizar los objetos de entrada se sugiere los siguientes pasos:

En primera instancia, clasificar los objetos de aprendizaje según su nivel cognitivo, por lo que se sugiere asociar los objetivos de los objetos con alguno de los niveles de dominio cognitivo de la taxonomía de Bloom, clasificados como:

- Menos complejidad: conocimiento, comprensión y aplicación.
- Mayor complejidad: análisis, síntesis y evaluación: análisis, síntesis y evaluación.

El estándar IEEE 1484.12.2, se refiere en específico sobre los metadatos para objetos de aprendizaje, y en este se señala que las cualidades relevantes de un OA, se debe incluir: título, idioma, tipo de objeto, autor, propietario, términos de distribución, formato, copyright y cualidades pedagógicas, tales como estilos de la enseñanza o de la interacción. A su vez se propone clasificar los objetos en tres tipos de contenidos, de acuerdo a los datos y conceptos, procedimientos y procesos y finalmente reflexión y actitudes [6].



Figura 6: Interfaz de Entorno Exelearning.

En la Figura 6, se muestra el entorno de Exelearning, una herramienta de código abierto que facilita la creación de contenidos educativos multiplataforma que permite crear un árbol de navegación básico, la inclusión de imágenes, sonidos, vídeos y que se puede exportar en formatos de SCORM, IMS, HTML entre otros.

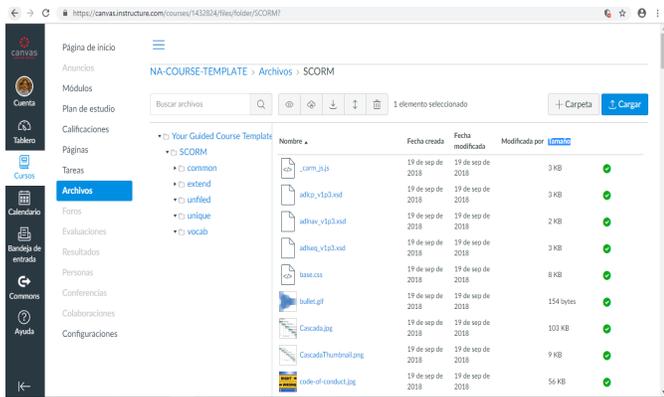


Figura 7: OA en Exelearning.

En la Figura 7 se muestra el OA que se está desarrollando en la herramienta Exelearning, en la sección de Autoría, se desarrolla el tema del Curso de Ingeniería de Software con texto e imágenes, segmentado por partes dentro de la Página de Inicio denominada Ingeniería de Software.

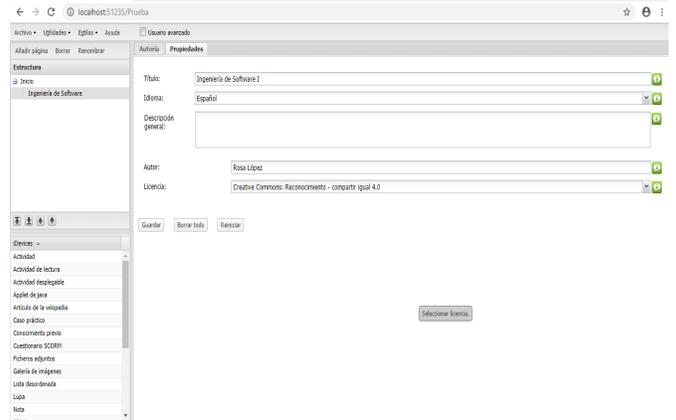


Figura 8: Configuración de Propiedades

En la Figura 8 se presenta el entorno de la Plataforma CANVAS, en la sección de configuración Propiedades, donde se coloca el título, Idioma, descripción general, Autor, tipo de licencia, para generar la autoría del responsable del diseño del OA.

4. Metodología de Investigación

Según la metodología de la investigación es una metodología aplicada, ya que se tiene como objetivo analizar la interoperabilidad de un objeto de aprendizaje en la Plataforma CANVAS mediante el modelo SCORM y tomando como referencia para la evaluación el estándar IEEE1484.12. El tipo de investigación es descriptivo basado en un enfoque cualitativo, ya que mediante las especificaciones del estándar IEEE 1484.12.1, se analiza la interoperabilidad de los objetos de aprendizaje creados en Exelearning para ser exportados a la Plataforma Canvas.

4.1 Muestra

Debido al objetivo de la investigación que es analizar la interoperabilidad de objetos de aprendizaje en la plataforma CANVAS, es necesario tomar en cuenta que la expertiz para realizar la evaluación de los objetos de aprendizajes en la Plataforma CANVAS, en cuanto la validación de los aspectos considerados como: Cantidad de los contenidos, Adecuación de Objetivos de

Aprendizaje, Feedback, Motivación, Diseño y presentación, Usabilidad, Accesibilidad, Reusabilidad, Cumplimientos de Estándares. Y por ende, la población para la realización de esta investigación es 10 profesores de la Facultad de Informática, Electrónica y Comunicación del Centro Regional Universitario de Veraguas, ya que esta muestra está considerada para la evaluación del objeto de aprendizaje en la plataforma CANVAS, ya que los 10 profesores, han tenido la experiencia en el área de sistemas virtuales de aprendizaje y conocen los aspectos necesarios para poder evaluar el OA.

4.2 Instrumentos de Evaluación del Objeto de Aprendizaje

Tabla 1. Instrumento LORI_ESP

| Aspectos Generales | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | N/A |
|--|---|---|---|---|---|-----|
| Calidad de los contenidos | | | | | | |
| Adecuación de los objetivos de aprendizaje | | | | | | |
| Feedback | | | | | | |
| Motivación | | | | | | |
| Diseño y presentación | | | | | | |
| Usabilidad | | | | | | |
| Accesibilidad | | | | | | |
| Reusabilidad | | | | | | |
| Cumplimientos de estándares: | | | | | | |

Fuente: Esbit, J & Belfer, K, & Leacock, T. (2016)

5. Resultados



Figura 1. Gráfico con el resultado de la evaluación de Calidad de Contenidos.

En el gráfico, se presenta la validación de la Calidad de Contenido, donde el 94% con respecto a la escala de

validación de 5, indica que el OA cumple con los aspectos de veracidad, exactitud, presentación equilibra de ideas y nivel adecuado de detalle, por otro lado, un 6% indica una validación de 4 en la escala de validación.



Figura 2. Gráfico con el resultado de la evaluación de Adecuación de los objetivos.

En el gráfico 2 se presenta la validación sobre la Adecuación de los objetivos de aprendizaje, como se muestra el 98% validaron a la escala de 5 este aspecto y solo 2% a la escala de 4 en puntuación.



Figura 3. Gráfico con el resultado de la evaluación de Motivación.

En la gráfica 3, se muestra una validación del 100%, con respecto a la escala de 5 en puntuación, validado el OA, en capacidad de motivar y generar interés en un grupo concreto de alumnos.

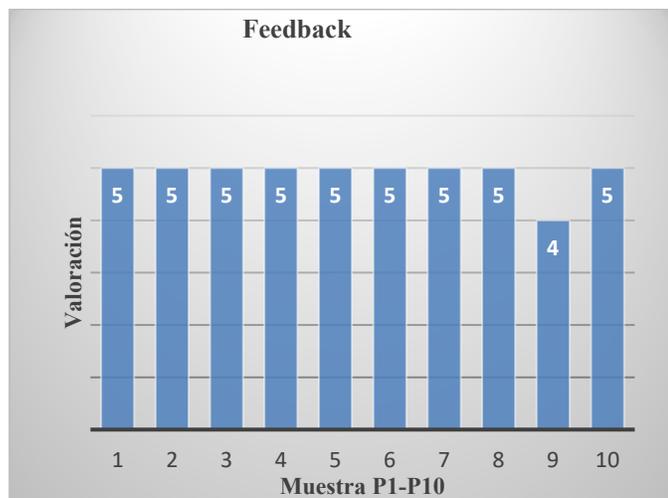


Figura 4. Gráfico con el resultado de la evaluación de Feedback.

En la Gráfica 4, se valida el aspecto de Feedback donde se toma en cuenta el contenido, adaptabilidad dirigida en función de la respuesta de cada alumno y su estilo de aprendizaje, mostrando un 98% para la validación en la escala de 5 puntos, y solo un 2% valida con un valor de 4.



Figura 5. Gráfico con el resultado de la evaluación de Usabilidad.

En el gráfico 5, se valida al 100% con una puntuación de 5, la usabilidad del OA, con la facilidad de navegación, interfaz predictiva para el usuario y calidad de los recursos de ayuda de la interfaz.



Figura 6. Gráfico con el resultado de la evaluación de Reusabilidad.

En el gráfico 6, se valida la reusabilidad, con la capacidad para usarse en distintos escenarios de aprendizaje y con alumnos en distintos bagajes con un 96% de puntuación en la escala de 5 puntos y con el 4% en la puntuación de 4.

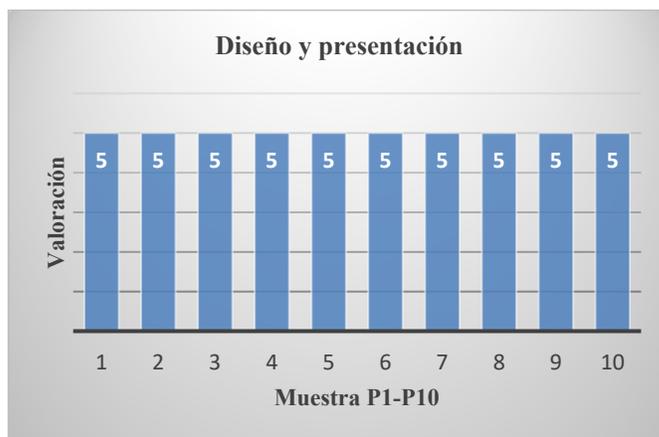


Figura 7. Gráfico con el resultado de la evaluación de Diseño y presentación.

En la gráfica 7, se muestra la validación de Diseño y presentación donde se consideraba el diseño de la información audiovisual con 98% valido con un puntaje de 5 y solo un 2% del total con una puntuación de 4.

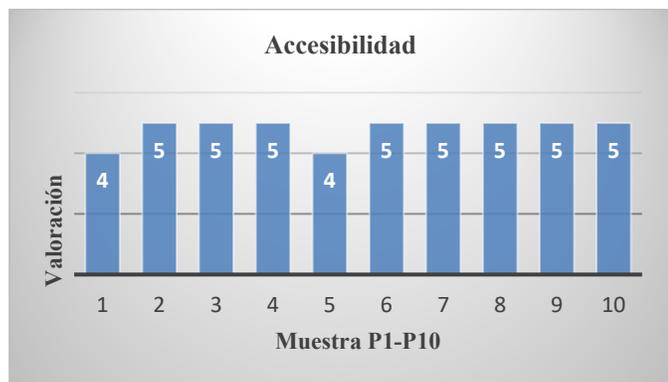


Figura 8. Gráfico con el resultado de la evaluación de Accesibilidad.

En el gráfico, se valida al 100% la accesibilidad del OA con respecto a la puntuación de 5.



Figura 9. Gráfico con el resultado de la evaluación de Cumplimiento de estándares.

En el gráfico 9, se valida el aspecto de cumplimiento de estándares o especificaciones internacionales en este caso el SCORM y IEEE 1484.12.1, con un 96% en puntuación de 5 y el 4% con una puntuación de 4.

6. Conclusiones

- Debido al auge en la utilización de las plataformas y la gran demanda de producción e intercambio de OA.
- Este estudio sirve para la interoperabilidad entre los objetos de aprendizajes en las plataformas de e-learning basados en SCORM y la norma IEEE 1484.12.1
- El uso de interoperabilidad en el proceso de gestión de contenidos es fundamentar el gestor LMS y el modelo para la creación de OA.
- La creación de objetos digitales de aprendizaje con Exe Learning, ha permitido la incorporación de nuevas actividades, como se ha mencionado un objeto de aprendizaje.

- Mediante la forma en que los OA permitan ser reutilizados en diferentes plataformas, se tiene la capacidad de ser interoperables sin tener problemas de compatibilidad con otras plataformas y perdurar así en el tiempo.
- La valoración de los aspectos de reutilización e interoperabilidad de los OA en la Plataforma, por parte de expertos es evaluada con el 97% de aceptación, la interoperabilidad de los OA, desarrollada tomando como referencia el modelo SCORM y el estándar IEEE 1484.12.1

REFERENCIAS

- [1] A. Hervas. *Gestión de e-learning*. Editorial RAMA, 2010, pp 40-47.
- [2] W. Horton. *Leading E-learning*. Editorial ASTD, 2010, pp 60-75.
- [3] S. Carliner. *Designing Elearning*. Editorial ASTD, 2010, pp 35-38.
- [4] J. Manzanedo. *El e-learning en España*. Colección IOE Tecnología e Innovación, 2012.
- [5] T. Diaz. "Análisis de la implementación y uso de los paquetes SCORM en Plataformas." [Online]. pp.1-18 Available: <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/12465/Diaz%20Torres%20Daniel%202014.pdf;jsessionid=1114EFB0BFCC3D2B881B3187A19179D3?sequence=2> [2014].
- [6] T. Anderson. *El e-learning en el siglo XXI*. Editorial Octaedro, 2012, pp 37-45.
- [7] M. Rosenberg. *Elearning: strategies for the delivering knowledge in the digital age*. Editorial, McGrawHill, 2014, pp26-38.
- [8] B. Ghirardini. *Metodología de E-learning*. Organización de Fondo Agropecuario (FAO).
- [9] "Educación en Línea", Mayo 2019. [Online]. Available: <https://www.derecho.unam.mx/integridad-academica/pdf/IEEE.pdf>
- [10] "Educación en Línea", Mayo 2019. [Online]. Available: <https://www.derecho.unam.mx/integridad-academica/pdf/IEEE.pdf>
- [11] D. Pérez, "Un enfoque para la creación de Contenido Online interactivo", RED Revista de Educación a Distancia, pp 1-24, [2016]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/547/54748503003.pdf>. [Accedido el 11-11-2018]
- [12] C. Soto, "Interoperabilidad entre el LMS Moodle y la aplicación educativa de propósitos específicos servicios del IMS-LTI". Revista de Innovación Educativa, pp 2-11, [2016]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/688/68842702003.pdf> [Accedido el 6-11-2018]



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 guion. 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, “Titulo_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

$$\int_0^2 F(r, \varphi) dr d\varphi = [\sigma r_2 / (2\mu_0)] \cdot \int_0^\infty \exp(-\lambda |z_j - z_i|) \lambda^{-1} J_1(\lambda r_2) J_0(\lambda r) d\lambda \quad (2)$$

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.flyingmachjourn/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.recursoscientificos.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



LLAMADO A PONENCIA
ENTREGA DE ARTÍCULOS- <http://congreso.utp.ac.pa>

 @CongresoUTP

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



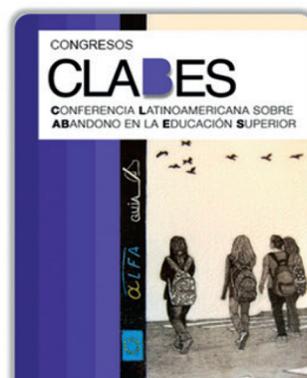
El Tecnológico
ISSN: 1819-9623
E-ISSN: 1819-9623



Cultural Maga
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.