

DIFUSIÓN Y DIVULGACIÓN CIENTÍFICA, TECNOLÓGICA Y CULTURAL

SCAPS:

SIMULACIÓN DE CELDAS SOLARES DE CDTE BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE TRABAJO

POTENCIAL TERAPÉUTICO DE **SOLANUM NIGRUM L**
HIERBA MORA

UN RETABLO PICTÓRICO

En la Sala de Profundis
del Convento de Jalapa del Marqués, Oax.

AVANCES Y DESARROLLO DE TÉCNICAS EXPERIMENTALES, EN LA UNISTMO, PARA LA MEDICIÓN DE VIBRACIONES EN ÁLABES DE AEROGENERADORES DE BAJA POTENCIA

TRANSFERENCIA DE APRENDIZAJE PROFUNDO

USANDO CÓMPUTO NEURONAL CONVOLUCIONAL PARA EL RECONOCIMIENTO DE EXPRESIONES FACIALES HUMANAS

SOBERANÍA Y SEGURIDAD ENERGÉTICA EN MÉXICO

DE ANIMALES
a DIOSES
BREVE HISTORIA DE LA HUMANIDAD



UNIVERSIDAD DEL ISTMO



REVISTA GENERAL
UNISTMO

Publicación de la Universidad del Istmo • Oaxaca

REPRESENTANTES INSTITUCIONALES

MODESTO SEARA VÁZQUEZ
RECTOR

CORA SILVIA BONILLA CARREÓN
VICE-RECTORÍA ACADÉMICA

OSCAR CORTÉS OLIVARES
VICE-RECTORÍA ADMINISTRATIVA

DIRECTOR

ISAAC MONTOYA DE LOS SANTOS
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS TEHUANTEPEC

CONSEJO EDITORIAL

XAVIER MATHÉW
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES,
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, MÉXICO

NINI ROSE MATHEWS
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES,
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO, MÉXICO

MAYKEL COUREL PIEDRAHITA
CENTRO UNIVERSITARIO DE LOS VALLES,
UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA, MÉXICO

SILVER HAMILL TURREN CRUZ
INSTITUTO DE MATERIALES AVANZADOS,
UNIVERSITAT JAUME I, ESPAÑA

VÍCTOR IVÁN MORENO OLIVA
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS TEHUANTEPEC, MÉXICO

JAIME TORRES FRAGOSO
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS IXTEPEC, MÉXICO

EDUARDO CAMPOS MERCADO
CONACYT -UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS TEHUANTEPEC, MÉXICO

DANIEL PACHECO BAUTISTA
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS TEHUANTEPEC, MÉXICO

COMITÉ EDITORIAL
JUQUILA ARACELI GONZÁLEZ NOLASCO
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS IXTEPEC, MÉXICO

EDWIN ROMÁN HERNÁNDEZ
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS TEHUANTEPEC, MÉXICO

EDGAR LÓPEZ MARTÍNEZ
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS TEHUANTEPEC, MÉXICO

EDÚ ORTEGA IBARRA
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS JUCHITÁN, MÉXICO

DIRECCIÓN DE ARTE Y DISEÑO

PATRICIA LUNA GONZÁLEZ
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS TEHUANTEPEC, MÉXICO

VERSIÓN WEB

OMAR SANTIAGO NIEVA GARCÍA
UNIVERSIDAD DEL ISTMO, CAMPUS TEHUANTEPEC, MÉXICO

UNIVERSIDAD DEL ISTMO

CAMPUS TEHUANTEPEC

- ▶ Ingeniería Química
- ▶ Ingeniería de Petróleos
- ▶ Ingeniería en Diseño
- ▶ Ingeniería Industrial
- ▶ Ingeniería en Computación
- ▶ Ingeniería en Energías Renovables
- ▶ Lic. en Matemáticas Aplicadas

CAMPUS IXTEPEC

- ▶ Lic. en Administración Pública
- ▶ Lic. en Informática
- ▶ Lic. en Derecho
- ▶ Lic. en Ciencias Empresariales

CAMPUS JUCHITÁN

- ▶ Lic. en Enfermería
- ▶ Lic. en Nutrición



INSTITUCIÓN PÚBLICA DEL GOBIERNO
DEL ESTADO DE OAXACA

www.unistmo.edu.mx

La Revista General UNISTMO, es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad del Istmo, dedicada a divulgar y difundir contribuciones inéditas de tipo multidisciplinario, principalmente relacionadas con las Ciencias, la Tecnología y la Cultura. Universidad del Istmo, CAMPUS TEHUANTEPEC, Cd. Universitaria s/n, Barrio Santa Cruz Tagolaba, Cuarta Sección, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México. Tel. 01 (971) 522-4050, C.P. 70760 / CAMPUS IXTEPEC, Cd. Universitaria s/n, Carretera Ixtepec-Chihuitán, Ciudad Ixtepec, Oaxaca, México. Tel. 01 (971) 712-7050, C.P. 70110 / CAMPUS JUCHITÁN, Cd. Universitaria s/n, Carretera Transistmica Juchitán-La Ventosa, Km. 14 Tramo Juchitán - La Ventosa, Oaxaca, México., Tel. 01 (971) 712-7050, C.P.70102, www.unistmo.edu.mx, contacto_revista@sandunga.unistmo.edu.mx.

Reserva de Derechos al Uso Exclusivo (ISSN en trámite).

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la difusión. Queda prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la difusión sin previa autorización de la Universidad del Istmo.

BIBLIOTECA UNISTMO

Biblioteca Pública / Santo Domingo Tehuantepec.
Barrio Laborio / 971 7150948

CARTA EDITORIAL

BIENVENIDA

La “**Revista General de la Universidad del Istmo**” es un órgano de divulgación y difusión científico-tecnológico de la Universidad del Istmo, dedicada a difundir contribuciones inéditas de tipo multidisciplinario, principalmente relacionadas con las Ciencias, la Tecnología y las Humanidades, así como temas enfocados al estudio de las Energías Renovables.

Los manuscritos aceptados son un producto original resultado de la ardua labor de investigación. Además, se reciben trabajos en inglés en casos especiales cuyas obras contribuyan a ampliar los horizontes de la ciencia.

La revista tiene una publicación cuatrimestral, contando con las siguientes secciones: Energía, Artículos, Ensayos, Notas, Fronteras de la Ciencia, Reseñas Bibliográficas.

contacto_revista@sandunga.unistmo.edu.mx

CONTENIDO

01

ENSAYO
Ciencias Alimentarias y
Nutricionales



Potencial
terapéutico de
Solanum Nigrum L
(hierba mora).

Pág. 10

02

ENSAYO
Energía



Soberanía y Seguridad
Energética en México.

Pág. 20

03

ARTÍCULO
Energía



Avances y desarrollo
de técnicas expe-
rimentales, en la
UNISTMO, para la me-
dición de vibraciones
en álabes de aero-
generadores de baja
potencia.

Pág. 38

04

ARTÍCULO
Energía



SCAPS: simulación
de celdas solares de
CdTe bajo diferentes
condiciones de
trabajo.

Pág. 52

05

ARTÍCULO
Historia del Arte



Un retablo pictórico
en la sala de profundis
del convento de Jalapa
del Marqués, Oaxaca.

Pág. 60

06

RESEÑA
Literatura



De animales a dioses
Reseña de libro.

Pág. 74

07

ARTÍCULO
Computación



Transferencia de
aprendizaje profundo
mediante
cómputo neuronal
convolucional para
el reconocimiento de
expresiones faciales
humanas.

Pág. 78

CAMPUS JUCHITÁN



Aulas y talleres



Exposiciones



Prácticas



Cafetería



Biblioteca



Clínica robotizada



POTENCIAL TERAPÉUTICO DE *Solanum Nigrum L* (HIERBA MORA)

RESUMEN

La mayor parte de las plantas del género Solano son deletéreas o venosas, pero también existen plantas inofensivas, muy útiles en la medicina y en la economía doméstica. La *Solanum Nigrum L* conocida como hierba mora, es una planta herbácea, anual e inerme, que se cría espontáneamente en los terrenos cultivados abandonados, junto a los muros viejos y entre las malezas de los solares, posee propiedades medicinales debido a que está compuesta por un alcaloide llamado solanina. Hay que considerar también que este componente puede resultar altamente nocivo cuando se usa en dosis elevadas. Tiene poder analgésico, antiespasmódico, sedante, antiinflamatorio, antipirético y dado que recientemente la resistencia de las bacterias a los antibióticos ha devenido en un grave problema de salud, tanto para los países del norte como para los del sur, han descubierto en *Solanum Nigrum L* una gran actividad antibacteriana. En ciertos lugares se utiliza para la preparación de ciertos platillos, como sucede en comunidades chinantecas y mazatecas del norte de Oaxaca, la hierba mora participa en una diversidad de mezclas gastronómicas, además, habitantes de ciertas comunidades con conocimientos de plantas medicinales la usan como una adecuada medicina tradicional antes de recurrir a medicamentos sin receta.

Edú Ortega-Ibarra^{a*}, Ricardo García-Rodríguez^b, Gabriel Hernández-Ramírez^c, Ilse Haide Ortega Ibarra^d

e-mail: eoibizendaa.unistmo.edu.mx

ABSTRACT

Most of the plants of the genus Solano are deleterious or venomous, but there are also harmless plants that are very useful in medicine and domestic economy. *Solanum Nigrum L.*, known as blackberry weed, is a herbaceous, annual, inert plant that grows spontaneously on abandoned cultivated land, next to old walls and among the weeds on plots, and has medicinal properties because it is composed of an alkaloid called solanine. It should also be noted that this component can be highly harmful when used in high doses. It has analgesic, antispasmodic, sedative, anti-inflammatory and antipyretic properties, and given that bacterial resistance to antibiotics has recently become a serious health problem for both northern and southern countries, *Solanum Nigrum L* has been found to have great antibacterial activity. In certain places it is used in the preparation of certain dishes, as in the Chinantec and Mazatec communities of northern Oaxaca, the blackberry herb is used in a variety of gastronomic mixtures, and inhabitants of certain communities with knowledge of medicinal plants use it as a suitable traditional medicine before resorting to over-the-counter medicines.

Palabras Clave: *Solanum Nigrum L*, Antibacteriana, Medicina tradicional, Toxicidad.

^{a, b, c, d} Centro de Investigación en Nutrición y Alimentación de la Licenciatura en Nutrición. Universidad del Istmo.

1. INTRODUCCIÓN

En la medicina tradicional abundan varios alimentos medicinales que poseen compuestos responsables de diversas actividades biológicas, y pueden ser de importancia para el tratamiento de varias enfermedades, tal es el caso de *Solanum nigrum L* (ver Figura 1.), es una planta no solo nutritiva, sino también por sus informes populares sobre las propiedades medicinales, por tal motivo es importante revisar estudios científicos que justifiquen o puedan corroborar su uso (Capisi *et al.*, 2019).

La *Solanum Nigrum L* es una de las muchas especies del género Solano (*Solanum*), de la familia de las Solanaceas. Los Solanos están esparcidos por todo el mundo y la mayor parte son plantas herbáceas y arbustos; unos son inermes y otros tienen espinas en el tallo y en las hojas. La mayor parte de las plantas del género Solano son deletéreas o venosas, pero también existen plantas inofensivas, muy útiles en la medicina y en la economía doméstica, como la patata o papa (*Solanum Tuberosum*), la tomatera (*Solanum Lycopersicon*), la berenjena (*Solanum Melongena*), entre otras. *Solanum Nigrum L.*, conocida como hierba mora, es una planta herbácea, anual e inerte (sin espinas), que se cría espontáneamente en los terrenos cultivados abandonados, junto a los muros viejos y entre las malezas de los solares. Habita en todos los continentes, aunque la mayor riqueza de especies se halla en América Central y América del Sur (Chang *et al.*, 2013). Se levanta a una altura de 40 a 50 cm, el tallo y las hojas son de un color verde oscuro, además, sus hojas son ovaladas, enteras, alternas, angulosas, pecioladas y sin estípulas en la base de los pecíolos; sus flores son pequeñas, blancas y no nacen en los extremos ni en las axilas de las hojas sino en el tallo. Los frutos son bayas redondas, al principio son verdes y se vuelven negros en la madurez, y de aquí el nombre específico de la planta, *Solanum Nigrum L.*, Solano Negro. (Capisi *et al.*, 2019, García-Paredes, 1942, Chang *et al.*, 2013).



Figura 1. Hierba mora en el huerto casero en Caguas, Puerto Rico. Página Web en Flickr de "miprv". Consultado el 18 de abril de 2020

2. DESARROLLO

Actividad antibacteriana

La resistencia de las bacterias a los antibióticos ha devenido en un grave problema de salud, tanto para los países del norte como para los del sur. Cuando se desarrollaron por primera vez, los antibióticos fueron vistos como balas mágicas que cambiarían radicalmente el tratamiento de la enfermedad infecciosa (Chang *et al.*, 2013), sin embargo, en la actualidad las bacterias han logrado desarrollar resistencia a los fármacos tradicionales, la producción de nuevas moléculas es lenta y ha disminuido notoriamente en los últimos años, aconteciendo casos contra los que no existe tratamiento eficaz.

La gran cantidad de metabolitos secundarios en las plantas ofrece una gigantesca posibilidad de hallar moléculas bioactivas con actividad biológica. Así, se acepta que, sin menospreciar el avance alcanzado por la síntesis química, las plantas son consideradas la fuente principal de sustancias activas con propiedades antimicrobianas, apoyado en que ellas producen cientos de miles de metabolitos secundarios y muchos pueden ser antibacterianos (Vélez *et al.*, 2018). En un estudio realizado por Chang y colaboradores evaluaron la actividad antibacteriana *in vitro* de las hojas de la hierba mora, los resultados

demonstraron un efecto antibacteriano significativo contra las cepas de bacterias *Gram (+)* y *Gram (-)* (Chang *et al.*, 2013). Esta especie vegetal constituye una fuente promisoría de compuestos químicos antimicrobianos y antitumorales (Vélez *et al.*, 2018), esto es debido a la composición fitoquímica de los extractos que se obtienen de las hojas y tallos de la planta de *Solanum nigrum L.*, en ellas predominan sustancias como: flavonoides, alcaloides, taninos, aminoácidos, saponinas y cumarinas (Chang *et al.*, 2013; Vélez *et al.*, 2018), ver Tabla 1.

La hierba mora como medicina tradicional

El hombre desde su surgimiento creó las condiciones para vivir mejor, atenuar enfermedades y mejorar la calidad de vida. Pero no es en este siglo donde se utilizaron por primera vez las plantas con el fin de curar, sino desde tiempos ancestrales (Corrales *et al.*, 2014). El interés por la medicina tradicional, que incluye terapias con medicación basada en hierbas, y otras sin medicación como es el caso de la acupuntura, terapias manuales, etc., se ha incrementado considerable, por lo que se ha tomado la decisión de ocuparse de las formas tradicionales de medicina y explorar las posibilidades de utilizarlas en la atención primaria de salud (Escalona *et al.*, 2015).

Tabla 1. Tabla de actividad antibacteriana *in vitro* de extractos de hojas y tallos de *Solanum nigrum L.* de Chang H., *et al.*, (2013).

Extractos S. Aureus	µg/disco	Diámetro del halo de inhibición (DI) (mm)			
		B. Subtilis ATCC 29737	E. Coli ATCC 6633	P. aeruginosa ATCC113-3 ATCC27853	
E.S.H.	200	8	6	-	-
E.S.T	200	6	5	-	-
E.T. HCCI3	200	9	-	-	-
E.H AcEt	200	8	-	-	-
E.T. AcEt.	200	10	-	-	-

E.T. HCCI3, extracto clorofórmico de tallos; E.H. AcEt. Extracto etílico de hojas; E.T. AcEt. Extracto etílico de tallos; E.S.H. Extracto seco de hojas; E.S.T., Extracto seco de tallos.

Debido a los estudios previos realizados de la hierba mora se le atribuyen una serie de propiedades medicinales y terapéuticas, como se muestran en la Tabla 2. (Corrales et al., 2014).

Usos culinarios

La hierba mora ha sido ampliamente utilizada como un alimento desde el inicio de los tiempos, esta hierba fue registrada como un alimento en el siglo XV en China y en otros continentes. A pesar de los problemas de toxicidad con algunas formas, las ba-

yas maduras y hojas hervidas de cepas comestibles se comen. Las hojas cocidas a fondo, aunque con sabor fuerte y ligeramente amargo se utilizan como la espinaca. Las bayas de hierba mora negras maduras se describen como dulces y saladas, con notas de regaliz y melón (Corrales et al., 2014). En comunidades chinantecas y mazatecas del norte de Oaxaca la hierba mora se consume básicamente en dos formas: caldosa o sopera, y guisada. En la comunidad de Usila, San José Río Manso, Santa María Jacatepec, San Juan Bautista Tuxtepec y en general en va-

Tabla 2. Usos medicinales que se emplean de la hierba mora

Trastornos a la salud	Uso medicinal
Tratamiento para curar las úlceras bucales.	Úlcera bucal es causada principalmente por las malas condiciones higiénicas orales y dietas. Solanum nigrum hojas son extremadamente útiles para el tratamiento de esta condición y hay que mantenerlos en la boca por algún tiempo después de la masticación.
La prevención de problemas digestivos.	El jugo que se hace de las hojas hierba mora ayuda en la prevención de problemas digestivos. También allana caminos para la curación de problemas de úlceras, disentería y flatulencia pépticas.
Fiebre.	Decocción de frutas de hierba mora y las hojas es una preparación adecuada para tratar problemas como la fiebre. Infusión fría de las frutas y hojas de hierba mora, se da en una dosis de 30-40 ml para tratar la fiebre y náuseas.
Trastornos de la piel: quemaduras, tiña, sarna, vitiligo, gota y problemas de la piel eruptivas.	Realizar una pasta de las hojas de hierba mora es adecuado para el tratamiento.
Control de la inflamación.	La planta de hierbas mora ayuda a controlar problemas de inflamación mediante el aumento de los niveles de inmunidad.
Promueve las infecciones urinarias.	Las propiedades diuréticas de la planta hierba mora ayuda a promover el sistema urinario y da formas para la descarga de la orina con regularidad.
Reducción de trastornos hepáticos.	Extracto de hierba mora es la ideal para reducir los problemas del hígado como la cirrosis y la hepatitis para minimizar los riesgos.

Elaboración propia/ajustado de: Corrales Reyes E, Reyes Pérez J, Piña Gonzáles R. (2014).

rias comunidades que habitan la Chinantla, se deriva una diversidad de mezclas gastronómicas en las que participa, ver Figura 2.

Toxicidad

La solanina, al igual que otros alcaloides (chacolina y solasonina) presentes en el fruto y las hojas de la planta resulta muy tóxica para los animales y el hombre. El envenenamiento produce vómitos, dolor estomacal, aumento de temperatura y en casos extremos, parálisis y finalmente la muerte por fallo cardíaco. La concentración de solanina depende del grado de madurez de los frutos, del terreno de cultivo y de las condiciones nutricionales de la planta, no obstante, se recomienda su cocción ya que esta sustancia no puede preverse a simple vista, además, la cocción destruye en parte la solanina (Cano et al., 2009).

3. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

La hierba mora se produce de manera simple en diversos lugares, sin embargo, hoy en día no es muy conocida por los habitantes, en dosis adecuadas y con el correcto uso, puede ser una buena alternativa para la inhibición de ciertas bacterias; una característica muy particular de esta planta es que posee propiedades medicinales y es perfecta para aliviar varios padecimientos de salud. Debido a sus componentes activos puede llegar hacer tóxica, por lo tanto, se recomienda no abusar de su consumo y tener medidas adecuadas para utilizarla en problemas de salud.

AGRADECIMIENTOS

Al estudiante de Licenciatura en Nutrición del Grupo 815, Ricardo García-Rodríguez, por la iniciativa y participación.



Figura 2. Platillo típico de la región, tomatillo del diablo. Fuente Página Web en Word de Carolina Mejía, consultado el 18 de abril de 2020

REFERENCIAS

Campisi A, Acquaviva R, Raciti G, Duro A, Rizzo M, Santagati NA. (2019) Antioxidant Activities of *Solanum nigrum* L. Leaf extracts determined in in vitro cellular models. *Foods*, 8(2);1-12.

Cano Carmona E, Cano Ortiz A, Cano Ortiz A. (2009). Plantas prohibidas o restringidas por su toxicidad: flora psicotrópica. Instituto de Estudios Gienneses; (200), 73-80.

Chang H, L., & Garcia Lopez, A., & Rosabal C, Y., & Espinosa R, A., & Ramos E, M., & Remon R, H. (2013). Caracterización fitoquímica y la evaluación de la actividad antibacteriana in vitro de los extractos de hojas y tallos de *Solanum nigrum* L. que crece en Cuba. *Revista Mexicana de Ciencias Farmacéuticas*, 44 (4), 30-35.

Corrales Reyes E, Reyes Pérez J, Piña Gonzáles R. (2014). Plantas medicinales de interés estomatólogo. *Revista órgano científico estudiantil de ciencias médicas de Cuba*, 53(256); 79-98.

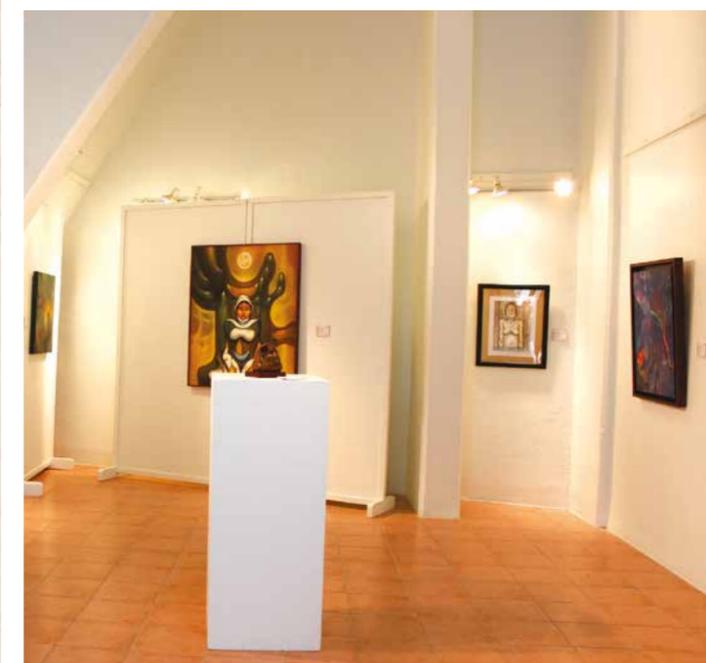
Escalona Cruz, Luis Jesús, Tase Aguilar, Aliuska, Estrada Martínez, Aliuska, & Almaguer Mojena, Maida Luisa. (2015). Uso tradicional de plantas medicinales por el adulto mayor en la comunidad serrana de Corralillo Arriba. *Guisa, Granma. Revista Cubana de Plantas Medicinales*, 20(4)

García-Paredes (1942). Revisión botánica de la hierba mora. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 16 y 17(5), 55-57.

Vélez R, Haydelba A, Jaramillo C, Elington V. (2018). Metabolitos secundarios, actividad antimicrobiana y letalidad de las hierbas. *Revista Facsalud Unemi*, 2(2); 31-39.

Semana de la Cultura Zapoteca

Cada año, en el mes de junio, la Universidad del Istmo organiza y presenta a la comunidad universitaria y al público en general la Semana de la Cultura Zapoteca; su objetivo es preservar, promover y difundir la riqueza cultural del Istmo de Tehuantepec y del Estado de Oaxaca. Diversas actividades integran el programa de la Semana de la Cultura Zapoteca, destacan: Conferencias impartidas por especialistas, nacionales y extranjeros, de las ciencias sociales y humanidades, quienes comparten los avances más recientes de sus investigaciones sobre la cultura zapoteca; presentación de eventos artísticos y narrativos, entre otros, de música, danza, teatro, poesía y tradición oral; exposiciones pictóricas con la obra de renombrados artistas oaxaqueños y nacionales; así como la realización de un concierto de gala con el que se inaugura éste magno evento.



CAMPUS IXTEPEC



● Salas de cómputo



● Cafetería



● Auditorio



● Edificio de profesores



● Centro de idiomas



● Biblioteca

SOBERANÍA Y SEGURIDAD ENERGÉTICA EN MÉXICO

RESUMEN

El presente estudio tiene como objetivo analizar el panorama energético en México haciendo uso del método analítico deductivo; como punto de partida se desarrollan los significados y alcances de la soberanía y la seguridad para luego conjugarlos con la energía como base del desarrollo económico y social; asimismo, se presenta el panorama energético en México haciendo un breve recorrido del escenario energético en México previo a la Reforma energética de 2013, así como las modificaciones a las que se sometió este régimen a partir de la reforma; Continuando con un análisis de la situación actual en el sector energético mexicano, más específicamente en la parte de importación de hidrocarburos refinados que ubican al país en un especial estado de dependencia energética. Sumando a esta la declaración de pandemia Covid-19 y su impacto en el sector energético mundial y nacional siendo en este sector muy criticada la postura del gobierno en turno con relación

a incentivar la producción nacional de hidrocarburos por parte de las Empresas Productivas del Estado, con dos proyectos de refinería ubicados en Tabasco en el municipio Paraíso “Dos Bocas” y la adquisición de una refinería en Texas en sentido contrario a las tendencias globales en el sector energético. Con esta investigación se llega a la conclusión de que México apunta al desarrollo y seguridad interna en materia de energía en sentido contrario a las economías desarrolladas que cuentan con una relativa seguridad y soberanía energética, que les permite desarrollar el mercado de las energías verdes. Consideramos que esta acción del gobierno nacional puede ser un acierto que le permita a México la estabilidad energética y económica que le genere en un futuro desarrollar un avance significativo en el desarrollo de las energías renovables sin sufrir los embates del mercado internacional del petróleo.

Palabras Clave: soberanía, seguridad, dependencia energética, México.

ABSTRACT

The purpose of this study is to analyze the energy scenario in Mexico using the deductive analytical method; as a starting point, the meanings and scope of sovereignty and security are developed and then combined with energy as the basis for economic and social development; Likewise, the energy panorama in Mexico is presented, making a brief tour of the energy scenario in Mexico prior to the Energy Reform of 2013, as well as the modifications to which this regime was subjected after the reform; Continuing with an analysis of the current situation in the Mexican energy sector, more specifically in the part of importing refined hydrocarbons that place the country in a special state of energy dependence. Adding to this the declaration of pandemic Covid-19 and its impact on the world and national energy sector, being in this sector very criticized the position of the current government

in relation to encourage the national production of hydrocarbons by the State Productive Companies, with two refinery projects located in Tabasco in the municipality of Paraíso “Dos Bocas” and the acquisition of a refinery in Texas, contrary to global trends in the energy sector. This research concludes that Mexico is aiming at internal energy development and security in the opposite direction of developed economies that have relative energy security and sovereignty, which allows them to develop the green energy market. We consider that this action of the national government can be a wise move that will allow Mexico to achieve energy and economic stability that will generate in the future a significant advance in the development of renewable energies without suffering the shocks of the international oil market.

Keywords: sovereignty, security, energy dependence, México.

Autora: Erika Flores Torres^a
orcid.org. 0000-0001-9786-7054
erika_florest79@bianni.unistmo.edu.mx

^a Universidad del Istmo, Campus Ixtepec. Carretera Chihuitán s/n Ixtepec, Oaxaca, México. C.P. 70110

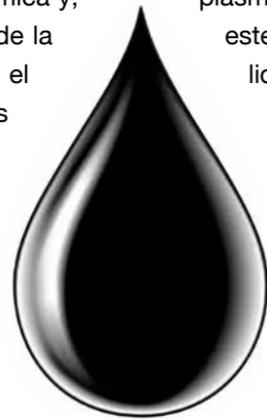
INTRODUCCIÓN

Recordemos que la construcción de las sociedades modernas fue el resultado del uso de combustibles fósiles que permitieron una mayor movilidad, capacidad de producción y fuentes de empleo, permitiendo la construcción de grandes metrópolis (Latín Clima, 2021)¹. Así mismo la importancia de los energéticos ha sido tal que las bases económicas mundiales se sustentan en el petróleo.

El petróleo y sus derivados tan necesarios en la modernidad han presentado un déficit de producción mundial, orillando a los países a consumir energéticos importados; poniendo en la mesa de análisis una futura escasez del preciado combustible, generando posturas modernistas como la soberanía y la seguridad energética.

Partiendo del hecho irrefutable de la gran dependencia a los combustibles, los analistas económicos mundiales y los gobiernos están generando estrategias que permitan asegurar una estabilidad en el suministro de la energía que les permita por una parte, mantener su estabilidad económica y, por otro lado, satisfacer las necesidades de la población que los conforma, todo ello en el periodo intermedio para descubrir nuevas fuentes de energía infinitas; por ello en el ámbito internacional se habla de nuevos términos modernistas: soberanía y seguridad energética.

Para comprender la relación de los términos antes mencionados es preciso proporcionar el significado de dichos conceptos y el por qué su relación con el



¹ Así, a partir de 1960, el petróleo empezó a transportarse de forma masiva. Estos procesos también fueron impulsados por el crecimiento de la población y del sistema económico, lo cual se tradujo en un incremento exponencial de la demanda energética y una dependencia mayor a los combustibles fósiles dado su rendimiento. [...] Surgieron las metrópolis como centros urbanos y las megalópolis como metrópolis interconectadas. Ese es el caso de la megápolis constituida por las ciudades de Boston y Washington, así como Los Ángeles y San Diego en Estados Unidos, a inicios de la década de 1970. [...] Este modelo de urbanización no sólo es intenso en consumo eléctrico, sino que también requiere una movilidad motorizada (Latinclima, 2021).

futuro energético de las naciones está íntimamente relacionada con su materialización.

SOBERANÍA, CONCEPTO CLÁSICO

El *Diccionario Panhispánico del Español Jurídico* de la Real Academia Española, define la soberanía como un poder supremo e ilimitado, tradicionalmente atribuido a la nación, al pueblo o al Estado para establecer su constitución y adoptar las decisiones políticas fundamentales tanto en el ámbito interno como en el plano internacional (Real Academia, 2021).

Partiendo de lo anterior, entendemos que un Estado es considerado como un individuo único, que se constituye con sus propias características, tiene poder político y con las facultades necesarias para regularse tanto interna como externamente.

Así, la soberanía de un Estado está compuesto por los siguientes elementos a saber: a) cuenta como un poder ilimitado y no habrá ningún otro sobre este; b) es un ser autónomo, pues sólo éste podrá crear su régimen jurídico interno, conformar su organización y plasmarla en una Constitución; c) la soberanía de este sujeto deriva de la voluntad de la generalidad, que reconocerá y facultará los poderes del Estado. Asimismo, es necesario considerar que la soberanía de la que habla este apartado se ve reflejada en el imperio del Estado para la administración interna de sus propios recursos naturales, que para el caso de México hacemos énfasis en los recursos petroleros.

Esta idea primigenia de la soberanía ha transitado por modificaciones que han sido realizadas por exigencia de las interacciones de los Estados como sujetos de Derecho Internacional Público (López-Basols, 2014), rama del Derecho que, entre otras cosas, ha permitido la formación de una comunidad internacional que intenta combinar esfuerzos para mantener la paz, seguridad internacional y la consecución de fines comunes².

² Para el Autor Hermilo López-Bassols, citando a Miaja de la

SOBERANÍA CONTEMPORÁNEA

Dentro de la interacción global entre los Estados, encontramos el Comercio Internacional, así como las inversiones extranjeras, que han fomentado no sólo la consolidación de interacción internacional, sino también han fomentado el crecimiento de grandes acuerdos internacionales en materia de inversiones; estos tratados adquiere vigencia y validez interna y externa para los Estados derivado del imperio de su soberanía, pues es mediante esta potestad que los Estados se someten a las reglas del juego de los mercados.

Lo anterior, ha permitido hacer una distinción entre el concepto clásico de soberanía y el concepto “moderno” de ésta; para apuntalar la idea de soberanía moderna, Luigui Ferrajoli (1998) nos presenta una perspectiva del avance de la soberanía en sus dos aspectos; el interno y el externo, por una parte, nos hace referencia a que el Estado en su evolución histórica, jurídica y social, presenta un avance en la erradicación del Estado natural del ser humano, esto es, que su evolución interna transita a la creación de un nuevo orden social, que permita la convivencia de forma pacífica mediante la imposición del ordenamiento jurídico, indicando que:

El estado sometido a derecho en lo interno el Estado absoluto en lo externo crecieron juntos como las dos caras de una misma moneda. Mientras el Estado más limitaba su soberanía interna y ganaba legitimidad imponiendo sobre sí esos límites, más absoluta y legítima se volvía su soberanía externa con respecto a otros Estados, particularmente en lo que concernía al mundo incivilizado. Mientras se superaba el estado de naturaleza hacia adentro, más se desarrollaba hacia afuera (Ferrajoli, 1998, p. 175).

Muela, el Derecho Internacional es “el ordenamiento jurídico de la comunidad internacional que comprende un conjunto de normas emanadas de fuentes específicamente internacionales (López-Basols, 2014, p. 5).

Sumado a lo anterior, López Bassols nos presenta un pasaje lineal del tiempo del que se destaca lo siguiente: el nacimiento de las relaciones internacionales se puede identificar en los años 1800 de los que podemos destacar el nacimiento de la conferencia Internacional de la Paz de la Haya, continuando con un desarrollo lento para las relaciones internacionales; para el año 1945 recalca López Bassols que:

El derecho Internacional contemporáneo surge a partir de 1945 con la creación de la ONU, que institucionaliza las reglas de la sociedad internacional, a través del consenso logrado por la interdependencia que se da entre los Estados [...]. El derecho Internacional contemporáneo también se caracteriza por una institucionalización paulatina, a partir de la creación de la ONU y los organismos regionales y especializados que se fueron creando desde fines de los años cuarenta. Estas instituciones limitan el poder de los estados y han sido un medio efectivo para lograr la cooperación y desarrollo como nuevas ramas del derecho internacional público. La creación de las organizaciones internacionales ha modificado la forma de elaboración de la normativa internacional al favorecer el desarrollo de las normas convencionales multilaterales a través de conferencias internacionales, de la Asamblea General de la ONU y principalmente de la Comisión de Derecho Internacional (López-Basols, 2014, p. 21-22)³.

³ La Organización de las Naciones Unidas, fomenta que los Estados soberanos que reconocen su legitimidad se sometan de forma voluntaria a los acuerdos, tratados o convenciones que se tomen en el seno de dicho organismo. El reconocimiento y sometimiento a estas directrices internacionales representan para los Estados soberanos, el sometimiento a una “autoridad superior” lo que trae aparejado la “disminución” de la soberanía externa, ya que estos se obligan al cumplimiento de dichos tratados. México cuenta con una red de 12 Tratados de Libre Comercio con 46 países (TLCs), 32 Acuerdos para la Promoción y Protección Recíproca de las Inversiones (APPRI) con 33 países y 9 acuerdos de alcance limitado (Acuerdos de Complementación Económica y Acuerdos de Alcance Parcial) en el marco de la Asociación Latinoamericana de Integración (ALADI), Fuente: Gobierno de México (Secretaría de economía, 2018).

De estas actividades internacionales, se desprenden entre otros casos las intervenciones directas de los organismos internacionales con relación a la organización, administración y explotación de recursos naturales de los Estados “soberanos” que se disfrazan de apoyo o ayuda internacional para el desarrollo y crecimiento económico, sugiriendo a los países la implementación de planes y reformas estructurales que les permitirán mejorar su dinámica comercial internacional. Uno de los principales organismos que intervienen en los asuntos económicos íntimos de los Estados Soberanos, es el Fondo Monetario Internacional (FMI)⁴, organismo que a lo largo de las décadas ha “recomendado” a México cambios en materia Fiscal, liberación financiera, liberación de la inversión extranjera directa, desregularizaciones, privatizaciones, entre otras (Martínez Rangel & Soto Reyes Garmendía, 2012)⁵.

Retomando a Martínez Rangel, hacemos énfasis en las relativas a la liberación de inversión extranjera directa, la desregularización y privatizaciones, lo anterior es así ya que mediante estos instrumentos de cambio en la organización económica del Estado Mexicano, se ha logrado paulatinamente que el monopolio o control que el Estado soberano ejercía sobre empresas estatales y sus riquezas internas se vea reducido a un participación mínima o en la desa-

4 El Fondo Monetario Internacional (FMI) promueve la estabilidad financiera y la cooperación monetaria internacional. Asimismo, facilita el comercio internacional, promueve el empleo y un crecimiento económico sostenible y contribuye a reducir la pobreza en el mundo entero. El FMI es administrado por los 190 países miembros a los cuales les rinde cuentas (Fondo Monetario Internacional, 2021).

5 En la práctica, los programas de ajuste promovidos por el Fondo Monetario Internacional (FMI) y el Banco Mundial, han empeorado la situación social y económica de los países menos desarrollados, convirtiéndolos paulatinamente en enclaves del capital extranjero (García & Pulgar, 2010).

parición de la empresa estatal (Sacristán Roy, 2006)⁶, permitiendo que sea el privado quien realice las actividades que le eran esenciales al Estado.

Esta intervención, es pues, desde la perspectiva del derecho internacional, una nueva concepción de soberanía, la cual se ajusta a las necesidades del movimiento económico mundial, eliminando las barreras de acceso a los privados a los recursos que le son prioritarios para el desarrollo y crecimiento económico a aquellos Estados que se ubican en situación de desventaja tanto tecnológica como económica.

Como podemos observar, la soberanía contemporánea se reduce a los siguientes aspectos:

a. Se reconoce la soberanía del Estado como individuo, en tanto éste es jurídicamente capaz y con la personalidad necesaria para contratar, es decir, para celebrar los tratados internacionales y adoptar medidas que le dicten organismos internacionales.

b. Se le reconoce soberano, en tanto como sujeto de derecho internacional cuando adecua su marco jurídico para una apertura total para la intervención y participación privada en los asuntos íntimos (económicos) del Estado.

c. Se le reconoce soberano en relación con los procesos legislativos establecidos en su constitución para la modificación de las áreas sensibles de su ad-

6 La privatización de empresas estatales empieza en el mundo con el gobierno de Margaret Thatcher en el Reino Unido, y esta política se extiende a diversos países. Entre los países en desarrollo y en América Latina, Chile es el país que inicia este proceso y lo lleva a cabo de la manera más vigorosa. En el ámbito internacional, la privatización es recomendada por el Fondo Monetario Internacional y el Banco Mundial. El secretario del Tesoro de Estados Unidos también hace suya esta receta. Es seguida en todos los ámbitos internacionales y se pregona a la privatización como sinónimo de “modernización”, “eficientización” y “saneamiento de las finanzas públicas” (Sacristán Roy, 2006).

ministración interna.

d. Lo anterior es un factor *sine qua non* que le significa ser sujeto de crédito internacional y Estado perteneciente a la comunidad económica internacional.

Dentro de la nueva dinámica soberana de los estados se negocian los accesos a los recursos naturales mediante la explotación privada, lo que significa que el Estado pierde la soberanía sobre sus riquezas naturales, impidiendo que racionalice su explotación convirtiendo estos bienes en productos de mercado disponibles para la explotación privada mediante la Inversión Extranjera. Por lo tanto, concluimos que la soberanía se entiende ahora por el límite que impone el mercado y los organismos internacionales a los Estados con relación a su administración y organización interna, contradiciendo el espíritu primigenio del significado de la soberanía.

Establecido el concepto actual de la soberanía desde la perspectiva internacional, es necesario desarrollar el segundo concepto de nuestro análisis, el relacionado con la seguridad; concepto que de debemos observar más allá de una sensación o sentimiento de seguridad, si no como un elemento esencial para el establecimiento de medidas de “seguridad” tanto social como económica en las actividades de un Estado soberano.

SEGURIDAD

Con base en el *Diccionario Panhispánico de Español Jurídico* de la Real Academia Española, la seguridad en general significa cualidad de seguro, libre, exento de todo peligro, daño o riesgo (Real Academia, 2021). Partiendo de esta definición inferimos que el concepto de seguridad implica que un objeto, sujeto o bien se encuentre libre de todo peligro; derivado de este significado y sus alcances la seguridad ha sido aplicada actualmente a aquellas situaciones que representan un riesgo futuro para la humanidad.

Cabe recordar que la seguridad o el sentimiento de seguridad ha sido uno de los pilares que permitió el desarrollo de variados ordenamientos jurídicos, así mismo la creación del propio Estado fue produc-

to de la sensación de inseguridad y vulnerabilidad de las sociedades antiguas que enfrentaron gobiernos bárbaros o tiranos. Pero la aplicabilidad del concepto de seguridad no es ilimitada ya que su aplicación se extiende a muy variadas áreas de la actividad humana.

En el siglo XX la ciencia jurídica, en conjunto con la sociología con una visión de justicia social, desarrollaron posturas progresistas basadas en el concepto de seguridad con una planeación de corte político y social que construyan o materialicen objetivos diversos, que permitan a los Estados modernos alcanzar niveles básicos de bienestar social; estas posturas reflejadas en su mayoría en políticas públicas encontramos como punto de partida y referencia para la construcción de una seguridad, la seguridad humana.

La seguridad humana implica la protección de las personas de las amenazas a sus derechos, su seguridad y su vida; ello engloba procurar la seguridad del individuo en distintas dimensiones como la económica, alimentaria, de salud, ambiental personal, comunitaria y política para alcanzar una estabilidad duradera (Leal Moya, 2005). La seguridad es analizada desde su conceptualización por la escuela de Copenhague con una perspectiva ampliada desde la perspectiva económica, ambiental y societal, así como desde una perspectiva profundizada de la que se identifican la seguridad humana y de género, continuando con el análisis de las seguridades sectoriales o sectorizadas desde las que se identifican la seguridad hídrica, alimentaria, energética, entre otras (Oswald, 2017).

De este modo, la seguridad se relaciona con la energía como fuente vital para la distribución de alimentos, bienes, servicios básicos y movilidad individual, es necesario que los Estados modernos reconozcan y materialicen como un derecho humano la seguridad energética⁷ de las sociedades modernas

7 La AIE define la seguridad energética como la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible. La seguridad energética tiene muchos aspectos: la seguridad energética



(Agencia Internacional de Energía, 2019), que consta, a saber, de los siguientes elementos:

- **Seguridad jurídica:** el reconocimiento a nivel Constitucional del derecho de acceso a la energía como elemento clave para alcanzar el desarrollo individual y colectivo.
- **Disponibilidad:** que el flujo de energía sea constante, es decir que los individuos no enfrenten dificultades para acceder a las fuentes de energía necesarias para el desarrollo de sus actividades diarias.
- **Estabilidad:** que presenta dos variantes, la estabilidad en el flujo comercial, y, por otro lado, la estabilidad en los precios de venta finales para el consumo del energético.
- **Acceso:** que se traduce en la garantía otorgada

a largo plazo se ocupa principalmente de las inversiones oportunas para suministrar energía en consonancia con la evolución económica y las necesidades medioambientales. Por otra parte, la seguridad energética a corto plazo se centra en la capacidad del sistema energético para reaccionar con prontitud a los cambios repentinos en el equilibrio entre la oferta y la demanda (Agencia Internacional de Energía, 2019).

por el Estado para que el energético llegue a todos los ciudadanos.

- **Consumo y utilización:** que el Estado proyecte planes nacionales que eduquen a las sociedades para la reducción del consumo de los energéticos, impulsando el sector científico que permita el desarrollo de tecnología que fomente la eficiencia y rendimiento de los energéticos. Por último, que el energético sea utilizado en niveles consientes y primordialmente que sea utilizado para el desarrollo económico interno (Agencia Internacional de Energía).

Al hablar de una seguridad energética, la postura es contraria a las doctrinas del mercado; es decir, la globalización de los mercados centra su fuerza en la participación de los agentes privados de producción y consumo, lo que significa que la producción interna de los energéticos apunta a la disminución de la participación de los Estados en la dinámica económica global⁸, dejando de lado la seguridad de suministro

⁸ Esta dinámica global, mejor conocida como Globalización se

interno, el cual, termina dependiente de los caprichos del mercado global.

Las necesidades de aquellos que ostentan el poder y la influencia en las políticas económicas mundiales son las directrices impuestas a los países en vías de desarrollo, que se caracterizan principalmente por una riqueza natural interna, que debe ser puesta al servicio de las necesidades del “mercado global⁹”, representado por los agentes o empresas privadas dedicadas a la explotación de recursos y mano de obra necesaria para el cumplimiento de sus objetivos.

Por ello, los recursos naturales como el petróleo, deben ser objeto de comercio global y además deben estar sujetos a la explotación privada bajo las reglas del mercado lo que impide a países productores como México construir una verdadera seguridad en materia de energía.

PANORAMA ENERGÉTICO EN MÉXICO

Ahora bien, como se ha mencionado, para acceder a las riquezas de los países, es necesario que se adopten medidas desregulatorias, que permitan al sector privado el acceso irrestricto para la extracción y explotación de estos bienes naturales; para el caso de México en el año 2013, se publica en el Diario Oficial de la Federación el 21 de diciembre del año mencionado, la Reforma a la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que impacta el

define como “un fenómeno basado en el aumento continuo de la interconexión entre las diferentes naciones del mundo en el plano económico, político social y tecnológico” (Diccionario Economista, 2021).

⁹ Debemos considerar que la globalización se implanta en áreas como la social, política, económica con efectos disruptivos, en palabras de García Jambell; en el aspecto económico es un proceso asimétrico que favorece a un pequeño grupo de naciones desarrolladas; en la dimensión política las prácticas políticas y discriminatorias, practicadas por las naciones opulentas, impiden que la mayoría de los países participen activamente en los intercambios comerciales y financieros; es decir no logran globalizarse, y si lo hacen es solamente a través de las transnacionales residentes en sus economías de enclave; y en el aspecto o dimensión social (García & Pulgar, 2010).

contenido de los artículos 25, 27 y 28¹⁰, formalizando la irrupción del empresario privado en la explotación del sector energético tanto eléctrico como petrolero del país.

Para dar al lector un panorama amplio de la relación que existe entre la soberanía energética, seguridad energética y la reforma Constitucional de 2013, es necesario señalar lo siguiente:

- Antes de la reforma México contaba con dos empresas paraestatales, manejadas bajo el control directo del Estado, encargadas de la explotación, producción y distribución de energía dentro de territorio nacional Petróleos Mexicanos (PEMEX) y Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- La producción petrolera en México, en específico en el sector de gasolinas para el año 2005 presentó un déficit importante, obligando a nuestro país a importar 169 millones 386 mil barriles de gasolina¹¹, iniciando una carrera de consumo de energético extranjero sin precedentes, alcanzando una cifra de 598 millones 367 mil barriles de gasolina importada. Por otro lado, las reservas petroleras nacionales cayeron de 31 millones 250 mil barriles de petróleo en 1980 a 5 millones 786 mil barriles de petróleo en 2021¹².
- Entre los años 2000 a 2012, el petróleo representó una ganancia de 7 billones 753 mil millones de pesos (Cantú, 2018), cabe señalar que dentro de los

¹⁰ Recordemos que en 1938 bajo el mandato de Lázaro Cárdenas se decretó oficialmente la nacionalización del Petróleo Nacional; haciendo énfasis que uno de los principales objetivos era impedir que las “Siete Hermanas” continuaran monopolizando el petróleo mexicano; cabe recalcar que esas siete hermanas es el nombre que reciben las empresas multinacionales *British Petroleum, Estándar Oil, Royal Dutch Shell, Estándar Oil New York, Estándar Oil New Jersey y Texaco* (Pulso, 2018).

¹¹ El incremento considerable de importación de gasolinas se relaciona con la baja producción que PEMEX empezó a experimentar en esos sexenios, Sistema de Información Energética, Petróleos Mexicanos, Resumen de Importación de Petrolíferos del 2000 al 2021, Secretaría de Energía, 2021).

¹² Los índices de reservas petroleras más bajos para nuestro país se registraron a partir del año 2015, donde se registró una reserva total de 9 millones 812 barriles, cifra que contrasta alarmantemente con los años anteriores, lo que debe significar una alerta nacional (Expansión, 2021).

años mencionados el gobierno federal estuvo encabezado por el Partido Acción Nacional (PAN), representados por Vicente Fox y Felipe Calderón respectivamente.

- Durante el periodo de mayor bonanza económica de la empresa petrolera no se realizaron inversiones al sector energético, lo que significó la caída sustancial de la producción interna y la creciente necesidad de consumo de energéticos importados.

- A nivel constitucional, estaba prohibida la participación de empresas privadas en las actividades exclusivas de PEMEX y CFE.

- El 01 de diciembre de 2012, da inicio la administración encabezada por el Partido Revolucionario Institucional (PRI) en manos de Enrique Peña, quien fue fuerte promotor de la reforma energética que afectaría al sector eléctrico y petrolero nacional (La Jornada, 2016).

- Como ya se mencionó el 21 de diciembre de 2013 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Reforma Energética que modifica el texto constitucional de los artículos 25, 27 y 28.

- De la reforma es necesario mencionar los siguientes puntos:

- Se descentraliza el control de las empresas paraestatales, creando organismos autónomos encargados de su regulación como la Comisión Nacional de Hidrocarburos y la Comisión Reguladora de Energía.

- Se permite la participación de la inversión privada en la exploración, explotación y producción de petróleo a través de un sistema de rondas de asignación de contratos.

- Se permite a PEMEX la asociación para la exploración, explotación y producción en conjunto con empresas privadas.

- Se elabora un plan de licitaciones conocido como Plan Quinquenal¹³, donde se detallan las áreas

¹³ El plan Quinquenal es un documento creado por la Secretaría de Energía que organiza y estructura las áreas contractuales que serían licitadas en las Rondas, y cuya proyección sería a cinco años.

a licitar (Secretaría de Energía, 2015).

- De las rondas se celebran un total de 112 contratos, en los que se explotaran áreas de aguas profundas, aguas someras, áreas terrestres convencionales, áreas terrestres no convencionales (Secretaría de Energía, 2015).

- La propiedad de los hidrocarburos sólo es de la nación en tanto estos no sean extraídos del subsuelo, una vez extraídos son objeto de comercio y propiedad del privado que los extrae, México sólo participa un porcentaje menor en la renta que representan los hidrocarburos.

- PEMEX, continúa luchando por la modernización, pero continúa sin alcanzar su máximo potencial de producción.

Los hidrocarburos nacionales ahora son objeto de comercio, en manos de empresas privadas, lo que puede representar para la nación una inestabilidad en el suministro de los energéticos, en sentido contrario a la postura mexicana, países latinoamericanos han dado la espalda a la privatización de la explotación de sus recursos energéticos, por mencionar alguno sin ahondar en el tema podemos mencionar el caso Venezuela¹⁴.

POSTURA ENERGÉTICA EN MÉXICO, 2022

Como se ha mencionado la dependencia energética de México es más que evidente, el crecimiento en el consumo va en claro acenso, pese a la apertura del sector energético a partir de la Reforma Energé-

¹⁴ La nacionalización de empresas en Venezuela comenzó amistosamente. Contrario a lo que algunos analistas habían pronosticado, en la operación no se emplearon tropas ni tanques. El único bombardeo fue de dinero: el Gobierno de Hugo Chávez colocó sobre la mesa de negociación 723 millones de dólares (555 millones de euros), y la firma estadounidense AES, dueña mayoritaria de Electricidad de Caracas (EDC), capituló sin problemas. El convenio, que sorprendió a la mayoría, fue firmado el jueves por el presidente de AES, Paul Hanrahan; el vicepresidente ejecutivo de Venezuela, Jorge Rodríguez, y el presidente de Petróleos de Venezuela (PDVSA), Rafael Ramírez, pues la estatal petrolera será la propietaria de la empresa que genera parcialmente y distribuye la electricidad en Caracas (Hernández, 2007).

Descripción	Unidad	I/2013	I/2014	I/2015	I/2016	I/2017	I/2018	I/2019	I/2020	I/2021
Importaciones	Mbd	602.94023	640.26258	739.75482	799.60027	939.00634	985.18706	846.98535	593.38682	488.78998
Gas licuado a,b		79.47270	84.58359	105.24114	50.64672	42.58628	61.82836	53.85970	53.08461	59.67039
Gasolina		358.26793	370.04645	426.63772	504.85508	571.34887	598.13029	527.70134	387.87292	297.69987
Turbosina		3.23055	11.95307	23.45415	33.42548	43.16493	55.17573	54.62944	21.76156	28.83660
Diesel		107.11763	132.88597	145.33452	187.43255	237.90849	240.58824	178.09523	114.27620	91.48906
Combustóleo		31.31543	13.00500	16.95830	11.08806	26.40627	16.48432	12.24684	4.26381	0.00000
Naftas		16.88605	19.64144	13.43255	6.08147	12.36066	8.90141	16.44170	8.13490	7.49755
Otros		6.64994	8.14705	8.69643	6.07091	5.23084	4.07871	4.01110	3.99283	3.59650

Notas: a. Transacciones realizadas por Pemex-Gas y Petroquímica Básica. En gasolinas, se incluyen las gasolinas naturales comercializadas por esta empresa. b. Incluye propano. Datos construidos con base en información de Petróleos Mexicanos. **Fuente:** Secretaría de Energía (2021). Sistema de Información Energética.

tica de 2013, como lo muestran los datos extraídos del Sistema de Información energética a cargo de la Secretaría de Energía (Tabla 1.).

Con base en las cifras que presenta la tabla referida México aumentó su dependencia energética anual, desde 2013 año de la reforma parte de un consumo neto de 602.94023 millones de barriles de productos refinados a 985.18706 millones de barriles en 2019, año en el que los resultados de la apertura del mercado sólo permiten interpretar un incremento importante en las importaciones de energéticos.

Recordemos que el 1 de diciembre de 2018 da inicio el nuevo periodo presidencial encabezado por el partido Movimiento de Regeneración Nacional (MORENA). En su proyecto conocido como Cuarta Transformación o 4T el presidente Andrés Manuel López Obrador en su Plan Nacional de Desarrollo, planteó como uno de los principales objetivos la recuperación del sector energético nacional, poniendo énfasis en el daño en que la reforma realizada por la admi-

nistración predecesora significaba un detrimento de la soberanía energética del país, evidenciando la baja producción de la industria de refinación a nivel nacional. Acentuando que uno de los principales motivos para la recuperación de los sectores de energía era impulsar el desarrollo y crecimiento nacional (Gobierno de México, 2019).

Las críticas para rescatar al sector energético no se han hecho esperar, algunas a favor de materializar una soberanía e independencia energética y otras a considerar que el plan presentado es sólo un capricho del actual Presidente. Lo cierto es que la tan publicitada Reforma Energética de 2013 no ha representado beneficio alguno para los consumidores finales y el país aún depende de la capacidad de producción de agentes extranjeros para mantener estable el flujo de consumo de energéticos.

Sumado a lo anterior a inicios de 2020 la humanidad y el mercado global se vieron impactados por un fenómeno de salud mundial; la pandemia causada

por el virus del SARS-COV2, que genera la enfermedad de COVID 19.

La Organización mundial de la Salud (OMS) declaró que el coronavirus COVID-19 ya es una pandemia [...]. Pandemia no es una palabra para usar a la ligera o descuidadamente. Es una palabra que, si se usa incorrectamente, puede causar un miedo irrazonable o una aceptación injustificada de la que la lucha ha terminado, lo que lleva al sufrimiento y muertes innecesarios. Esto después de que el lunes advirtiera que la “amenaza de pandemia se volvió muy real” ya que ha contaminado a 110,00 personas en el mundo (Forbes, 2020).

El resultado de esta declaración tuvo como efecto el confinamiento de la sociedad global, que, como medida sanitaria más importante ordenó bajo las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS) el confinamiento de la población¹⁵, esta medida de movilidad limitada afectó a una larga cadena económica, entre ellos uno de los sectores más castigados fue el petrolero.

Con fecha 25 de abril de 2020 se publicó en el Diario *El País*, el siguiente artículo “la Gran Reclusión dinamita el mercado petrolero” demanda por los suelos, almacenes llenos y productores en jaque: la semana que llevó el crudo a números rojos por primera vez en su historia” (Fariza, 2020).

En sentido contrario al fenómeno mundial, en México la estrategia a seguir para la petrolera estatal PEMEX fue incentivar la producción interna invirtiendo una gran cantidad de esfuerzo y dinero para continuar con el plan de rescate de esta empresa, al respecto el citado diario publica lo siguiente:

¹⁵ En México el inicio del confinamiento se anunciaba “temporal” siendo publicado en el Diario Oficial de la Federación el 24 de marzo de 2020 el Acuerdo por el que se establecen las medidas preventivas que se deberán implementar para la mitigación y control de los riesgos para la salud que implica la enfermedad por el virus SARS-CoV2 (COVID-19), Sin imaginar que el efecto de la reclusión se prolongaría hasta el año 2021 (Secretaría de Salud, 2020).

La crisis del petróleo y el coronavirus ponen a la industria energética de México en un escenario inédito. Las gasolinas se abaratan mientras la petrolera estatal apenas puede sostenerse en una industria que se encuentra detenido en el país latinoamericano. [...] México importa alrededor del 70% de los combustibles que consume, principalmente de Estados Unidos. Con este dato la decisión del presidente mexicano ha sido comenzar la construcción de una refinería de 8.000 millones de dólares en el Estado de Tabasco e impulsar el crecimiento de otras seis refinerías que ya existen en el país. El Escenario actual complica la posibilidad de desarrollar estos planes. “Cuesta menos un barril de gasolina que el petróleo que sirvió para obtenerlo”, plantea Gonzalo Monroy, consultor de energía. Con la caída en los precios del petróleo la crisis económica que se atisba, la estrategia para mantener a flote a la petrolera tendría que cambiar, señala el experto. “Podrían por decreto congelar el precio de la gasolina y captar más impuestos para preservar las finanzas públicas, así como dejar de meter dinero a las refinerías e importar todo el combustible” propone (Corona, 2020).

Sin seguir el comportamiento actual del mercado energético, el actual Gobierno de México no sólo se proyecta en recuperar la empresa nacional, sino también, hace dos grandes apuestas, por un lado, la construcción de una nueva refinería “Dos Bocas”, en el municipio de Paraíso, Tabasco, siendo un proyecto ambicioso, el Gobierno de la República afirma: “la mega obra procesará 340,00 barriles de crudo diario, contará con 17 plantas de proceso y 93 tanques y esferas, que generaran 23,000 empleos directos y 112,000 indirectos (Solís, 2019)”; la segunda apuesta de la administración morenista se consolida con la adquisición de una refinería en Texas, “ México apuesta por el petróleo y compra una refinería en Texas; El presidente López Obrador quiere detener la mayoría de las exportaciones de petróleo y las im-



portaciones de gasolina y otros combustibles. Los críticos dicen que esta incumplido los compromisos de México en materia de cambio climático” (Krauss, 2022), la intención del gobierno nacional es continuar con el plan para erradicar la dependencia energética nacional y apostar a una estabilidad de consumo y precios de los productos refinados del petróleo; así mismo apuntan a que México debe urgentemente invertir en el desarrollo de energía limpias y renovables, para cumplir con los compromisos mundiales adquiridos en años pasados, y que la dependencia en la importación de energéticos tiene menos importancia que el cumplir con el cuidado al medio ambiente (Krauss, 2022).

El desarrollo de proyectos para generar energía verde en México, se ha focalizado en la energía eléctrica, que se ha centrado principalmente en manos de inversionistas privados, quienes han prospectado proyectos en estados como Oaxaca, Baja California Sur, Costas de Yucatán, Quintana Roo, siendo Oaxaca el mayor productor de energía eléctrica¹⁶, el éxito

¹⁶ Las condiciones tanto geográficas como climáticas de México permiten que algunas zonas del país sean particularmente privilegiadas, no sólo localmente, también a nivel mundial; posicio-

aun esta por comprobarse, pero es importante señalar que, si bien la energía eléctrica es importante para el desarrollo nacional, también es necesario señalar que en el campo del desarrollo de un sustituto para el petróleo es lento y divagante, en México no se han desarrollado proyectos confiables que permitan una transición para la erradicación del uso de derivados del proceso de refinación del petróleo, lo que complica aún más nuestra transición energética. Además, consideremos que el petróleo no sólo es convertido en gasolina o Diesel, ya que también tiene una importante participación en industrias como la alimentaria, textil, médica, etc. La sustitución de esta fuente finita de materia prima está representando un reto, que se

nándose como lugares excelentes y estratégicos para el aprovechamiento de energía eólica. Concretamente en el noreste: Baja California, Coahuila, Nuevo León y Tamaulipas. En el sur: Oaxaca, Chiapas y Yucatán. Más recientemente también se ha visto un significativo desarrollo en el centro del país: Jalisco, San Luis Potosí, Zacatecas, Puebla, Querétaro, Guanajuato y Veracruz. Actualmente la energía eólica opera en 13 estados de la República, lo que no significa que llegará a implementarse en todo el resto del país. “Con algunos proyectos que están por desarrollarse, se llegará a 18 o 20 estados, pero definitivamente hay entidades, sobre todo del lado del Pacífico, donde las condiciones del viento no son en absoluto idóneas”, aseveró el presidente de la Amdee (Cacho Carranza, Y. 2019).



complica con la escasez que el mundo experimenta, ya que cada vez es más costoso extraer y refinar petróleo pues se ven involucrados procesos complejos y altamente contaminantes.

CONCLUSIONES

En materia energética es necesario tener presente que la construcción de una soberanía energética implica reducir al máximo la necesidad de consumir energéticos provenientes del extranjero, así como retomar el control directo de la administración de los recursos energéticos nacionales, asegurando el crecimiento de este sector que permita al Estado construir la bases para un desarrollo y crecimiento económico estable, sin depender del suministro extranjero de energías para activar la económica interna nacional; por otra parte y como refuerzo a esta soberanía es importante que el estado mexicano incremente la seguridad energética que permita incrementar las reservas petroleras que aseguren el sustento energético de las futuras generaciones,

recordemos que estas reservas actualmente se han visto disminuidas de forma considerable, y que al ritmo de consumo actual, sólo nos permitirían soportar una escasez de energía aproximada de 3 años, por lo cual es importante construir una seguridad energética, presente y futura.

La apertura del sector energético nacional a partir de la reforma energética de 2013 en el gobierno de Enrique Peña, no ha alcanzado los objetivos principales por los que se realizó, dentro de la publicidad manejada por esa administración se aseguraba que el costo de los energéticos disminuiría considerablemente gracias a la participación de una mayor cantidad de empresas que prestaran los servicios energéticos o los distribuyeran en el territorio nacional, esta disminución de precios no es una realidad y sumado a esto la participación privada en el sector energético, no sólo afectó la dinámica comercial interna; también, sigue afectando el bolsillo de la ciudadanía y fomentando la importación de energéticos extranjeros; PEMEX ahora se ve en la necesidad de com-

petir comercialmente con empresas respaldadas por grandes corporativos internacionales que dominan el mercado mundial, y que por razones de lógica, la renta obtenida por las actividades de producción y distribución de productos derivados del petróleo, entre otros, se encuentra compartida con todos los competidores del mercado interno, lo que se traduce en un perjuicio para asegurar una estabilidad económica, partiendo del hecho de que PEMEX al igual que CFE, son de los mayores contribuyentes al gasto público.

Recordemos que otra de las justificantes de la reforma de 2013 fue la modernización de las Empresas Productivas del Estado que no se materializó en ese periodo presidencial, esto es así toda vez que las empresas nacionales cubren sus ineficiencias mediante la celebración de contratos de diversa naturaleza que le permitan medianamente alcanzar sus objetivos; pero esta tendencia se ve claramente frustrada con la entrada de un gobierno cuyo objetivo es modernizar la empresa estatal y paralizar completamente el entreguismo de nuestros recursos causado por la reforma energética, iniciando una lucha en sentido contrario a lo heredado por la anterior administración.

La postura del gobierno nacional actual nada contra la corriente internacional en el sentido de apuntalar una producción estable y asequible de energía para el territorio nacional construyendo una soberanía y seguridad energética; ésta estrategia puede resultar en el respiro económico que los mexicanos necesitan urgentemente, pues se requieren medidas urgentes para elevar el nivel de vida de los mexicanos, que se ha visto aún más golpeada a partir de la declaración mundial de la pandemia COVID-19; el éxito o fracaso del Plan de Desarrollo Nacional representado por el actual gobierno, es aún incierto, ello es así, toda vez que los resultados de las inversiones y el proyecto de Soberanía y Seguridad Energética Nacional no rendirán sus frutos en un futuro cercano.

Lo anterior no significa, que éste plan de construcción de soberanía y seguridad energética nacional sea un desacierto, consideramos que la postura

de México de nadar contra la corriente energética mundial, puede significar para nuestro país el andamiaje necesario y perfecto, para contar con la holgura energética que nos permita avanzar en el campo de las energías sustentables y verdes; es un hecho que eliminar el consumo de fuentes fósiles de energía no es una realidad cercana, pues como se observa en el panorama mundial, incluso las grandes potencias económicas no han conseguido la transición energética verde.

Por otro lado, debemos observar que los mayores avances en energías verdes se han dado principalmente en el sector eléctrico, dejando un poco de lado el desarrollo de un sustituto del petróleo, las biomásas o los biocombustibles aun no son una realidad, pues falta aún mucha tecnología que permita la generación energética a gran escala; asimismo, no debemos olvidar que el petróleo forma parte muy importante en todas las cadenas de producción no sólo como fuente de energía sino también, como materia prima principal con la que se fabrican miles de los productos de consumo diarios, por ello, el reto para encontrar un verdadero sustituto es aún mayor.

Consideramos que la estabilidad energética que pretende construir el actual gobierno representa el primer paso para impulsar sin riesgos proyectos de investigación que permitan a nuestro país desarrollar el mercado de las energías verdes con la seguridad de no depender del incierto mercado energético mundial, que representa para nuestra economía gastos importantes en la compra de combustibles extranjeros e inestabilidad económica; el reto para México ahora es consolidar su soberanía y seguridad energética que al mismo tiempo le permitan avanzar en el desarrollo de las energías renovables, asequibles y verdes.

REFERENCIAS

Agencia Internacional de Energía, (2019). IEA. Obtenido de Seguridad Energética Garantizar la disponibilidad ininterrumpida de fuentes de energía a un precio asequible: <https://www.iea.org/areas->

- of-work/ensuring-energy-security
- Cacho Carranza, Y. (2019). Ecología. Obtenido de Energía Eólica, futuro Prometedor para las Renovables: <https://petroquimex.com/PDF/JulAgo19/Amdee-Energia-Eolica.pdf>
- Cantú, J. (30 de septiembre 2018). Proceso. Obtenido de Proceso: <https://www.proceso.com.mx/opinion/2018/9/30/tres-sexenios-de-dilapidar-el-dinero-publico-212863.html>
- Corona, S. (26 de marzo de 2020). El País. Obtenido de El País: <https://elpais.com/economia/2020-03-26/la-crisis-del-petroleo-y-el-coronavirus-ponen-a-la-industria-energetica-de-mexico-en-un-escenario-inedito.html>
- Diccionario Economista, (2021). Obtenido de <https://diccionarioeconomista.com/dic/index.php?name=globalizaci%C3%B3n&submit=Buscar>
- Comisión Nacional de Energía, (2015). Gobierno de México. Obtenido de Rondas: <https://rondas-mexico.gob.mx/esp/rondas/>
- Expansión, (2021). Expansión Datosmacro.com. Obtenido de Indicadores Económicos y socio-demográficos: <https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/petroleo/reservas/mex%20https://datosmacro.expansion.com/energia-y-medio-ambiente/petroleo/reservas/mexico%20ico>
- Fariza, I. (25 de abril de 2020). El País. Obtenido de El País: <https://elpais.com/economia/2020-04-25/la-gran-reclusion-dinamita-el-mercado-petrolero.html>
- Ferrajoli, L. (octubre de 1998). Mas allá de la Soberanía y la Ciudadanía; un constitucionalismo global. Obtenido de Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes: <http://www.cervantesvirtual.com/obra/ms-all-de-la-soberana-y-la-ciudadana-un-constitucionalismo-global-0/>
- Fideicomiso de Riesgo Compartido. (05 de enero de 2018). Gobierno de México. Obtenido de <https://www.gob.mx/firco/articulos/seguridad-alimentaria-y-nutricional>
- Fondo Monetario Internacional, (3 de marzo 2021), Obtenido de Fondo Monetario Internacional, Ficha Técnica. Obtenido de <https://www.imf.org/es/About/Factsheets/IMF-at-a-Glance>.
- Forbes. (11 de marzo de 2020). OMS declara pandemia por el coronavirus Covid-19. Recuperado el 20 de enero de 2022, de Forbes: <https://www.forbes.com.mx/mundo-pandemia-coronavirus-covid-19/>
- García, J., & Pulgar, N. (2010). Scielo; Obtenido de Globalización: aspectos políticos, económicos y Sociales: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1315-95182010000400014
- Gobierno de México, (30 de abril de 2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. Obtenido de <https://lopezobrador.org.mx/wp-content/uploads/2019/05/PLAN-NACIONAL-DE-DESARROLLO-2019-2024.pdf>
- Hernández, C. (9 de febrero de 2007). El País; Obtenido de El Gobierno venezolano nacionaliza la principal empresa eléctrica: https://elpais.com/diario/2007/02/10/internacional/1171062012_850215.html
- INEGI. (2020). Objetivos de Desarrollo sostenible 2020, Obtenido de indicadores: <https://agenda2030.mx/ODSGoalSelected.html?ti=T&cveArb=ODS0070&goal=0&lang=es#/ind>
- Krauss, C. (18 de enero de 2022). The New York Times. Obtenido de México apuesta por el petróleo y compra una refinería en Texas: <https://www.nytimes.com/es/2022/01/18/espanol/texas-mexico-deer-park.html>
- La Jornada, (30 de mayo de 2016). Vanguardia MX. Obtenido de Vanguardia MX: <https://vanguardia.com.mx/dinero/cuatro-de-las-siete-hermanas-del-negocio-petrolero-regresan-por-el-cruce-mexicano-decadas-EQVG3224220>
- Latin Clima. (2021). Latin Clima. Obtenido de Red de Comunicación en cambio climático: <https://latinclima.org/energia-verde-e-inclusiva/breve-historia-de-la-relacion-entre-ser-humano-y-energia>
- Leal Moya, L. (2005) Boletín Mexicano de Derecho Comparado, México, Vol 38, No. 114, sep./dic. Recuperado el 20 de marzo de 2022, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0041-86332005000300005
- López-Basols, H. (2014). Derecho Internacional público y jurisprudencia internacional (Cuarta ed.). México: Porrúa. Recuperado el 6 de 2021
- Martínez Rangel, R., & Soto Reyes Garmendia, E. (15 de marzo de 2012). Scielo. Recuperado el 4 de 2020, de <http://www.scielo.org.mx/pdf/polcul/n37/n37a3.pdf>
- Oswald, U. (2017), Seguridad, disponibilidad y sustentabilidad energética en México, Revista Mexicana de Ciencias Políticas y Sociales, México, Vol. 62 Issue 230, May-Agust. 2017, Páginas 155-194, Recuperado el 20 de marzo de 2022, de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S018519181730020X#bib0100>
- Petroquimex, La Revista de la Industria Energética. (6 de agosto de 2019). Obtenido de Energía Eólica, Futuro Prometedor para las Renovables: <https://petroquimex.com/energia-eolica-futuro-prometedor-para-las-renovables/>
- Pulso, (27 de octubre 2018). Pulso, Diario de San Luis. Obtenido de Las Siete Hermanas del Petróleo: en <https://pulsoslp.com.mx/opinion/las-siete-hermanas-del-petroleo/862747>
- Real Academia, E. (2021). *Diccionario Panhispánico de Español Jurídico*: <https://dpej.rae.es/#/entry-id/E225250>.
- Rifkin, J. (2020). El Green New Deal Global. México: Paidós.
- Sacristán Roy, E. (9 de 8 de 2006). Scielo, Economía UNAM. Obtenido de Las Privatizaciones en México: <http://www.scielo.org.mx/pdf/eunam/v3n9/v3n9a4.pdf>
- Secretaría de Economía, 2018. Gobierno de México. Obtenido de Tratados y Acuerdos que México ha firmado con otros países: <https://www.gob.mx/se/articulos/tratados-y-acuerdos-que-mexico-ha-firmado-con-otros-paises?idiom=es>
- Secretaría de Energía, (10 de julio de 2015). Gobierno de México. Obtenido de Plan Quinquenal de Licitaciones para la Exploración y Extracción de Hidrocarburos: <https://www.gob.mx/sener/acciones-y-programas/plan-quinquenal-de-licitaciones-para-la-exploracion-y-extraccion-de-hidrocarburos-2015-2019-7652>
- Secretaría de Energía, (2021). Sistema de Información Estadística. Obtenido de Sector Energético: <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=temas>
- Secretaría de Salud. (24 de marzo de 2020). Diario Oficial de la Federación. Obtenido de ACUERDO por el que se establecen las medidas preventivas que se deberán implementar para la mitigación y control de los riesgos para la salud que implica la enfermedad por el virus SARS-CoV2 (COVID-19): https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5590339&fecha=24/03/2020
- Solís, A. (27 de febrero de 2019). Forbes. Obtenido de Construcción de nueva Refinería comenzará hasta finales de 2019: <https://www.forbes.com.mx/construccion-de-nueva-refineria-comenzara-hasta-finales-de-2019/#:~:text=La%20construccion%20de%20la%20nueva%20refineria%20de%20Octavio%20Romero%20Oropeza%20en%20su%20reporte%20de%20resultados>.

CAMPUS TEHUANTEPEC



Titulación



Laboratorios



Talleres



Instituto de Energía



Equipo de alta tecnología



Centro de idiomas

Avances y desarrollo de técnicas experimentales, en la UNISTMO, para la medición de vibraciones en álabes de aerogeneradores de baja potencia

RESUMEN

Dentro del contexto del diseño mecánico, el análisis de vibraciones en los elementos de máquinas es un factor importante que permite garantizar que un mecanismo o dispositivo opere de manera óptima a lo largo de su vida útil, evitando deformaciones excesivas o efectos dinámicos graves como la resonancia. En este trabajo, se recurre a la técnica del análisis modal experimental (EMA, por sus siglas en inglés) con el objetivo de validar los diseños en álabes de aerogeneradores de pequeña potencia manufacturados en la Universidad del Istmo. Tomando como caso de estudio un álabes FX-63137, se identifican sus parámetros modales (frecuencias naturales, razón de amortiguamiento y formas de modo) empleando: acelerómetros, martillo de impacto y un sistema de adquisición de datos que, en conjunto, proporcionarán los datos necesarios para la etapa de procesamiento de señales y aplicación de técnicas del EMA. Finalmente, los resultados experimentales son comparados con una simulación numérica.

Luis Angel De La Rosa Jiménez^{a,*}, Víctor Iván Moreno Oliva^a, Ociel Flores Díaz^a, Hugo Francisco Abundis Fong^b, José Rafael Dorrego Portela^a

e-mail: LuisAngelDLRJ@gmail.com

ABSTRACT

Into the mechanical design context, the machinery element's vibration analysis is an important factor that allows to guarantee that a mechanism or device operates optimally during his useful life, avoiding excessive deformations or serious dynamics effects as the resonance. In this work, we use the Experimental Modal Analysis technique (EMA), the aim is to validate the small wind turbine blade's designs manufactured at the Universidad del Istmo. Taking an FX-63137 airfoil as a study case, identify his modal parameters (natural frequencies, damping ratio and modal forms) employing accelerometers, impact hammer and a data acquisition system which provide the data necessary for the signal processing phase and the EMA technique's application. Finally, the experimental results are compared with a numeric simulation.

Palabras clave: Análisis modal experimental, vibraciones, perfil FX63-137.

^a División de Estudios de Posgrado, Universidad del Istmo Campus Tehuantepec, Ciudad Universitaria S/N, Santa Cruz, 70760 Tehuantepec, Oax.

^b División de Estudios de Posgrado, Tecnológico Nacional de México/I.T de Pachuca, Felipe Angeles Km. 84.5, Venta Prieta, 42083 Pachuca de Soto, Hgo.

1. INTRODUCCIÓN

La estructura de los aerogeneradores aprovecha la energía cinética del viento para producir energía mecánica capaz de poner en rotación al conjunto electromecánico conformado por el rotor y álabes para producir a partir de este movimiento energía eléctrica. Debido a este movimiento conjunto, suelen manifestarse fenómenos dinámicos que comprometen la integridad de la estructura, uno de estos son las vibraciones mecánicas, las cuales, traen consigo efectos indeseables debido al aumento de esfuerzos y las pérdidas de energía que las acompañan, además de la generación de ruido, desgaste, falla por fatiga, aflojamiento de uniones no permanentes y la resonancia (Rao, 2012).

El estudio de este fenómeno físico en aerogeneradores es importante porque son estructuras parcialmente elásticas que operan en ambientes inestables en los que tienden a resultar una respuesta vibrante (Manwell, et al, 2010), generando flexiones excesivas por cargas dinámicas repetidas principalmente en la torre y álabes, su importancia recae en las frecuencias naturales f_n propias, en este caso específico, en los álabes, ya que a cierta frecuencia natural de vibración las partículas que conforman al cuerpo rígido oscilarán siguiendo un patrón de deformación característico denominado como forma modal a tal grado que el álabes pueda alcanzar una deformación permanente o llegar a la falla si ocurriese la resonancia.

A lo largo del tiempo y en la actualidad, varios autores han abarcado el área de estudio de las vibraciones mecánicas desde el punto de vista teórico hasta el modal experimental y operacional. Estos estudios han sido aplicados para obtener los parámetros modales que permiten estudiar y comprender el comportamiento dinámico de una estructura, una máquina o alguno de sus componentes ante excitaciones forzadas o bajo condiciones de operación en un ambiente específico (Reynders & De Roeck). El análisis modal de sistemas mecánicos comprende distintas etapas (de acuerdo con Reynders y De Roeck, 2007 y Heylen et al, 1997) de los cuales podemos enlistar los siguientes:

1. montaje de equipo y preparación del ensayo.
2. adquisición de datos y estimación de las funciones de respuesta en frecuencia (FRF).

3. identificación del sistema.
4. estimación de parámetros modales.

Siendo estos el fundamento principal para el desarrollo e implementación de las técnicas del EMA, el cual dispone de distintos métodos matemáticos para su desarrollo, aplicados para sistemas de un solo grado de libertad (SDOF, *singlee degree of freedom*) como la técnica de detección de picos (*peak picking*), ajuste circular (*circle fitting*) y para sistemas de múltiples grados de libertad (MDOF, *multiple degree of freedom*) como el método de polinomios racionales fraccionarios (*rational fractional polynomials*), mínimos cuadrados complejo (*least square complex method*), entre otros.

En este trabajo se abordan las etapas presentadas, realizando el montaje y descripción de los equipos empleados para desarrollar los ensayos hasta la estimación de los parámetros modales.

2. ANÁLISIS MODAL EXPERIMENTAL

2.1 Teoría de vibraciones mecánicas

Para sistemas mecánicos m-r-a (masa-resorte-amortiguador) SDOF, la ecuación de movimiento para vibración libre se define por la expresión:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

donde m es la masa, c es el coeficiente de amortiguamiento, k la rigidez del sistema, x , \dot{x} y \ddot{x} son la posición, velocidad y aceleración del cuerpo. Al denotar el polinomio característico de dicha ecuación diferencial lineal y homogénea por λ , la solución adquiere la forma:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (2)$$

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{\zeta^2 - 1}$$

donde $\zeta = c/c_c$ es la razón de amortiguamiento y $c_c = 2m\omega_n = 2\sqrt{km}$ denota el amortiguamiento crítico del sistema, donde ω_n es la frecuencia natural de vibración en *rad/seg*. Para un caso de modelo subamortiguado, es decir, $0 < \zeta < 1$ y $c_c > c$, implica que la ec. (2) tendrá raíces complejas conjugadas:

$$\lambda_{1,2} = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}j = -\sigma \pm \omega_d \quad (3)$$

De manera que la respuesta del sistema m.r.a subamortiguado es de la forma:

$$x(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[A \cos\left(\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}t\right) + B \sin\left(\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}t\right) \right] \quad (4)$$

donde las constantes A y B se obtienen a partir de condiciones iniciales de posición y velocidad. Las raíces complejas se representan en un plano S (Fig. 2a). De tal modo que a medida que el amortiguamiento incrementa con masa y rigidez constante, el polo se mueve a la izquierda del eje $j\omega$ y el valor de la frecuencia natural amortiguada disminuye y conforme el amortiguamiento se aproxima al nivel crítico, la raíz y su conjugado se aproximan al eje σ . Aquí, la longitud del vector desde el origen al polo (radio del círculo) es la frecuencia natural, además en el extremo izquierdo del eje $j\omega$ se dice que el sistema es estable mientras que para el extremo contrario es inestable.

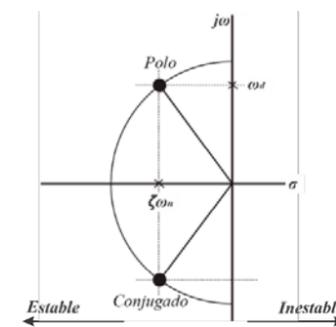


Figura 2a. Nomenclatura del plano S.

2.2 Función de Respuesta en Frecuencia (FRF)

Las señales obtenidas en el EMA se registran, claramente, en el dominio del tiempo, y para poder extraer al máximo la información frecuencial se transforma la señal del dominio del tiempo al dominio de frecuencias. Esto hace de la transformada de Fourier uno de los conceptos más importantes (Meruane, 2013), y específicamente la transformada discreta de Fourier (DFT) es la herramienta principal en

la fase de procesamiento digital de señales, definida como:

$$X(k) = \sum_{k=0}^{N-1} x(k)e^{-2j\pi nk/N} \quad (5)$$

donde k es el número de muestras el cual se incrementa en cada término de la suma (1, 2, 3, ..., n), $x_0(k)$ son los valores de las amplitudes obtenidas respecto al tiempo, n es la frecuencia (para $n = 0, 1, \dots, N-1$) y N es el total de muestras.

El EMA se basa principalmente en la función de transferencia escrita en el dominio frecuencial $H(\omega)$ entre la respuesta dinámica $Y(\omega)$, y la fuerza de excitación $X(\omega)$, en función de la frecuencia de excitación (Fu & He, 2001):

$$H(\omega) = \frac{Y(\omega)}{X(\omega)} \quad (6)$$

de la cual $Y(\omega)$ y $X(\omega)$ son obtenidas tras aplicar la DFT a las señales de respuesta y excitación dinámica. La ec. (6) es habitualmente conocida como la función de respuesta en dominio de la frecuencia FRF.

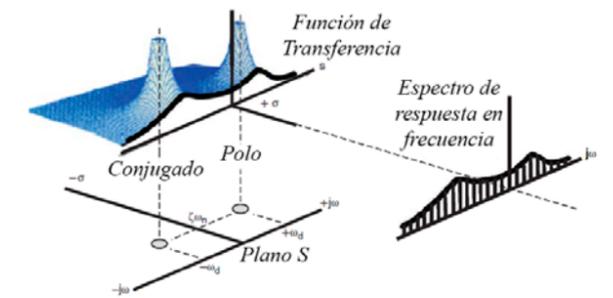


Figura 2b. Proyecciones de la transformada de Laplace, el plano S y la función de respuesta en frecuencia (Avitabile, 2017).

Al proyectar la ubicación de los polos de la función de transferencia del sistema por debajo, se puede ver el plano S como en la Fig. 2b, en la que se muestra la interrelación entre la función de transferencia del sistema, la FRF y el plano S. Tanto las porciones positivas como negativas de la FRF se muestran, pero normalmente solo la parte positiva de la frecuencia se muestra en el eje, sin embargo, existe la porción conjugada.

2.3 Extracción de parámetros modales por la técnica de peak picking (pp)

De acuerdo con Ewins (2009), este método asume que toda la respuesta es atribuida al modo local y que los efectos debidos a otros modos pueden ser ignorados. La técnica pp es aplicada de la siguiente manera:

1. Se identifican los picos en la FRF y la frecuencia de una de las respuestas máximas es tomada como la frecuencia natural del modo.
2. El máximo local de la FRF es denotado por $|H(\omega)|$ y el ancho de banda de frecuencias de la función para un nivel de respuesta $|H(\omega)|/\sqrt{2}$ es determinado. Los dos puntos extremos identificados como ω_a y ω_b son los puntos de media potencia.
3. La estimación del amortiguamiento del modo es calculada empleando el método de media potencia basado en el factor Q.

El método de ancho de banda de un pico de resonancia está definido por:

$$B = \omega_b - \omega_a \tag{7}$$

donde las frecuencias superior e inferior ω_a y ω_b , están definidas por

$$|H(\omega_a)|^2 = |H(\omega_b)|^2 = \frac{1}{2} |H(\omega_{max})|^2 \tag{8}$$

ω_{max} representa el pico de resonancia, el factor de calidad o factor Q, es calculado como la razón entre la frecuencia central y el ancho de banda de media potencia:

$$Q = \frac{\omega_n}{B_r} \tag{9}$$

aquí $\omega_n = \omega_{max}$ representa la frecuencia natural de vibración para el modo resonante. El parámetro B, es utilizado para determinar la razón de amortiguamiento crítico ζ . Para cualquier factor de amortiguamiento relativo (Ewins 2009 & Brandt, 2011):

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_n} \tag{10}$$

Para pequeñas razones de amortiguamiento, $\zeta \ll 1$, la ec. (10) puede aproximarse:

$$\zeta = \frac{\omega_b - \omega_a}{2\omega_n} \tag{11}$$

simplificando con B

$$\zeta \approx \frac{B}{2\omega_n} \tag{12}$$

con esta nueva expresión el factor Q puede expresarse como

$$Q \approx \frac{1}{2\zeta} \tag{13}$$

Con base en lo anterior el factor de pérdida η se define como:

$$\eta \cong \frac{\Delta\omega}{\omega_n} = 2\zeta \tag{14}$$

En resumen, la frecuencia natural del sistema es determinada por la ubicación del pico en el espectro de frecuencias y el amortiguamiento es estimado por el método de ancho de banda de media potencia. Brandt, en su literatura "Noise and vibration analysis" proporciona un método alternativo llamado "peak in the imaginary part" para encontrar ω_n mirando a la ubicación del pico que ocurre en la parte imaginaria de la FRF. El método pp para la determinación de la frecuencia natural y la razón de amortiguamiento se ilustra en la Fig. 2c.

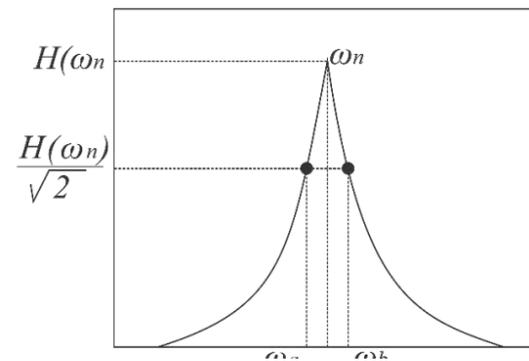


Figura 2c. Método de peak picking y ancho de banda a un pico resonante.

3. METODOLOGÍA

3.1 Caso de estudio: Álabes FX-63137

Para desarrollar y aplicar el EMA, principalmente para obtener las FRF's se requiere perturbar la dinámica del sistema en sus condiciones iniciales a partir de una fuente de excitación. Varios autores como Avitabile (2017), Ewins (2009) o Brandt (2011), por mencionar solo algunos, abordan este punto en la literatura. Existen diversos excitadores para poder realizar los ensayos modales, siendo los más comunes el martillo de impacto y el excitador electromecánico. En este trabajo se utiliza como fuente de excitación el martillo de impacto de la Fig. 3a.

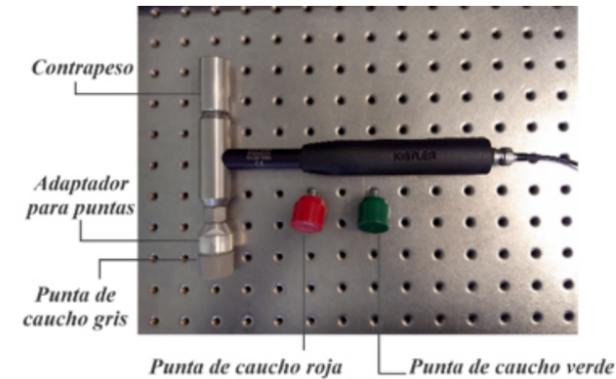


Figura 3a. Martillo de impacto Kistler 8640A5 y tres puntas de caucho intercambiables verde, roja y gris (rígida, media y suave).

La metodología propuesta y desarrollada se presenta en la Fig. 3b.

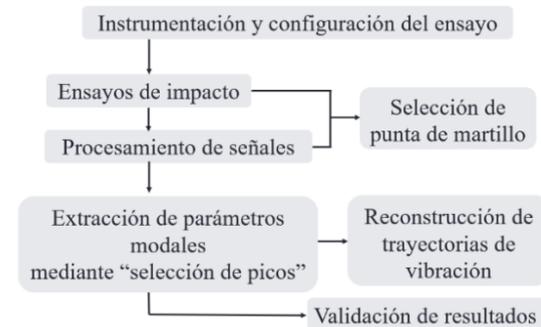


Figura 3b. Metodología desarrollada.

3.2 Instrumentación y configuración del ensayo

El caso de estudio está basado en la aplicación del EMA a un álabes FX-63137 de longitud equivalente a 1.7 metros. Para la preparación del ensayo, se fijó el extremo correspondiente a la raíz mediante una prensa sobre una mesa óptica para asemejar una condición en voladizo. Además del martillo de impacto de la Fig. 3c, se emplean 3 acelerómetros uniaxiales Kistler 8640A5 de alta frecuencia, igualmente espaciados a lo largo del eje longitudinal del álabes.

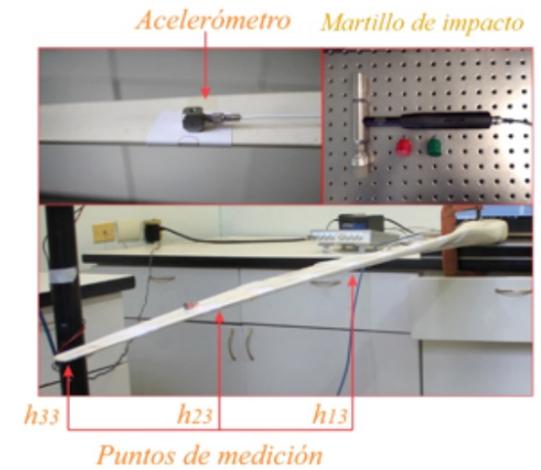


Figura 3c. Configuración de ensayo para el álabes.

3.3 Selección de la punta de martillo

Uno de los puntos principales para obtener un análisis adecuado, es generar un ensayo limpio, en el cual la señal registrada tenga poca o nula contaminación de ruido. Para ello, se tienen tres puntas de caucho que pueden emplearse con el martillo de impacto y dependerá de esta, la respuesta dinámica del álabes cuando se impacte. Por tanto, se evaluaron las pruebas de impacto para cada punta del martillo y se transformaron cada una de las señales de excitación y de respuesta dinámica muestreadas con el martillo y los acelerómetros en el dominio del tiempo al dominio frecuencial mediante la DFT (ec. 5) para obtener $X(\omega)$ y $Y(\omega)$ respectivamente.

El proceso anterior se ilustra en las figuras 3d-a y 3d-b. Posteriormente ambos espectros $X(\omega)$ y $Y(\omega)$ se relacionan a partir de la ec. 6 para generar la FRF denotada como $H(\omega)$ con el fin de aumentar la información frecuencial del álabes al utilizar ambas señales y se puede observar en la Fig. 3f. que, evidentemente hay un cambio en este nuevo espectro

en el cual, se logran visualizar las resonancias con una contribución en la amplitud espectral equivalente para cada modo de vibración.

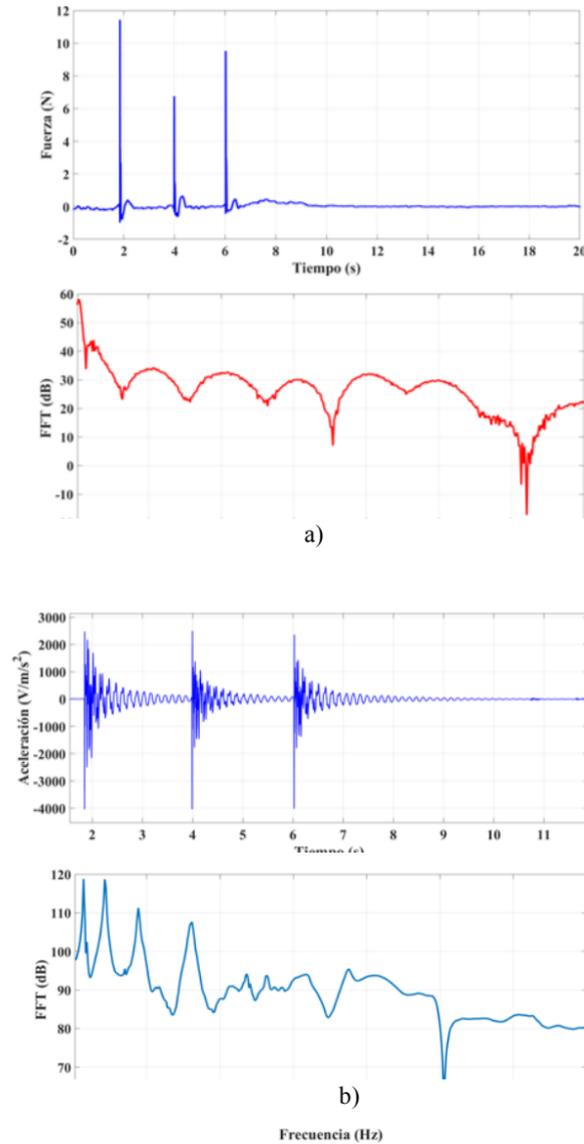


Figura 3d. a) Excitación dinámica en el dominio del tiempo (superior) y su DFT (inferior) y b) Respuesta dinámica en el dominio del tiempo (superior) y su DFT (inferior).

Las señales registradas en las Figuras 3d a) y 3d b) corresponden a los ensayos realizados con la punta de caucho verde.

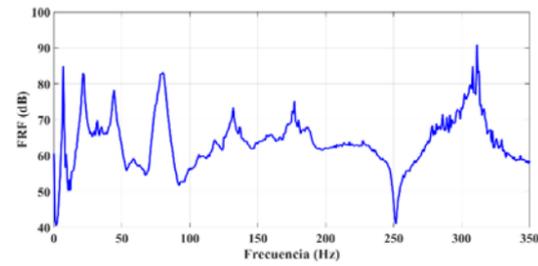


Figura 3e. Función de respuesta en frecuencia (FRF) del álabe para la punta del caucho verde.

Es considerable la manera en la que la información frecuencial aumenta al comparar el espectro FRF con la respuesta dinámica del álabe. Para seleccionar la punta del martillo se emplea el concepto de espectro de coherencia el cual emplea los espectros de potencia de excitación (G_{xx}), de respuesta (G_{yy}) y el espectro de potencia cruzado de ambos espectros (G_{xy} y G_{yx}) para comparar el resultado de las señales entre las tres puntas empleadas, la función de espectro de coherencia se define por la ec. (15) (Brand 2011 & Avitabile 2017), donde * denota el conjugado complejo:

$$\gamma^2 = \frac{G_{yx}G_{xy}}{G_{xx}G_{yy}} = \frac{[Y(\omega)X(\omega)^*]^2}{[X(\omega)X(\omega)^*][Y(\omega)Y(\omega)^*]} \quad (15)$$

Con base en la definición del espectro de coherencia (Anders, 2011):

$$0 \leq \gamma^2 \leq 1 \quad (16)$$

este solo toma valores por debajo de la unidad cuando existe contaminación de ruido en una o ambas señales indicando que estas no están coherentemente relacionadas, caso contrario cuando toma la unidad.

La comparación de los espectros de los ensayos para las tres puntas del martillo, muestran que para la punta gris (Fig. 3f-a), el espectro de coherencia se deteriora alrededor de los 200 Hz, mientras que para la punta roja (Fig. 3f-b) este se deteriora alrededor de los 100 y 500 Hz, sin embargo, es notorio que la FRF obtenida presenta muchas alteraciones en las cercanías. Con base en estos últimos, se aprecia que el espectro de coherencia para la punta verde (Fig. 3f-c) comienza a presentar un deterioro aproximadamente a 300 Hz, sin embargo, este tiene mayor presencia por encima de 500 Hz.

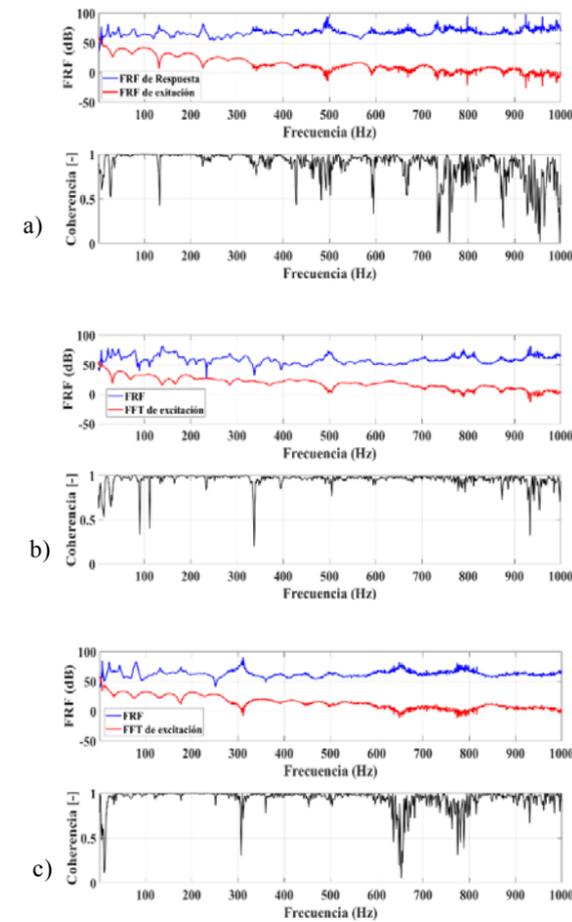


Figura 3f. FRF y espectro de excitación (superior azul y roja respectivamente) y espectro de coherencia (inferior) para ensayo de impacto con punta de martillo gris, b) roja y c) verde.

Por lo general, $\gamma^2 \approx 1$ cerca de la frecuencia natural del sistema porque las señales son grandes y menos influenciadas por el ruido (Thomson, 1983) y es menor a uno cerca de las anti-resonancias.

Con base en la comparación realizada, se justifica que el espectro de coherencia obtenido en el ensayo con la punta verde presenta un mejor espectro con respecto a las puntas gris y roja, además de que los picos de resonancia entre 0 y 100 presentan una mayor amplitud como se muestra en la FRF de la Fig. 3i, misma que corresponde a la FRF generada en el ensayo con punta verde.

En “Modal testing: a practitioner’s guide”, el autor Avitabile menciona que, para bajas frecuencias, la selección de la punta de excitación no tiene mucha

relevancia debido a que es posible medirlas sin mayor problema. Sin embargo, en este caso, se seleccionó la punta de caucho verde extendiendo el punto de vista utilizando los espectros generados.

3.4 Extracción de parámetros modales

Para la extracción de los parámetros modales del álabe se decide implementar la técnica de peak picking, sin embargo, este método se encuentra limitado para su aplicación a sistemas SDOF, pese a eso, este puede utilizarse para sistemas SDOF bajo las siguientes consideraciones:

1. los modos deben estar lo suficientemente separados unos de otros y,
2. el sistema debe ser lineal.

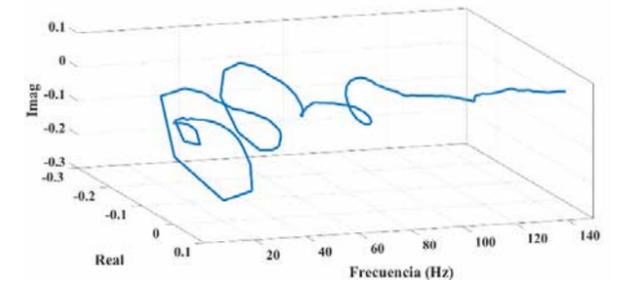


Figura 3g. Gráfico 3D de la FRF del álabe como un sistema de múltiples grados de libertad.

Primero, es evidente que el álabe es un sistema continuo y por tanto un sistema MDOF, la Fig. 3g muestra un gráfico 3D de la FRF, misma que proporciona sus proyecciones en cada uno de los planos que contienen al gráfico, como lo son el diagrama de Nyquist, el espectro en la parte imaginaria y el espectro en la parte real y aun cuando este representa un sistema MDOF, se puede emplear la técnica de peak picking al cumplirse las dos condiciones mencionadas con anterioridad.

En lo referente a la distribución de los modos a lo largo del espectro FRF, este puede observarse al trabajar con el espectro de densidad espectral PSD definido por:

$$PSD = |H(\omega)|^2 \quad (17)$$

y representado por su norma en la Fig. 3h para el espectro FRF de la Fig. 3e.

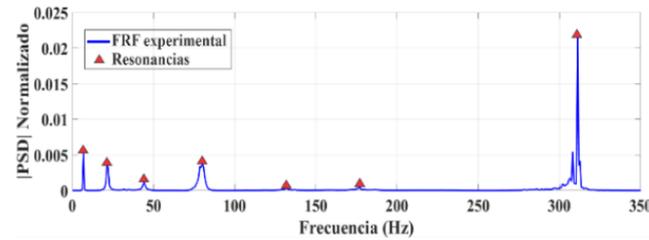


Figura 3h. PSD de la FRF.

La figura anterior muestra como las resonancias identificadas se encuentran considerablemente separadas unas de otras, es decir, ninguna de ellas se sobrepone a otro modo de vibración y por tanto se cumple la primera condición.

La linealidad del sistema por otro lado puede analizarse de distintas formas entre ellas la transformada de Hilbert, sin embargo, se asumen las siguientes consideraciones para observar de manera simple este punto:

1. Un sistema mecánico puede considerarse lineal cuando su deformación es mínima, por ejemplo, una viga en voladizo que se flexiona un ángulo θ muy pequeño, este tendrá deflexiones muy pequeñas tal que las relaciones trigonométricas que se encuentren en el modelo dinámico puedan simplificarse mediante su expansión por la serie de Taylor.
2. Un espectro FRF del tipo no lineal, no tiene las características del espectro de la fig. 5k, los del tipo no lineal no tienen el pico resonante definido tal como se ve en la Fig. 3i.

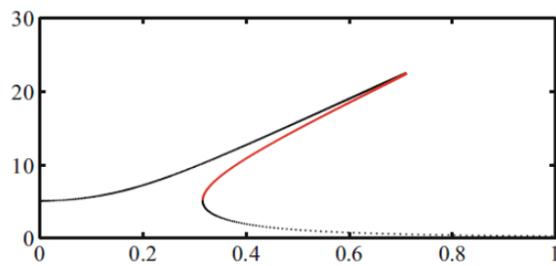


Figura 3i. Ejemplo de un modo resonante no lineal, Kerschen, G. (Ed.). (2016).

Tomando en cuenta los puntos anteriores y además indicando que la excitación del álabe fue muy ligera, se aclara que los desplazamientos generados son muy pequeños y por tanto podemos indicar un comportamiento lineal. De esta forma, podemos aplicar de forma justificada la técnica de peak picking y extraer los parámetros modales del álabe. La Fig. 3j. muestra la aplicación de esta técnica a un pico resonante.

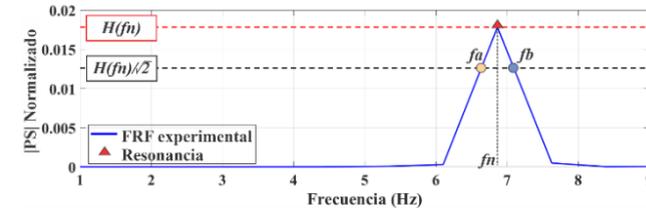


Figura 3j. Identificación del primer modo de vibración.

Los parámetros modales extraídos se presentan en la Tabla 1 para siete modos de vibración en el plano de aleteo.

Tabla 1. Parámetros modales extraídos con peak picking.

Modo	$f_n(\text{Hz})$	Q	$\zeta(\%)$	η
1	6.88	15.02	3.32	0.066
2	21.36	16.45	3.03	0.060
3	44.25	39.56	1.26	0.025
4	80.10	27.87	1.79	0.035
5	131.99	138.69	0.36	0.007
6	177.00	327.84	0.15	0.003
7	310.52	681.61	0.07	0.001

3.5 Reconstrucción de modos

Para estimar los vectores modales se utilizaron los tres espectros registrados con los tres acelerómetros de la configuración de la Fig. 3c., así la respuesta dinámica del álabe sería bajo la misma fuerza de impacto del martillo. Este ensayo simultáneo proporciona un vector columna de la matriz FRF modal descrita por la literatura:

$$h_{ij} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \quad (18)$$

La Fig. 3k. muestra un esquema representativo del vector columna obtenido al realizar el ensayo con los tres acelerómetros (a_1, a_{21} y a_3) ubicados a $1/3 L, 2/3 L$ y L , donde L es la longitud del álabe.

Las trayectorias de deformación son obtenidas analizando la parte imaginaria de la FRF. En la Fig. 3l se muestran los tres primeros modos de vibración en flexión reconstruidos para el plano de aleteo, esto dada la limitante de contar con solo tres acelerómetros, sin embargo, la IEC 61400-23 indica que deben obtenerse como mínimo las primeras dos frecuencias naturales en aleteo y la primera en el plano de borde.

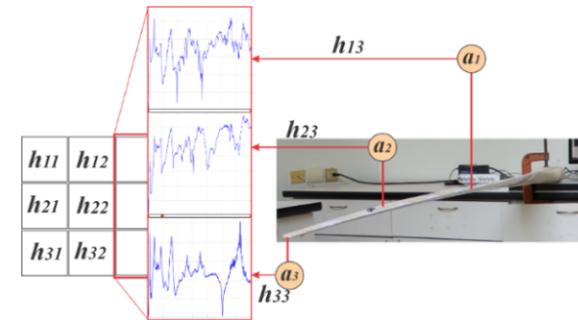


Figura 3k. Vector columna generado en el ensayo simultáneo con 3 acelerómetros.

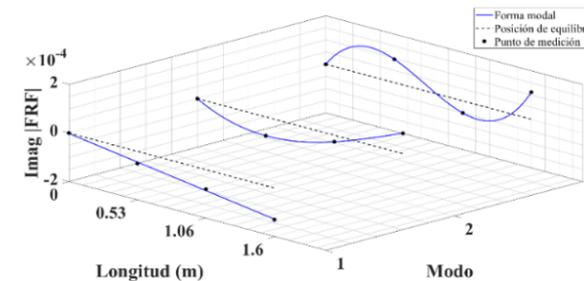


Figura 3l. Trayectorias modales de aleteo para las primeras 3 frecuencias naturales del álabe.

Los modos de vibración anteriores representan los patrones de deformación que adquiere el álabe en el plano de aleteo, y sus correspondientes vectores modales (en unidades espectrales) se registran en la Tabla 2, y para poder graficarlas como curvas suaves se realizó un ajuste de curva polinomial para dichos vectores. Los puntos de la gráfica corresponden a los acelerómetros utilizados en dicha posición.

Tabla 2. Vectores modales normalizados para el plano de aleteo

Posición (m)	Modo 1	Modo 2	Modo 3
0	0	0	0
0.53	-0.00005	-7.74×10^{-5}	9.59×10^{-5}
1.06	-0.00008	-2.70×10^{-5}	-4.96×10^{-5}
1.60	-0.00013	8.36×10^{-5}	0.000111

El mismo análisis es aplicado para evaluar la respuesta dinámica en el plano de borde del álabe. En este caso, la punta roja del martillo resultó mejor para los ensayos, en la Fig. 3m. se muestra el espectro de coherencia en conjunto con la FRF del ensayo mencionado.

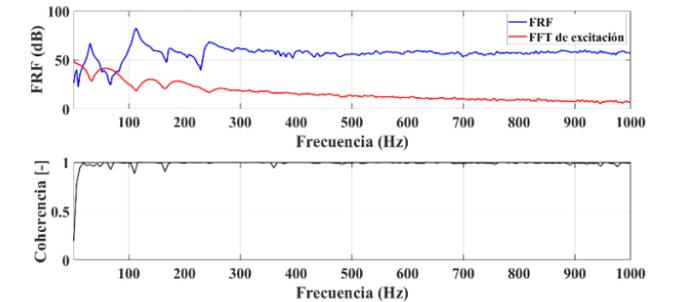


Figura 3m. FRF y espectro de excitación (superior azul y roja respectivamente) y espectro de coherencia inferior.

El ensayo realizado en el borde mantiene mayor estabilidad en la frecuencia al contrario que los ensayos en aleteo, esto se atribuye principalmente a que el borde es menos sensible a la flexión. Los parámetros extraídos para este plano se reportan en la Tabla 3 para un rango entre 1 y 250 Hz, lo cual sugiere una menor contribución a bajas frecuencias en este plano de medición, siendo frecuencias por encima de 100 Hz aquellas que contribuyen mayormente en la dinámica del álabe.

Tabla 3. Parámetros modales extraídos con peak picking para el plano del borde.

Modo	$f_n(\text{Hz})$	Q	$\zeta(\%)$	η
1	30.52	13.70	3.64	0.072
2	112.90	35.54	1.40	0.028
3	244.10	26.02	1.92	0.038

Las formas modales en el plano de borde se muestran en la Fig. 3n. para tres primeros modos de vibración y sus correspondientes vectores se enlistan en la Tabla 4.

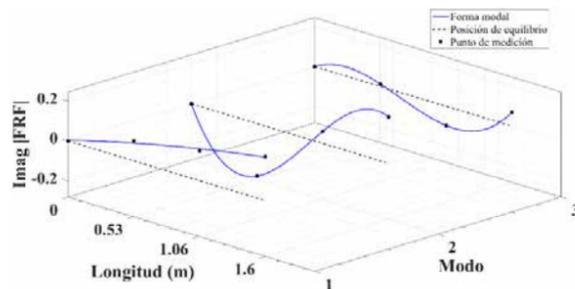


Figura 3n. Trayectorias modales de aleteo para las primeras 3 frecuencias naturales del álabe en el plano de borde.

Tabla 4. Vectores modales normalizados para el plano de borde.

Posición (m)	Modo 1	Modo 2	Modo 3
0	0	0	0
0.53	0.10014	-0.26253	0.01220
1.06	0.14842	0.06143	-0.09649
1.60	0.22065	0.23258	0.06957

4. RESULTADOS

4.1 Resultados experimentales

El Criterio de Garantía Modal (Modal Assurance Criterion) conocida como la matriz MAC es un indicador utilizado para medir el grado de consistencia (lineal) o semejanza entre dos vectores modales (Pastor et. al, 2012). Esta matriz asigna valores 1 a los pares modales de análisis y ensayos que coincidan exactamente y un valor de 0 para aquellos pares completamente independientes o no relacionados y que puedan presentar un problema,

$$MAC_{cdr} = \frac{|\{\psi_{cr}\}^T \{\psi_{dr}^*\}|^2}{\{\psi_{cr}\}^T \{\psi_{cr}\} \{\psi_{dr}^*\}^T \{\psi_{dr}^*\}} \quad (19)$$

ψ_r es el vector modal para el r-ésimo modo, $\{\psi_r\}^T$ denota su transpuesta y * indica el complejo conjugado. Para una matriz AutoMAC $\psi_{cr} = \psi_{dr}^*$.

De la figura 4a se aprecia que los grados de libertad de medición realizados son suficientes para representar estos modos, esto resulta evidente puesto que para tres modos de vibración de un modelo de viga en voladizo existen tres nodos o antiresonancias, sin embargo, para ambos planos de vibración, el tercer modo (44.25 y 244.1 Hz) exhibe acoplamientos diagonales alrededor del 20 % pero no cercanos a 30 %. Esto se debe principalmente a una baja resolución espacial, por lo que se requieren añadir más puntos de medición que proporcionen más espectros FRF para obtener un mejor modelo de deformación para las trayectorias modales.

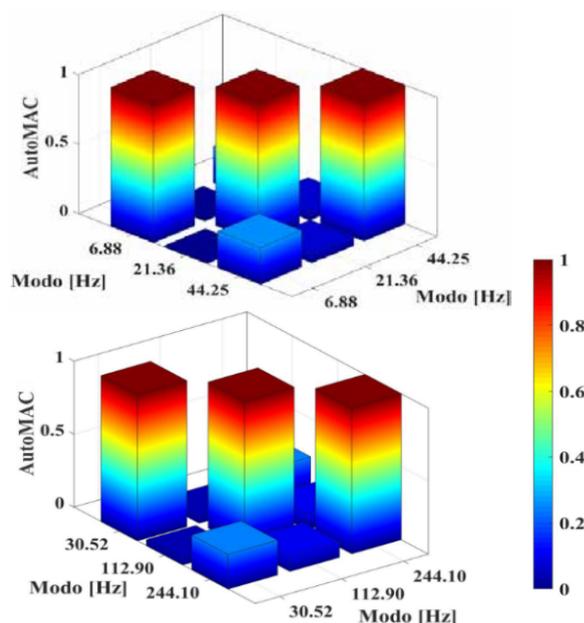


Figura No. 4a. Matriz AutoMAC entre modos experimentales estimados para el plano de aleteo (figura superior) y el plano de borde (figura inferior).

4.2 Simulación numérica

En orden de complementar el estudio del álabe, se desarrolló una simulación numérica en Ansys para la obtención de las frecuencias naturales de vibración por el método de elementos finitos (FEA, Finite Element Analysis).

Los primeros diez modos de vibración se representan en la Figura 4b y puede observarse que el primero, segundo, cuarto, quinto y octavo modo corresponden al plano de aleteo de la Tabla 1, mientras

que, el tercero, sexto y noveno modo corresponden a los modos de vibración de borde de la Tabla 3. Así mismo los modos séptimo y décimo corresponden una contribución modal en torsión.

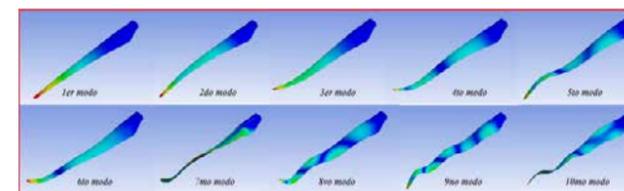


Figura No. 4b. Diez modos de vibración para el álabe FX-63137 obtenidos por FEA en Ansys.

4.3 Comparación de resultados

En la Tabla 5 los modos de vibración numéricos son comparados con el error cuadrático medio RMS con los modos experimentales de las tablas 1 y 3, y con base en las formas de la Figura 4b, cada modo de vibración es clasificado de acuerdo con su contribución modal a la dinámica del álabe.

Tabla 5. Comparación entre resultados experimentales y numéricos.

$f_n(\text{Hz})$ experimental	$f_n(\text{Hz})$ Ansys	$\Delta f_n(\text{Hz})$	Tipo
6.86	6.6145	0.24	aleteo
21.36	18.986	2.37	aleteo
30.51	35.837	5.32	borde
44.25	44.966	0.71	aleteo
80.10	77.037	3.06	aleteo
112.92	107.04	5.88	borde
131.99	123.77	8.22	torsión
177.00	182.56	5.56	aleteo
244.14	226.64	17.50	borde

$\Delta f_{RMS} = 7.32 \text{ Hz}$

5. CONCLUSIONES

Los resultados experimentales obtenidos tras la aplicación del EMA haciendo uso de la técnica de peak picking, coinciden adecuadamente con los resultados numéricos obtenidos con Ansys. Con base en las pequeñas diferencias puede garantizarse que las frecuencias obtenidas experimentalmente hacen referencia a las frecuencias naturales amortiguadas del

sistema, es decir f_{da} , además debe considerarse que los resultados numéricos se extienden desde el punto de vista teórico y es muy difícil que contemple efectos reales durante la disipación de energía cuando el álabe oscila, a menos que el usuario introduzca un valor de amortiguamiento en el software previo a la simulación, mismo que se desconoce y por lo cual se desarrollan los ensayos experimentales.

Por otro lado, extender el ensayo con más acelerómetros reduciría el porcentaje de acoplamiento entre modos de vibración fuera de la diagonal principal de la matriz AutoMAC garantizando una mejor reconstrucción de trayectorias y permitiendo además la reconstrucción de modos de orden superior. Esto puede tratarse con puntos de medición simultáneos en el ensayo o bajo ensayos individuales intercambiando los puntos de excitación a lo largo de la longitud del álabe, lo cual requiere un ensayo más riguroso que garantice una misma fuerza de impacto y un mismo ángulo de aplicación de tal forma que se eviten ruidos, alteraciones y/o inconsistencias en los resultados.

En cuanto a las frecuencias naturales, es notable que para este álabe estudiado su dinámica se ve predominada por frecuencias bajas en comparación al primer modo de torsión que se manifiesta a 131 Hz a diferencia del primer modo natural de 6 Hz. A su vez, esto obedece al concepto de frecuencia natural dado que si la masa aumenta la frecuencia disminuirá aún más, aunque esto dependerá también del tipo de material, principalmente por su rigidez, en este caso específico el álabe es un perfil hueco manufacturado con fibra de vidrio unidireccional.

REFERENCIAS

- Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas (5a Edición)*. Pearson Educación.
- W. T. (1983). *Teoría de vibraciones: aplicaciones* (No. 531 T4Y 1981).
- Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). *Wind energy explained: theory, design and application*. John Wiley & Sons.
- De Silva, C. W. (Ed.). (2007). *Vibration damping, control, and design*. CRC Press
- Avitabile, P. (2017). *Modal testing: a practitioner's*

guide. John Wiley & Sons.

Meruane, V. (2013). *Dinámica Estructural. Apuntes para el curso ME706*. Santiago:

Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Chile.

Fu, Z. F., & He, J. (2001). *Modal analysis*. Elsevier.

Ewins, D. J. (2009). *Modal testing: theory, practice and application*. John Wiley & Sons.

Brandt, A. (2011). *Noise and vibration analysis: signal analysis and experimental procedures*. John Wiley & Sons.

Heylen, W., Lammens, S., & Sas, P. (1997). *Modal analysis theory and testing Vol. 200, No.*

7. Leuven, Belgium: Katholieke Universiteit Leuven.

Kerschen, G. (Ed.). (2016). *Nonlinear Dynamics, Volume 1: Proceedings of the 34rd IMAC, A Conference and Exposition on Structural Dynamics, 2015*. Springer.

IEC-International Electrotechnical Commission. (2014). *Full-scale structural testing of rotor blades*. IEC 61400-23.

Trujillo-Franco, L. G., Abundis-Fong, H. F., Campos-Amezcuca, R., Gomez-Martinez, R., Martinez-Perez, A. I., & Campos-Amezcuca, A. (2021). *Single Output and Algebraic Modal Parameters Identification of a Wind Turbine*

Blade: Experimental Results. Applied Sciences, 11(7), 3016. DOI: <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/7/3016>

Reynders, E, De Roeck, G (2007). *Reference-based combined deterministic–stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis*. Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 22, 617-67. DOI: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2008MSSP...22..617R/doi:10.1016/j.ymsp.2007.09.004

Spilsbury, M. J., & Euceda, A. (2016). *Transformada Rápida de Fourier*. Revista de la Escuela de Física, 4(2), 45-52. DOI:<http://dx.doi.org/10.5377/ref.v4i2.8276>

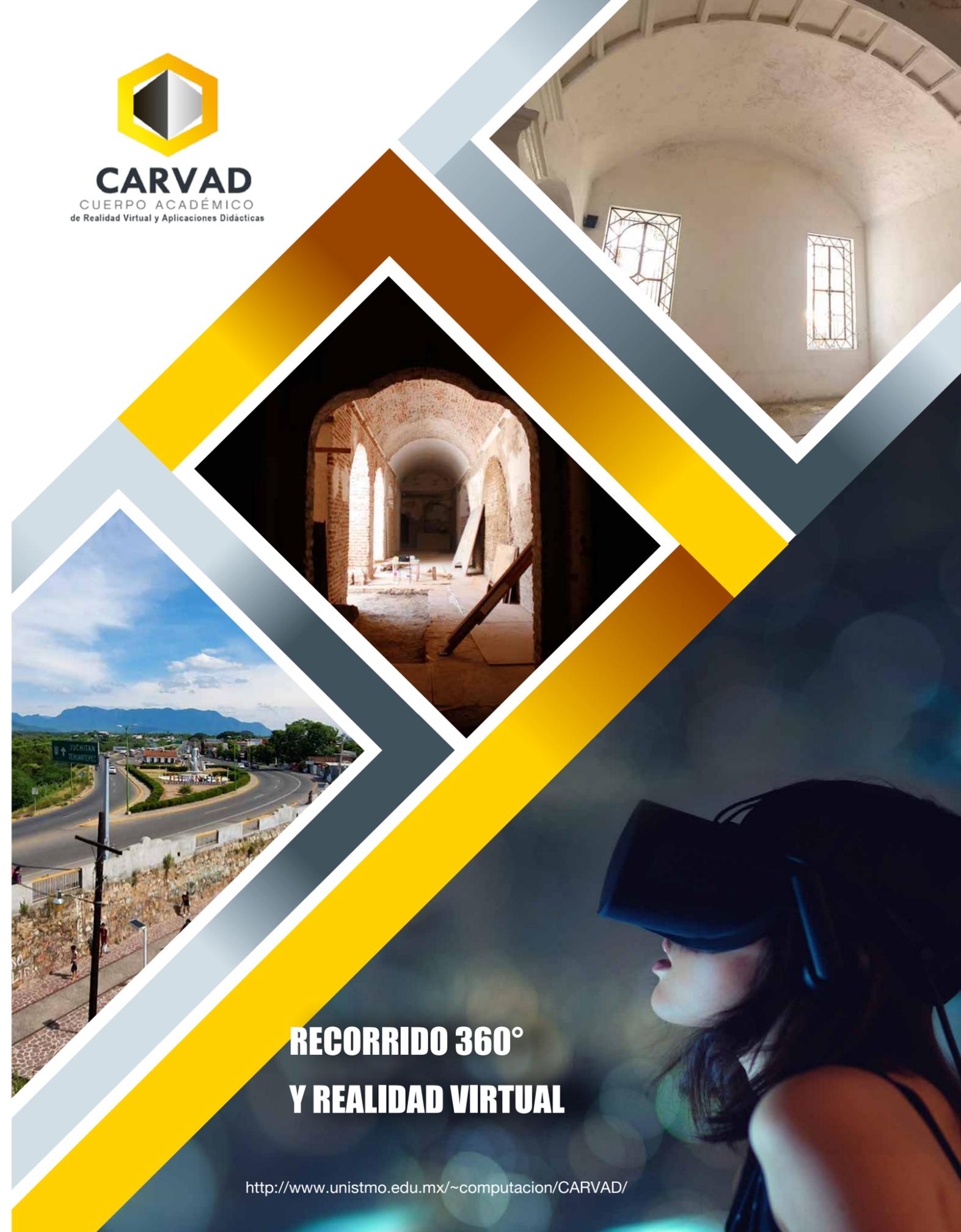
Pastor, M., Binda, M., & Harčarik, T. (2012). Modal assurance criterion. Procedia Engineering, 48, 543-548. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.09.551>

Allemang, R. J. (2003). *The modal assurance criterion—twenty years of use and abuse*. Sound and vibration, 37(8), 14-23.

Mohammad F. (2021). *Modal Assurance Criterion(MAC)*. (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/53173-modal-assurance-criterion-mac>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved September 13, 2021



CARVAD
CUERPO ACADÉMICO
de Realidad Virtual y Aplicaciones Didácticas



**RECORRIDO 360°
Y REALIDAD VIRTUAL**



SCAPS: simulación de celdas solares de CdTe bajo diferentes condiciones de trabajo

RESUMEN

En este trabajo se presenta la simulación numérica de una celda solar de Teluro de Cadmio (CdTe) con la siguiente configuración CdTe/CdS/SnO₂ utilizando el software SCAPS. Se presentan generalidades y el proceso a realizar para llevar a cabo dicha simulación. En este estudio teórico se simuló (curva J-V y EQE) en primera instancia la celda de CdTe a condiciones estándar. Posteriormente, se realizó la simulación con diferentes masas de aire (0 y 1.5), irradiancias (200-1000 W/m²) y temperaturas de operación (295-310 K). En todas ellas se analizan detalles teóricos estudiando el impacto de estas sobre el desempeño (parámetros de salidas) de la celda solar de CdTe.

ABSTRACT

In this work is presented the numerical simulation of a Cadmium Telluride (CdTe) solar cell with the following CdTe/CdS/SnO₂ configuration using SCAPS software. Generalities and the process to carry out this simulation are presented. In this theoretical study, the CdTe solar cell was simulated (J-V and EQE curve) at standard conditions. Subsequently, the simulation was carried out with different air masses (0 and 1.5), irradiancias (200-1000 W/m²), and operating temperatures (295-310 K). Theoretical details are analyzed, studying the impact of these on the performance (output parameters) of the CdTe solar cell.

Palabras clave: CdTe, SCAPS, Simulación, Celdas solares

Alan A. Pérez-Orozco^a, Diego A. Liña-Martínez^a, Hugo J. Cortina Marrero^a, Maykel Courel^b, Isaac Montoya De Los Santos^{a,*}

^a Instituto de Estudios de la Energía, Universidad del Istmo, C.P. 70760, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México

^b Centro Universitario de los Valles, Universidad de Guadalajara. C.P. 46600, Ameca Jalisco, México

e-mail: isaacms88@gmail.com

Vista del Parque Solar
Unistmo 2022
Foto: Patricia Luna.

1. INTRODUCCIÓN

En 1940, durante la segunda guerra mundial, los científicos Von Neuman y Ulam trabajaban en el proyecto Monte Carlo lograron resolver problemas complejos utilizando modelos de simulación. Estos problemas no podrían haber sido resueltos por experimentación (sería muy costoso), o mediante análisis matemático (sería muy complicado). De allí deriva la importancia de la simulación. (Bu, 2005)

Actualmente, se ha podido aprovechar la velocidad de los sistemas de cómputo por lo que han surgido nuevas aplicaciones que a su vez han dado paso a nuevos problemas, en los campos de la administración de negocios, la economía, la investigación de operaciones, los sistemas de producción, entre otros. Observamos la importancia de la simulación pues ésta nos permite conocer mejor un sistema estudiado, ya que analiza diferentes escenarios considerando múltiples variables a través del tiempo.

Los estudios teóricos permiten optimizar tiempo y costo a procesos experimentales. Además, permiten interpretar las mediciones avanzadas en estructuras complejas, el diseño y la optimización de celdas solares, así como predecir los parámetros óptimos que contribuyen a la fabricación de una celda con el mejor rendimiento. Existen distintas herramientas (softwares) de simulación de celdas solares como: Silvaco Atlas, AMPS y SCAPS. Este último permite analizar hasta siete capas de diferentes materiales, obteniendo resultados como: curva I-V (corriente-voltaje), C-V (capacitancia-voltaje), EQE (eficiencia cuántica externa), entre otras. También, permite obtener el campo eléctrico, los diagramas de bandas, las densidades de portadores corrientes parciales de recombinación. El estudio teórico mediante la simulación numérica es importante, pues ésta nos permite conocer mejor un sistema estudiado, ya que analiza diferentes escenarios considerando múltiples variables a través del tiempo. SCAPS (Simulador de Capacitancia de Celdas Solares) es un simulador de celdas solares, desarrollado en ELIS, Universidad de

Gent, que está disponible de forma libre para la comunidad científica.

Aunque en primera instancia este software fue diseñado para materiales como el CdTe y CIGS también se ha utilizado con Silicio, Perovskita, Sulfuro de Antimonio entre otros. Se ha utilizado para el diseño, validación y optimización de celdas solares. (Mandadapu et al., 2018), (Kumar et al., 2020) (Rai et al., 2020), (Mouchou et al., 2021), (Aseena et al., 2021), (Mostefaoui et al., 2015), (Heriche et al., 2017), (Karthick et al., 2020), (Burgelman, Marlein, 2008), (Gohri et al., 2021),

En este trabajo se presenta la simulación teórica de una celda solar de CdTe. No obstante, se analizan diversos efectos (que considera SCAPS) como la capacidad de absorción mediante la eficiencia cuántica externa y el análisis del efecto de diferentes condiciones de trabajo como la distribución espectral, irradiancia y la temperatura.

2. METODOLOGÍA

La celda simulada por SCAPS tiene la siguiente configuración: CdTe/CdS/SnO₂. Las propiedades de los materiales se obtuvieron de las siguientes referencias. (Gloeckler et al., 2003), (Aramoto et al., 1997), (Huang, Chuang., 2015).

Las simulaciones fueron realizadas bajo condiciones estándar: irradiancia (1000 W/m²), espectro solar (AM 1.5G) y temperatura (300 K). El esquema de la configuración de la celda solar de CdTe es presentada en la Fig. 1a. Por otro lado, el desarrollo empleado para las simulaciones a través del software se puede resumir de manera general en seis etapas, las cuales se muestran en el diagrama de la Fig. 1b.

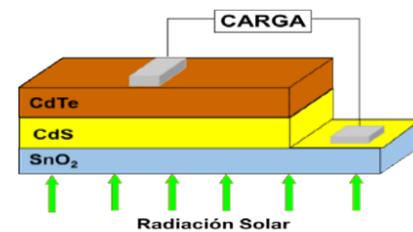


Fig. 1a. Configuración de la celda de CdTe simulada por SCAPS.



Fig. 1b. Proceso de desarrollo de simulación por SCAPS.

2.1 Detalles teóricos

El software SCAPS es capaz de resolver las ecuaciones fundamentales de semiconductores, la ecuación de Poisson y las ecuaciones de continuidad para electrones y huecos y la ecuación de deriva, las cuales se describen detalladamente a continuación. (Neamen, 2003) (Neamen, 2003)

Ecuación de Poisson.

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon} = \frac{q}{\epsilon} p(x) - n(x) - N_{A^+} + N_{D^-} \quad (1)$$

dónde E es el campo eléctrico, ρ es la densidad de carga y ϵ es la permitividad del material. Esta ecuación da la relación básica entre la carga y la intensidad del campo eléctrico. En los semiconductores dividimos la carga en cuatro componentes: densidad de huecos, p , de densidad de electrones, n , densidad de los átomos aceptores, N_{A^+} y densidad de los átomos donadores, N_{D^-} .

Para la derivación diodo ideal, N_{A^+} se supone constante en la región p y cero en la región n . Del mismo modo, N_{D^-} se supone constante en la región n y cero en la región p .

Ecuaciones de transporte

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n \frac{dn}{dx} \quad (2)$$

$$J_p = q\mu_p pE + qD_p \frac{dp}{dx} \quad (3)$$

Dónde J_n es la densidad de corriente de electrones μ_n la movilidad de electrones y D_n es la difusividad de electrones. Del mismo modo, J_p es la densidad de corriente de huecos, μ_p es la movilidad de huecos y D_p es la difusividad de huecos. q es la carga electrónica y E es el campo eléctrico

Las ecuaciones de transporte describen cómo los portadores se mueven, es decir, el flujo de portadores o corriente. Es más fácil de utilizar la densidad de corriente, J , en A/cm².

El primer término de cada ecuación es por el arrastre y el segundo término es por la difusión.

Ecuación de continuidad

La tasa de recombinación para huecos viene dada por $\frac{p}{\tau_{pt}}$ donde τ_{pt} incluye la vida útil del portador en equilibrio térmico y la vida útil del portador en exceso. Y para electrones, viene dada por $\frac{n}{\tau_{nt}}$, donde τ_{nt} incluye la vida útil del portador en equilibrio térmico.

Donde F_n^- es el flujo electrón-partícula, o flujo, también expresado *número de electrones/cm² - s*. Y F_p^+ es el flujo de huecos- partículas.

$$\frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial F_p^+}{\partial x} + g_p - \frac{p}{\tau_{pt}} \quad (4)$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\frac{\partial F_n^-}{\partial x} + g_n - \frac{n}{\tau_{nt}} \quad (5)$$

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las celdas solares deben ser fabricadas bajo ciertos estándares de calidad con la finalidad de que garanticen su óptimo funcionamiento antes de salir al mercado. La curva J-V de la celda solar de CdTe simulada bajo estas características se puede observar en la Fig. 2a. De igual forma, su eficiencia cuántica externa se presenta en la Fig. 2b.

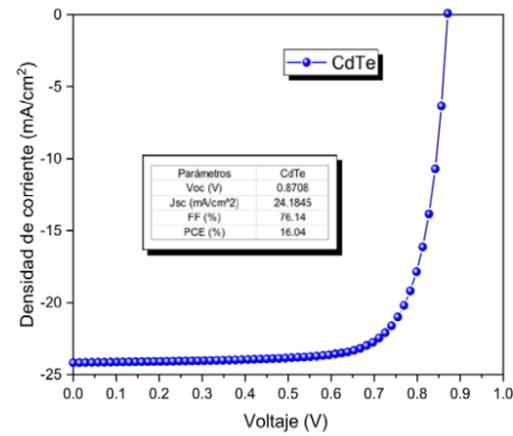


Fig. 2a. Curva J-V de celda solar de CdTe simulada por SCAPS.

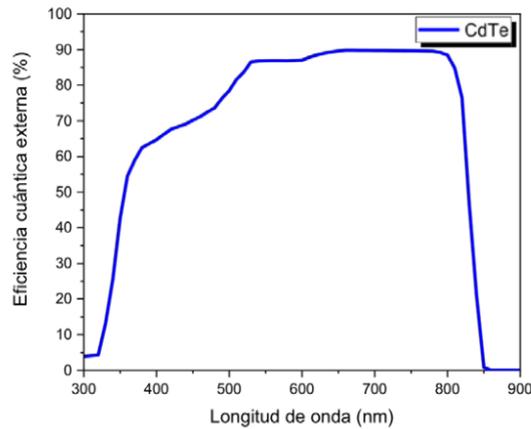


Fig. 2b. Eficiencia cuántica externa de celda solar de CdTe simulada por SCAPS.

3.1 Efecto del espectro solar en el desempeño de la celda solar

La masa de aire (AM) es la longitud del camino tomado por la luz a través de la atmósfera normalizado a la ruta más corta posible (es decir, cuando el sol está directamente vertical). La masa de aire cuantifica la reducción en la potencia de la luz a medida que pasa a través de la atmósfera y es absorbido por el aire y el polvo. La masa de aire se define como:

$$AM = \frac{1}{\cos \theta}$$

Dónde θ es el ángulo de la vertical (ángulo cenital). Cuando el sol está directamente vertical, la masa de aire es 1. (Sze & Nge, 2007)

La eficiencia de una celda solar es sensible a las variaciones en la potencia y el espectro de la luz incidente. Para facilitar una comparación exacta entre las celdas solares medidas en diferentes momentos y lugares, se ha definido una densidad del espectro y la potencia estándar tanto para la radiación fuera de la atmósfera de la Tierra como para la superficie de la Tierra. El espectro estándar en la superficie de la Tierra se llama AM1.5G, (la G significa mundial e incluye la radiación directa y difusa) o AM1.5D (que incluye sólo la radiación directa). La intensidad de la radiación AM1.5D se puede aproximar mediante la reducción del espectro AM0 en un 28% (18% debido a la absorción y el 10% a la dispersión). (Riordan & Hulstron, 1990)

El espectro global es 10% más alto que el espectro directo. Estos cálculos dan aproximadamente 970 W/m² para AM1.5 G. Sin embargo, el espectro AM1.5G estándar ha sido normalizado para dar 1000 W/m² debido a la conveniencia de un número redondo y el hecho de que haya variaciones inherentes en la radiación solar incidente. El espectro estándar fuera de la atmósfera de la Tierra se llama AM0, porque en ningún momento la luz pasa a través de la atmósfera. Este espectro se utiliza típicamente para predecir el rendimiento esperado de las celdas en el espacio.

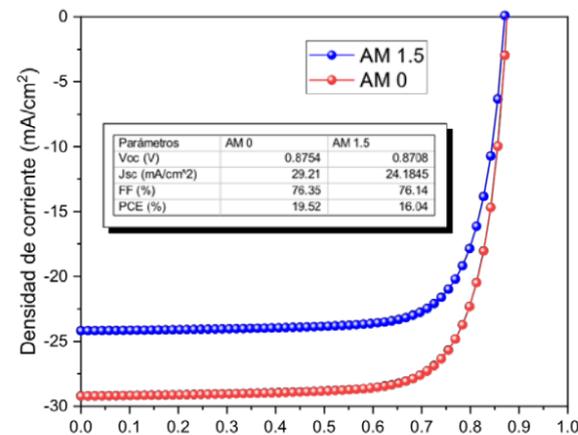


Fig. 3. Curva J-V de celda solar de CdTe simulada a diferentes espectros: AM0 y AM1.5.

En la Fig. 3 se presenta el efecto de diferentes distribuciones espectrales considerando AM0 y AM 1.5G en el desempeño de las celdas solares. En las curvas J-V se observa un incremento en todos los parámetros de salida en la celda simulada a AM0. Esto, es atribuido a la mayor captación de fotones ya que no se consideran pérdidas atmosféricas. El potencial energético a una AM0 es la constante solar con un valor de 1367 W/m². Por otro lado, se observa claramente un incremento en la eficiencia de un 16.04 a un 19.52 %.

3.2 El efecto de la irradiancia o iluminación solar en el desempeño de la celda solar

En la práctica las celdas solares no operan bajo estrictamente bajo condiciones de certificación estándar. Esto es debido a diversos factores que dificultan su desempeño. Los parámetros de mayor influencia sobre la curva I-V de una celda fotovoltaica serán la irradiancia y la temperatura. Por un lado, dado que la corriente de cargas generadas a partir de la irradiancia es proporcional al flujo de fotones con energía superior a la banda prohibida (E_g), la corriente de cortocircuito (I_{sc}) de una celda solar es directamente proporcional a la intensidad de la iluminación incidente. Ante un determinado aumento o disminución porcentual de la iluminación, la (I_{sc}) se ve modificada con un incremento similar en el mismo sentido, como se observa en la figura 4. En cambio, el voltaje en circuito abierto (V_{oc}) no experimenta grandes variaciones al modificarse las condiciones de la irradiancia.

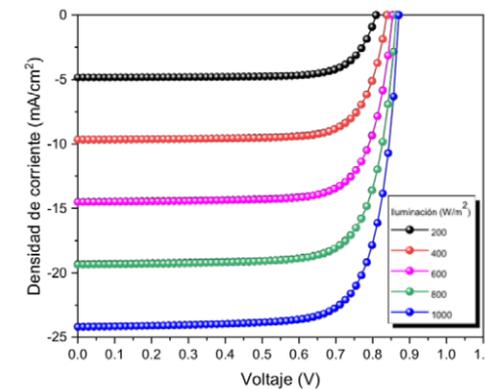


Fig. 4. Curvas J-V celda solar de CdTe simulada a diferente iluminación (200-1000 W/m²)

Los parámetros de salida obtenidos de las de las simulaciones con la variación de irradiancia se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de salida a diferente iluminación (200-1000 W/m²)

Irradiancia (W/m ²)	Parámetros de salida			
	V _{oc} (V)	J _{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
200	0.8091	4.83	75.95	14.86
400	0.8386	9.67	76.01	15.41
600	0.8543	14.50	76.02	15.71
800	0.8640	19.34	76.08	15.90
1000	0.8708	24.18	76.14	16.04

3.3 El efecto de la temperatura en el desempeño de la celda solar

Dado que la temperatura de funcionamiento de las celdas solares en situaciones de operación puede variar mucho, es necesario comprender el efecto de la temperatura en el rendimiento.

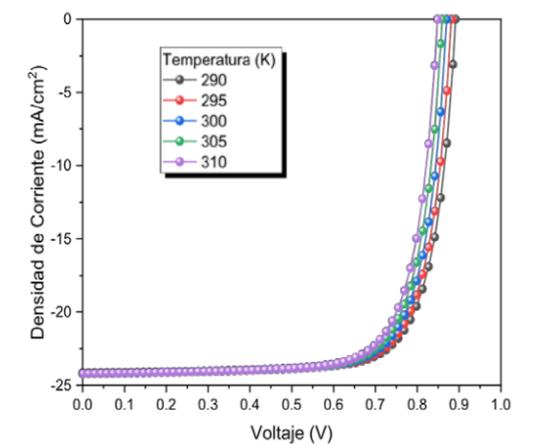


Fig. 5. Curvas J-V celda solar de CdTe simulada a diferentes temperaturas de operación (290-310 K).

En la tabla 2, se presentan los parámetros obtenidos de las celdas solares de CdTe con la variación de temperatura.

Tabla 2. Parámetros de salida a diferentes temperaturas (290-310 K).

Temp. (K)	Parámetros de salida			
	V_{oc} (V)	J_{sc} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
290	0.8916	24.18	76.37	16.47
295	0.8814	24.18	76.28	16.26
300	0.8708	24.18	76.14	16.04
305	0.8597	24.18	76.00	15.80
310	0.8483	24.18	75.84	15.56

En la figura 5 se presenta el efecto de la variación de temperatura de operación en el desempeño de las celdas solares de CdTe. Se observa que la corriente de cortocircuito (I_{sc}) de las celdas solares no depende mucho de la temperatura. Esta tiende a aumentar ligeramente con el incremento de la temperatura. Esto se puede atribuir al aumento de la absorción de la luz, ya que la banda prohibida del semiconductor suele disminuir con la temperatura. Los otros parámetros característicos de la celda, el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y el factor de forma (FF), disminuyen.

La relación entre la corriente de cortocircuito y la tensión de circuito abierto es

$$I_{sc} = I_0(e^{qV_{oc}/kT} - 1) \quad (6)$$

Sin tener en cuenta el pequeño término negativo, se puede escribir como

$$I_{sc} = AT^\gamma e^{-E_{g0}/kT} e^{qV_{oc}/kT} \quad (7)$$

donde A es independiente de la temperatura, E_{g0} es la banda prohibida de temperatura cero extrapolada

linealmente del semiconductor que compone la celda, e incluye las dependencias de los restantes parámetros que determinan I_0 . Sus valores se sitúan generalmente en el rango de 1 a 4. Si se diferencia, se obtendrá con $V_{g0} = E_{g0}/q$,

$$\frac{dI_{sc}}{dT} = AT^{\gamma-1} e^{q(V_{oc}-V_{g0})/kT} + AT^\gamma \left(\frac{q}{kT}\right) \left[\frac{dV_{oc}}{dT} - \left(\frac{V_{oc}-V_{g0}}{T}\right)\right] e^{q(V_{oc}-V_{g0})/kT} \quad (8)$$

Despreciando $\frac{dI_{sc}}{dT}$ frente a los términos más significativos se obtiene la expresión:

$$\frac{dV_{oc}}{dT} = \frac{V_{g0}-V_{oc}+\gamma(kT/q)}{T} \quad (9)$$

Esto predice una disminución aproximadamente lineal del V_{oc} con el aumento de la temperatura. El FF ideal depende del valor de V_{oc} normalizado a kT/q . Por lo tanto, el factor de forma disminuye al aumentar la temperatura.

La variación dominante es la de V_{oc} . Esto hace que la potencia y eficiencia (PCE) disminuyan con el aumento de la temperatura. No obstante, esta variación de dependencia se reduce para un material de mayor banda prohibida.

4. CONCLUSIONES

En conclusión, se presentó la importancia del estudio teórico y su posible aportación al área experimental. En este sentido, se obtuvieron curvas J-V y EQE simuladas por SCAPS muy aproximadas a las experimentales. Por otro lado, se realizaron simulaciones considerando diferentes condiciones de operación (espectro solar, irradiancia o iluminación y la temperatura) de una celda solar de CdTe. Se demostró el impacto de estos factores que a términos prácticos se relacionan con situaciones reales como el efecto por obstrucciones del espectro solar (sombras por nubes o demás gases). Esto implica que, a mayor captación del recurso solar, mayor probabilidad de incrementar el desempeño en las celdas solares es posible. El efecto del clima según la zona geográfica (temperatura), de lo

cual predecimos que a una temperatura menor de 300 K (25°C) el desempeño aumentaría. Sin embargo, para zonas geográficas con relativas altas temperaturas, este comportamiento se vería afectado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Dr. Marc Burgelman de la Universidad de Gent, por proporcionar el software de simulación SCAPS.

REFERENCIAS

- Aramoto, T. K. (1997). 16.0% efficient thin-film CdS/CdTe solar cells. 36(10R), 6304. *Japanese Journal of Applied Physics*, 36(10 R), 6304-6305. doi:https://doi.org/10.1143/jjap.36.6304
- Aseena, S. A. (2021). Optimization of the layer thickness of ZnO based perovskite solar cells using SCAPS 1D. . *Materials Today: Proceedings*, 43, 3432-3437. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.077
- Bu, R. C. (2005). *Simulación: un enfoque práctico*. . Limusa .
- Burgelman, M. &. (2008). *Analysis of graded bandgap solar cells with SCAPS*. In *Proc. Of the 23rd Eur. Photovolt. Sol. Energy Conf., Valencia*.
- Gloeckler, M. F.-4. (2003). Numerical modeling of CIGS and CdTe solar cells: setting the baseline. *3rd World Conference on photovoltaic Energy Conversion, Proceedings of*, 1, págs. 491-494.
- Gohri, S. M. (2021). Performance Analysis for SnS-and Sn2S3-Based Back Surface Field CZTSSe Solar Cell: A Simulation Study. *Journal of Electronic Materials*, 50(11), 50, 6318-6328. doi:https://doi.org/10.1007/s11664-021-09152-8
- Heriche, H. R. (2017). New ultra-thin CIGS structure solar cells using SCAPS simulation program. . *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(15), 42(15), 9524-9532. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.099
- Huang, C. H. (2015). Dependence of performance parameters of CdTe solar cells on semiconductor properties studied by using SCAPS-1D. . *Vacuum*,

- 118, 32-37. doi:https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.03.008
- Karthick, S. V. (2020). Experimental and SCAPS simulated formamidinium perovskite solar cells: A comparison of device performance. *Solar Energy*, 205, 349-357. doi:https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.05.041
- Kumar, M. R. (2020). An optimized lead-free formamidinium Sn-based perovskite solar cell design for high power conversion efficiency by SCAPS simulation. . *Optical Materials*, 108, 1-7. doi:https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110213
- Mandadapu, U. V. (2018). Optimization of high efficiency tin halide perovskite solar cells using SCAPS-1D. *Int. J. Simulation and Process Modelling*, 221- 227., 13(3), 221- 227. doi:10.1504/IJSPM.2018.093097
- Mostefaoui, M. M. (2015). Simulation of high-efficiency CIGS solar cells with SCAPS-1D software. *Energy Procedia*, 74, 736-744. doi:https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.809
- Mouchou, R. T. (2021). Numerical simulation and optimization of p-NiO/n-TiO2 solar cell system using SCAPS. . *Materials Today: Proceedings*, 38, 835-841. doi:https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.880
- Neamen, D. A. (2003). Solar cells. En D. A. Neamen, *Semiconductor physics and devices: basic principles* (págs. 624-632). McGraw-hill.
- Rai, S. P. (2020.). Modeling of highly efficient and low-cost CH3NH3Pb(I1-xClx)3 based perovskite solar cell by numerical simulation". *Optical Material*, 100, 1-8. doi:https://doi.org/10.1016/j.optmat.2019.109631
- Riordan, C. &. (1990). What is an air mass 1.5 spectrum? (solar cell performance calculations). In *IEEE Conference on Photovoltaic Specialists*, (págs. 1085-1088).
- Sze, S. M. (2007). *Physics of semiconductor devices*. John Wiley & sons. John Wiley & sons.



Vista general del conjunto conventual. 2017.
Foto: Patricia Luna.

UN RETABLO PICTÓRICO

EN LA SALA DE PROFUNDIS DEL CONVENTO

DE JALAPA DEL MARQUÉS, OAX.

RESUMEN

El antiguo pueblo zapoteca de Jalapa del Marqués fue trasladado al lugar actual en 1961 al anegarse la presa de riego “Benito Juárez”. En ese mismo año se inició el proceso de salvamento de pinturas murales y otros bienes muebles que albergaba su convento dominico. Durante la labor de localización de las pinturas que realizamos recientemente apreciamos que cuatro de ellos formaban parte de un retablo pictórico de estilo renacentista del Siglo XVI, de la Sala de Profundis. Este artículo ofrece la ubicación y análisis iconográfico de dicho retablo pictórico actualmente seccionado, en base a fotos anteriores a 1961, y evidencias fotográficas actuales de lo que se conserva de él, para su debido reconocimiento y conservación en todo su significado histórico y cultural.

ABSTRACT

The old Zapotec town of Jalapa del Marqués was transferred to the current place in 1961 when the “Benito Juárez” irrigation dam was flooded. A process of salvaging mural paintings and other movable property that housed its Dominican convent began. During the work of localizing the paintings we made recently we appreciated that four of them were part of a pictorial altarpiece of Renaissance style of the sixteenth century, of the Hall of Profundis. This article offers the location and iconographic analysis of said pictorial altarpiece currently sectioned, based on photos prior to 1961, and current photographic evidence of what is preserved of it, for its due recognition and conservation in all its historical and cultural significance.

Palabras clave: Pintura mural, Siglo XVI, convento dominico, Jalapa del Marqués.

M. H. A. Martha Lis Garrido Cardona *,^a

^a Ingeniería de Petróleos, Universidad del Istmo,
Santo Domingo Tehuantepec, Oax.

e-mail: garridomartha@sandunga.unistmo.edu.mx

1. INTRODUCCIÓN

El antiguo pueblo zapoteca de Jalapa del Marqués, que en tiempos coloniales perteneció al Marqués del Valle Don Hernán Cortés y descendientes, ante la inminente anegación de la recién construida presa “Benito Juárez” fue trasladado al lugar que ocupa actualmente en 1961, en el Km. 17 de la carretera Tehuantepec-Oaxaca. Al saberse que sería inundado su convento del siglo XVI, el gobierno mexicano, por medio del INAH, inició un proceso de salvamento de pinturas murales y otros bienes muebles que allí se encontraban.

Entre ellos estaban los fragmentos del retablo pictórico mural de la Sala de Profundis, tema medular de este estudio que ofrece la ubicación y análisis iconográfico de dicho retablo pictórico actualmente seccionado, en base a los inventarios documentales, fotos anteriores a 1961 y evidencias fotográficas actuales de lo que se conserva de él, con el fin de contar con una herramienta útil para su debido reconocimiento y conservación en todo su significado histórico, como patrimonio cultural.

Para apreciar la importancia regional de este pueblo de Jalapa, hemos incluido primeramente un recorrido por la historia de dicho lugar y algunas noticias de la fundación y construcción del convento dominico dados por los cronistas y visitantes en la época colonial.

Además de insertar también información del proceso de salvaguarda de los bienes muebles que realizó la, entonces, Dirección de Monumentos Coloniales, actual Coordinación Nacional de Monumentos Históricos del INAH, poco antes de la anegación del pueblo por las aguas de la Presa Benito Juárez.

A su vez, realizamos una revisión del

material fotográfico que se encuentra en el acervo de la Fototeca de la Coordinación mencionada, para reconstruir su condición original en el momento del traslado. Y por último analizamos iconográficamente las figuras del retablo pictórico para entender el sentido religioso y didáctico con que fue creado.

La conservación de nuestro patrimonio cultural está en nuestras manos, para ello es necesario conocerlo y valorarlo en toda su importancia histórica y artística.

2. HISTORIA Y ANÁLISIS DE LOS FRAGMENTOS DEL RETABLO PICTÓRICO

Historia del convento de Jalapa del Marqués

El Valle de Jalapa del Marqués ha destacado por la fertilidad de sus tierras, ya que se encuentra en la confluencia de dos ríos, el Tehuantepec y el Tequisistlán, lo cual ha hecho que a través de la historia sea deseada por sus condiciones óptimas para vivir y trabajar la tierra, incluso desde tiempos prehispánicos. Se han encontrado vestigios muy antiguos de asentamientos humanos, aldeas sedentarias y agrícolas, a partir del Pre-clásico Temprano (1,500 a.C.) hasta el Postclásico Tardío (1521 d.C.) (Winter et al, 2008, p. 230).

Se menciona en algunos códices y crónicas del siglo XVI como el primer poblado que conquistan los zapotecas a su llegada al Istmo de Tehuantepec provenientes de Zaachila o Theozapotlán a finales del S. XIV (Un ejemplo es el Lienzo de Guevea que se puede consultar en De la Cruz, V. 2008). Y en este lugar muere Pinopià, la tercera hija del Rey Cosijoeza, doncella virgen a quien después veneraron como una deidad de

su religión ancestral en un culto sincrético (Burgoa, F. 1934 p. 363).

En el momento de la conquista española, aunque en la región del Istmo fue pacífica, el pueblo de Xalapa se resistió y ofreció guerra a Pedro de Alvarado, quien finalmente los vence. (Acuña R., 1984), y el pueblo le es dado en encomienda en 1522. (Ramírez, J.F., 1847, p. 213)

Posteriormente, en 1531 la Real Audiencia de México, por merced de su Majestad, entrega en posesión a Hernán Cortés, Marqués del Valle, “los pueblos de Tehuantepec e Xalapa, cabeceras con sus aldeas, sujetos, términos y jurisdicción.” (AGN, Hospital de Jesús, Vol. 123, exp. 17, p. 1-3) El señorío le fue concedido como pago a su labor en la conquista de estas tierras, incluyendo la pertenencia de estos dos pueblos y sus jurisdicciones al Marqués del Valle, permaneciendo Jalapa en este territorio hasta 1810 (García Martínez, 1969, p. 87).

Los evangelizadores de la región istmeña, según cronistas (Dávila Padilla, 1596), fueron los frailes de la orden de Santo Domingo, llegando los primeros a la villa de Tehuantepec en 1538. Jalapa no tardó en ser evangelizado, como visita de éste, y posteriormente se inicia la construcción de una casa o convento propio, el cual fue aceptado oficialmente en enero de 1558 como Casa de Xalapa, con Santa María como patrona y con frailes asignados, dentro de la Provincia de Santiago de México del Orden de Predicadores (Mullen R.J. 1975, p. 235).

La primera mención del tipo de construcción que había es de 1567, año en que

el Padre Fray Alonso Ponce pasa por este lugar, de regreso de su recorrido por las provincias de su ministerio en Nueva España, y dice estar construido un convento habitable similar al conocido de cal y canto. (Ciudad Real, A. de, 1967, p. 49)

Para 1597 la de Jalapa era una de las diez casas más importantes de la provincia dominica, y había de ordinario dos religiosos. En este año, la iglesia y monasterio eran de ladrillo. (A.G. Indias. México 357)

En 1670, el padre dominico Fray Francisco de Burgoa publicó la “Geográfica Descripción” y titula el capítulo LXXI: “De la Casa de Xalapa y de su administración y Doctrina”, reconociéndola como una de las casas más importantes de la zona de Tehuantepec, destacando primeramente la fertilidad y belleza de la zona y que es parte del Señorío que el Rey le dio a Hernán Cortés como merced por sus servicios a la Corona. (Burgoa, 1934, p. 361).

Menciona que Jalapa tenía Alcalde Mayor, que administraba y cuidaba las estancias de ganado cercanas (Ídem. P. 361V), esto le daba cierta independencia de la Alcaldía Mayor de Tehuantepec.

En el Siglo XVIII, hacia 1740, las haciendas de ganado mayor en Jalapa alcanzan su mayor prosperidad contando con 8,212 cabezas de ganado en total (García Martínez, 1969, p. 87). Para 1790, la población total del pueblo era de 410 personas, entre indios y mulatos y algunos españoles, y sus habitantes se dedicaban a la siembra del añil y a tejer algodón para hacer mantas y huipiles para uso propio, además de prestar servicio personal en las haciendas

SE HAN ENCONTRADO VESTIGIOS MUY ANTIGUOS

marquesanas. (AGN, Hospital de Jesús, vol. 298. Exp. 6 1790; Citado por Laura Machuca en Comercio de sal...2007)

Es hasta 1810 en que se disuelve el Señorío de Cortés, que Jalapa y sus haciendas pasan a poder de la Corona (García Martínez, 1969, p. 87). En 1859 se aplicó la Ley de Desamortización de los bienes del clero, expedida por el presidente Juárez, quedando a disposición del gobierno los conventos de Oaxaca, el de Jalapa del Marqués no fue la excepción (Esparza, M. 2008. P. 243).

El conjunto conventual, siguiendo el esquema de estas construcciones del S. XVI, estaba compuesto por la iglesia para españoles, la capilla abierta para los naturales, y el convento donde residían los frailes. Era de grandes proporciones, aspecto pesado y achaparrado, construido de piedra y ladrillo. (Fig. 1)

La imponente iglesia de nave rectangular orientada de oriente a poniente siguiendo la costumbre, tenía una fachada principal sencilla, manierista, anidada por un gran nicho.

El claustro conventual, cuadrangular, está adosado al lado noreste de la iglesia, en forma similar al de Tehuantepec. (Garrido M.L., 1995) Se accedía a él por dos pequeños arcos de medio punto, junto a la capilla abierta, y constaba de un solo piso con una serie de habitaciones a su alrededor adaptadas a las necesidades de la vida conventual. Así, en el lado oriente se ubicaron las celdas de los frailes; En los lados norte y occidente estaban los recintos dedicados a refectorio, biblioteca, cocina, huerta y otras dependencias; y, por último, en el lado sur estaban los accesos a la Sala de Profundis, y a la sacristía o parte trasera del templo principal.

La Sala de Profundis, llamada en un primer momento iglesia primitiva o capilla doméstica ubicada en la parte de atrás de la iglesia (Fig. 2), era un espacio rectangular exclusivo para el culto y meditación de los frailes que residían en la casa o convento pues su único acceso se ubicaba, como ya mencionamos, en el lado sur del claustro conventual.



Figura 1. Vista general del conjunto conventual. 2016. Foto: Patricia Luna.

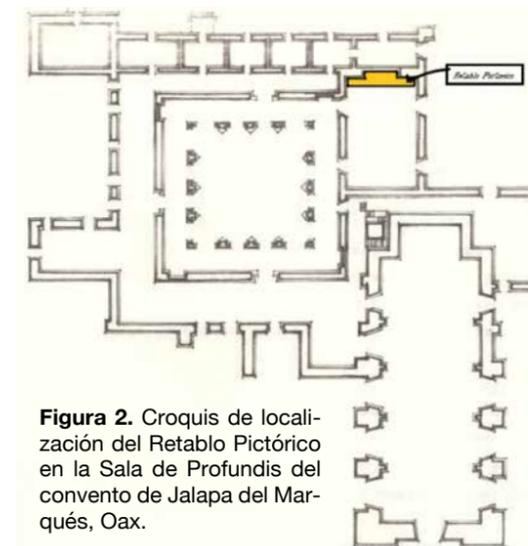


Figura 2. Croquis de localización del Retablo Pictórico en la Sala de Profundis del convento de Jalapa del Marqués, Oax.

Medidas de salvaguarda antes de la anegación de la presa

Como mencionamos al principio de este escrito, el pueblo de Jalapa tenía todo para ser un pueblo próspero en el área agrícola y ganadera ya que se hallaba en tierras fértiles y en el punto de convergencia de dos ríos. Sin embargo, es por esta misma situación que se contempló la construcción de una presa hidráulica, la "Benito Juárez", complemento de la zona de riego del Distrito número 19. Este proyecto se inició a fines de 1957 y se concluyó en 1961 (Maldonado y Mendoza, 2008). En abril de ese último año los pobladores recibieron el orden de abandonar el lugar y trasladarse al nuevo predio en que actualmente se encuentra la cabecera municipal.

Por ello surgió la preocupación por salvaguardar el patrimonio colonial del pueblo de parte de autoridades locales, por lo que se solicita al Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH), desde 1956, se envíen peritos para guardar el pueblo de Jalapa y su convento dominico (A. Geográfico INAH. Exp. Jalapa del Marqués, Doc. 1). En mayo de 1961 se comienza a gestionar el

traslado de los objetos, pinturas y esculturas del exconvento, a cargo de la Dirección General de Bienes Nacionales y de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público. (Ídem. Doc. 5)

El desprendimiento de los 16 fragmentos de pintura mural, por tratarse de una labor más técnica, estuvo a cargo de Manuel del Castillo Negrete, del Departamento de Conservación de Murales, (Boletín INAH Núm. 8. 1962) quien se traslada con un equipo de 6 personas al pueblo de Jalapa con ese objetivo (Castillo Negrete. 1962. p. 5)

Por la información en fotos y documentos, sabemos que el trabajo de restauración, a cargo del equipo de Baltazar Trejo Jardón se concluyó en dos fechas significativas. En febrero de 1967 estaban trabajados siete fragmentos: 2, 5, 6, 8, 9, 12, 14. (Archivo de Restauración INAH) Y en febrero de 1984 se informa que el material terminado de restaurar son los fragmentos 1, 3, 4, 7, 8, 10, 11, 16 y el complemento del fragmento 6, los cuales fueron llevados al Centro Regional INAH de Oaxaca. (Ídem.) Aún nos queda la duda de la fecha de terminación del fragmento 15, pero suponemos que fue en la primera etapa, pues formaba parte del Museo Nacional del Virreinato en Tepozotlán desde tiempos anteriores a su reestructuración en 1988.

La pintura mural de la Sala de Profundis en base a los fragmentos desprendidos en 1961

La pintura mural existente en los conventos del S. XVI es un tema de estudio muy interesante porque integra elementos de dos culturas muy diferentes entre sí que se conjugaron para la decoración de los nuevos espacios cristianos. Por un lado, los

escasos frailes españoles que inspirados en grabados europeos aportaron los modelos y diseños para las pinturas, y, por otro lado, la multitud de indígenas evangelizados que con sus conocimientos técnicos y su propia concepción del mundo las realizaba en el muro conventual. (Reyes Valerio, 1989). Para ambos grupos culturales, las imágenes debían inspirar a la meditación y aprendizaje de la doctrina cristiana (Victoria, JG, 1986), siendo un elemento muy importante en la apremiante labor evangelizadora.

En el momento del desprendimiento de las pinturas, en 1961, el convento estaba muy deteriorado. Solamente el muro oriente, parte del muro sur y norte, y la capilla doméstica o Sala de Profundis conservaban pinturas en ellos. El Maestro Castillo Negrete, en su artículo informativo de la labor de rescate de las pinturas murales, menciona que se desprendieron cuatro figuras de santos de la pequeña iglesia primitiva y nueve trozos de los diversos tipos de decoraciones (Castillo Negrete, 1962. p. 5). El registro completo de los fragmentos está ya publicado en 2012 (Garrido, 2012) y un estudio más detallado en 2018 (Garrido, 2018)

El método de desprendimiento del muro original fue el de strappo, con el que se retiró una película de pigmento sin la base de aplanado, usando una tela con pegamento, para posteriormente trasladarlo a otra base de aplanado montado en un soporte de metal y resina.

En esta ocasión analizaremos sólo el grupo que forman el bello retablo pictórico de la Sala de Profundis, esto es los fragmentos 10, 11, 15, 16. Estas piezas corresponderían a la pintura de más antigüedad y con fines más claramente didácticos y de meditación, además que presentan un bello estilo renacentista, el cual amerita un análisis

iconográfico por la carga significativa y doctrinal en sus imágenes.

Fragmento 10

Este fragmento era una decoración en grisalla que se localizaba originalmente en la enjuta derecha del muro oriente de la Sala de Profundis. Su realización se ubica en la segunda mitad del siglo XVI, y se utilizó la técnica al temple sobre aplanado de cal y arena. El fragmento mide 1.20 x 1.45 m en sus lados rectos y actualmente se encuentra en el depósito de colecciones del Museo de las Culturas de Oaxaca (Fig. 3)

Tiene la forma de un cuarto de círculo, siguiendo el arco superior del muro. Presenta la figura arrodillada de una persona con el hábito negro y blanco característico de la orden de Santo Domingo. En una mano sostiene un objeto no identificado, pero parece la base de una maqueta de edificio, y en la otra pareciera que levanta un crucifijo. La cara y parte del busto ha desaparecido, lo que impide identificar por su fisonomía al personaje; Sin embargo, por sus atributos y usanza creemos se trata de Santo Domingo de Guzmán.

Fragmento 11

Al igual que el fragmento 10, ya que es su contraparte en el retablo, este es la decoración en grisalla original de la enjuta iz-



Figura 3. Fragmento 10

quierda del muro oriente de la Sala de Profundis, realizado en el S. XVI con la técnica de pintura al temple sobre aplanado de cal y arena. Mide 1.32 x 1.37 m en sus lados rectos y se conserva en el depósito de Colecciones en el Museo de las Culturas de Oaxaca. (Fig. 4)

Muestra una figura también arrodillada, con el hábito dominico en blanco y negro. No podemos distinguir su identidad porque la cara y el torso, han desaparecido. Muestra repintes. Creemos, por sus atributos y usanza, es Santa Catalina de Siena.

Fragmento 15

Este fragmento originalmente era la decoración en grisalla del entrepáño derecho del muro oriente de la Sala de Profundis, del S. XVI, realizada con la técnica al temple sobre aplanado de cal y arena. Mide 1.46 x 2.46 m y actualmente se encuentra en el Museo Nacional del Virreinato en Tepotzotlán, Edo. De Mex. (Fig. 5).

Presenta la figura de cuerpo entero de un religioso joven, imberbe, que lee un libro abierto sostenido en su mano izquierda, y que puede ser identificado como San Lorenzo Mártir debido al atributo de la parrilla



Figura 4. Fragmento 11

donde fue martirizado que sostiene en la mano derecha. Se encuentra enmarcada en grutescos de formas vegetales. En general es una pintura sobria, en blanco y negro, de fino dibujo, muy bien lograda. Fue restaurada en septiembre de 1965.

Fragmento 16

Este fragmento, contraparte del 15, era originalmente la decoración en grisalla del entrepáño izquierdo del muro oriente en la Sala de Profundis. Realizado con la técnica al temple sobre aplanado de cal y arena en el Siglo XVI, mide 1.46 x 2.46 m y se encuentra en la sala 6 del Museo de las Culturas de Oaxaca, Exconvento de Santo Domingo en Oaxaca, Oax. (fig. 6).

Muestra una figura de cuerpo entero de un personaje barbado, representado de pie sobre un monte, que se puede identificar como San Juan Bautista, debido a su faldón a la rodilla de pelo de camello, un bas-



Figura 5. Fragmento 15

tón crucifijo en su mano izquierda, el corde-ro acostado sobre un libro a sus pies, y la mano derecha señalando hacia una direc-ción. Igualmente, enmarcado en grutescos de motivos vegetales, es una pintura, tam-bién muy bien lograda, realizada en blanco y negro con un leve sombreado en la figura central.

3. RECONSTRUCCIÓN Y ANÁLISIS ICONOGRÁFICO DEL RETABLO PICTÓRICO DE LA SALA DE PROFUNDIS

La apariencia de la Sala de Profundis antes de la anegación del convento, se muestra claramente en una fotografía (fig. 7) tomada por el equipo de salvaguarda y restauración de murales que fue publicada en el Boletín del INAH Núm. 8. En ella se aprecian en su totalidad la disposición del



Figura 6. Fragmento 16.

retablo pictórico del altar que men-ciona-mos. En el primer cuerpo se encontraban, custodiando un gran nicho central, vacío, una imagen de San Lorenzo (fragmento 15), al lado izquierdo del observador, y una de San Juan Bautista (fragmento 16), del lado contrario. En el segundo cuerpo, flanquean-do el mencionado nicho, y siguiendo la for-ma curva de la bóveda, se apreciaban dos figuras de frailes dominicos, tentativamen-te supuestos Santo Domingo de Guzmán (fragmento 10) y santa Catalina de Siena (fragmento 11).

La Sala de Profundis constituía un lu-gar exclusivo para los frailes de la orden de Santo Domingo dentro del convento, en el que hacían sus oraciones y meditacio-nes, motivándose a la santidad, humildad y entrega requerida para la colosal tarea evangelizadora de una nación indígena, de cultura tan distinta a la cristiana. Para ello necesitaban un buen “gimnasio espiritual” que sería la Sala de Profundis.

La presencia de cada imagen del altar tenía un significado especial. Desde luego la figura principal y máximo ejemplo de hu-mildad, amor y sacrificio por la humanidad,

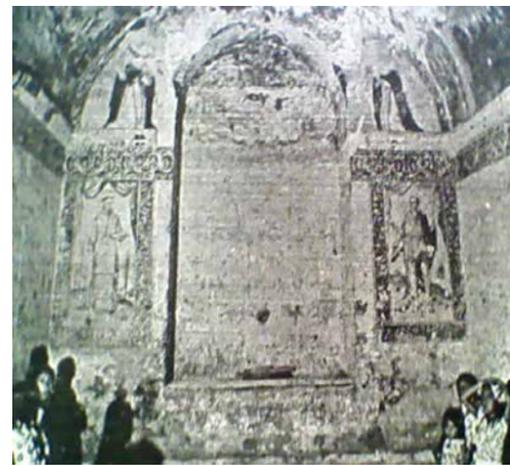


Figura 7. Vista general del retablo pictórico. - 1961. Fototeca INAH.

era la del crucifijo con un Cristo doliente, entregándose en cuerpo y alma por la sal-vación del mundo. Es por ello que, aunque el nicho principal, en forma de arco de me-dio punto, está vacío, suponemos conte-nía un crucifijo o bien, un retablo con este tema. Son muchas las imágenes de frailes de la orden haciendo sus oraciones frente a un gran crucifijo. Flanqueando el nicho principal en pares correspondientes se en-contraban las cuatro figuras que venimos mencionando orga-nizadas en los dos cuerpos de un retablo pictórico.

En el primer cuerpo está la imagen de San Lorenzo, una de las más bellas y bien logradas de la pintura mural de Jalapa del Marqués. San Lorenzo, diácono na-cido en Aragón que se caracte-rizaba por su humildad y por ayudar a los pobres, fue mar-tirizado en Roma en 258 D.C. por distribuir el tesoro de la iglesia entre los pobres, siendo colocado en una parrilla sobre brasas. (Réau, L.) Se le representa con la cabeza descubierta, mostrando su juventud en un rostro sin barba, viste una dalmática de diácono con lenguas de fuego bordadas. Lleva el libro de los Evangelios y una cruz procesional en su papel de diácono. Pero su atributo más característico es una parrilla, instrumento de su martirio. (Ídem.) La imagen de Jalapa muestra estas características. Podemos con-siderar que para los dominicos, cuyos votos principa-les eran los de humildad y pobreza, la vida ejemplar de San Lorenzo, diácono de gran fe, propagador del Evangelio, de actitud humilde y lleno de amor a los más nece-sitados, era una inspiración a la labor que ellos mismos realizaban en estas tierras in-dígenas novohispanas.

En el lado contrario, se encuentra la imagen de San Juan Bautista, uno de los más significativos personajes en la historia de la orden dominica, pues el arribo de los primeros doce frailes en América tuvo lugar en su día, el 24 de junio, día de su festivi-dad, con lo cual les fue mostrado que, así como el santo es considerado precursor de Cristo, ellos eran los anunciadores del Mesías en las Indias (Dávila Padilla. p.3-4). En la referencia bíblica (S. Mateo 3: 1-7) se relata que tenía la encomienda de preparar el camino de Jesucristo. Muy joven se reti-ra al desierto de Judea, se viste de piel de camello, y come miel y frutas silvestres. A su regreso cumple su misión, haciendo un llamado al arrepentimiento de pecados, y bautiza a Jesucristo.

La representación de San Juan Bautista se distingue por vestir ropas de piel de came-llo, y el torso semi-desnudo, portando una capa roja en se-ñal de martirio. (Réau, L.) En este caso, la figura presenta este vestua-rio, pero es curioso que tenga cubierto el torso con una camisa blanca de estilo es-pañol, lo que nos hace suponer, aunado al trazo diferente del dibujo, que la vestidura se añadió posteriormente, quizás por un sentido de pudor. Esta imagen sostiene con una mano un báculo con remate de cruz y con el índice de la mano derecha se-ñala hacia el lugar al que dirige la vista, el nicho central.

En el segundo cuerpo del retablo pictó-rico, en dirección de San Lorenzo, se en-cuentra una figura arrodillada que viste el hábito de los frailes dominicos de sotana blanca y capa negra. En la mano izquier-da sostiene un objeto de base plana que ha desaparecido. La otra mano la tiene

LA SALA
PROFUNDIS
“GIMNASIO
ESPIRITUAL”

levantada como sosteniendo algo, quizá un crucifijo, que también ha desaparecido, al igual que la cara y parte del busto. Contextualizando, lo más probable es que represente a Santo Domingo de Guzmán fundador de la orden que se representa ordinariamente con un crucifijo en una mano y con un libro o una maqueta de Iglesia en la otra. Era un ejemplo inspirador para la misión evangelizadora manteniendo los votos de su orden.

En el segundo cuerpo en dirección al San Juan Bautista, se encuentra la figura de una monja o fraile dominico anónimo arrodillado hacia el nicho principal, identificado solamente por el hábito de túnica blanca y capa negra de la orden, que cubre los brazos y llega hasta el piso en la parte de enfrente. El rostro y parte del torso ha desaparecido. No podemos identificarlo, pero pudiera representar a alguna monja destacada como Santa Catalina de Siena, haciendo un dúo con Santo Domingo, tal como se observan en el convento de Santo Domingo Tehuantepec (Fig. 8), en el de San Juan Teitipac (Fig. 9) y en el de Cuilapan (Fig. 10), en el Estado de Oaxaca. En los tres casos la capa negra de cada religioso es diferente, tal cual se ve en Jalapa, lo cual respalda nuestra suposición.

Se conservan algunos otros retablos pictóricos en Salas de Profundis del convento de Santo Domingo de Oaxaca (Fig. 11), y del convento de Cuilapan (Fig. 12). En el primer caso, existe aún el decorado estructural, rodeando el vano de la puerta, pero los cuadros con imágenes han desaparecido. En el segundo caso, el retablo pintado en el muro es muy semejante en composición al de Jalapa, y se conservan dos pinturas, definidas por frisos de decoración vegetal, custodiando un gran nicho



Figura 8. Convento de Tehuantepec. INAH.



Figura 9. Portería del Convento de Teitipac. IIE



Figura 10. Convento de Cuilapan, Oax. MLGC.



Figura 11. Convento de Sto. Domingo, Oaxaca



Figura 12. Convento de Cuilapan, Oaxaca

central, representando escenas de la vida de Jesucristo.

4. CONCLUSIONES

Después de la realización de este trabajo de investigación, hemos constatado que, efectivamente, el convento de Jalapa del Marqués es una de las construcciones de más antigüedad en el Istmo de Tehuantepec. Su establecimiento y construcción es anterior a 1558, y siguiendo un programa arquitectónico típico de ese tipo de establecimientos, estuvo decorada mayormente de pinturas murales al temple de buena calidad en su interior. Como se aprecia en las crónicas fue un trabajo de la comunidad indígena dirigida por uno o dos religiosos.

Una de las obras pictóricas de más valor y buena calidad de este convento era el retablo pictórico de la Sala de Profundis, que se conservaba casi completo como un caso excepcional. Faltan los rostros de las figuras de los lunetos del segundo cuerpo, pero como ya se señaló, bien pudieran ser Santo Domingo de Guzmán y Santa Catalina de Siena. Las pinturas de San Lorenzo y San Juan Bautista, de buena factura, lucen cierta unidad entre sí, y un pintor más diestro en el oficio.

Aunque se han tenido que seccionar y separar para poderse salvar del daño en el

vaso acuífero de la Presa, actualmente ya se tiene su nueva ubicación, y afortunadamente los fragmentos 15 y 16 se pueden apreciar en exposición en los museos mencionados. Quizá sería interesante reunir las piezas y reconstruir el retablo para una mejor apreciación y lectura iconográfica.

Las decoraciones pictóricas murales de la Sala de Profundis eran auxiliares para crear un espacio de paz, meditación religiosa, realización adecuada de las prácticas litúrgicas, e inspiración para seguir cumpliendo la titánica misión de la doctrina e instrucción cristiana de miles de indígenas.

REFERENCIAS

- Acuña, R. (1984). Relaciones Geográficas del S. XVI:Antequera. UNAM.
- Burgoa, F. de (1934). Geográfica Descripción. Talleres Gráficos de la Nación.
- Castillo Negrete, M. (1962). Rescate de las pinturas murales del Convento de Santa María de Jalapa del Marqués, Oax. Boletín del INAH Núm. 8, junio 1962, p. 4 (1º. Época)
- Ciudad Real, A. (1976). Tratado curioso y docto de las grandezas de la Nueva España. UNAM.
- Dávila Padilla, A. (1596). Historia de la fundación y discurso de la Provincia de Santiago de México, de la

Orden de Predicadores, por las vidas de sus varones insignes y casos notables de la Nueva España. Madrid.

De la Cruz, V. (2008). Mapas Genealógicos del Istmo Oaxaqueño. Consejo Nacional para las Culturas y las Artes, Culturas Populares

Esparza, M. (2008). Santo Domingo Grande: Hechura y reflejo de nuestra sociedad. Carteles Editores.

Fernández, M. (1986). La arquitectura monástica de la Orden de Santo Domingo. Historia del Arte Mexicano.

(pp. 666-685). Salvat Editores.

García Martínez, B. (1969). El Marquesado del Valle: Tres siglos de régimen señorial en Nueva España. El

Colegio de México.

Garrido Cardona, M. L. (1995). Iglesias Coloniales del Istmo de Tehuantepec. Instituto Nacional de Antropología e Historia

Garrido Cardona, M. L. (2012). Las Pinturas Murales del Convento Dominicano de Jalapa del Marqués, Oax. Arte

y Cultura Zapoteca. Universidad del Istmo.

Garrido Cardona, M.L. (2018) Los fragmentos de pintura mural del convento de Jalapa del Marqués: Ubicación

y análisis formal. Editorial Académica Española.

Machuca, L. (2007). Comercio de sal y

redes de poder en Tehuantepec en la época colonial. Fomento Cultural BANAMEX.

Maldonado Cruz y Mendoza Marín: (2008). Santa María Jalapa del Marqués: Pueblo sepultado por el vaso

de la presa "Presidente Benito Juárez", < riqueza, la de producción práctica > Edición electrónica gratuita.

<https://www.eumed.net/libros-gratis/2008b/416/>

Mullen, R.J. (1975). Dominican architecture in sixteenth century, Oaxaca. Arizona State Univ Center for Latin.

Paso y Troncoso, F. (1939). Epistolario de la Nueva España 1505-1818. J. Porrúa e hijos.

Ramírez, J. F. (1847). Proceso de Residencia contra Pedro de Alvarado y Nuño de Guzmán.

Réau, L. (1998). Iconografía del arte cristiano. Ediciones del Serbal.

Reyes Valerio, C (1989). El pintor de conventos: Los murales del Siglo XVI en la Nueva España. Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Victoria, J.G. (1986). Pintura y Sociedad en Nueva España. S. XVI. UNAM.

Winter, M., Vázquez Campa, V., Mena Gallegos, R. A., Montiel Ángeles, A. Z. y Zapien López, V. M. (2008). La Arqueología del Valle de Jalapa del Marqués. Secretos del Mundo Zapoteca. Universidad del Istmo.



Con el fin de reconocer y difundir la diversidad de lenguas indígenas que coexisten en la región del Istmo de Tehuantepec

CULTURA UNISTMO REALIZA EVENTOS EN EL MARCO DEL

Día Internacional de la Lengua Materna



Yuval Noah Harari

De animales a dioses

Breve historia de la humanidad

DEBATE

M. en C. Omar Santiago Nieva García
Ingeniería en Computación, Universidad
del Istmo, Santo Domingo Tehuantepec, Oax.

e-mail: omarg76@yahoo.com.mx

DE ANIMALES A DIOSSES

BREVE HISTORIA DE LA HUMANIDAD

Yuval Noah Harari

Atravesamos una época llena de conflictos y retos sin precedentes para la humanidad. Cuestiones como el calentamiento global, la guerra comercial entre China y E.U., los grandes flujos migratorios de África y Centro América, así como las amenazas de guerra entre Oriente y Occidente; son problemáticas que dominan la agenda política, social y económica de este siglo XXI.

Entender las causa y orígenes de este complejo panorama mundial requiere una revisión que parecería imposible sin la ayuda de una gran cantidad de libros e información analizada bajo la óptica de un historiador. Empezar este reto parece una tarea monumental y una aproximación muy cercana es la que nos brinda Yuval Noah Harari en 2015, con su versión en español titulada: "De animales a dioses. Breve Historia de la Humanidad", donde su autor nos aporta información puntual para entender el convulsionado mundo que nos ha tocado vivir y explica en un lenguaje claro y ameno cómo el Homo sapiens, se ha posicionado como la especie más

poderosa y la más destructora sobre la faz de la tierra.

A través de una gran calidad narrativa, el historiador Noah Harari realiza un recorrido por los últimos 100,000 años, llevándonos a un viaje fascinante que inicia con los primeros homínidos sobre la tierra, pasando por la revolución cognitiva, agrícola y científica, hasta colocarnos en la época moderna donde la ciencia y la tecnología nos han permitido el dominio casi completo de nuestro entorno.

El gran viaje en el que nos embarcamos a través de la lectura, comienza con el relato de la lucha por la supervivencia y la supremacía; el Homo sapiens eliminó a otras especies humanas como el Homo erectus y el Homo neanderthalensis. La clave de este dominio absoluto se basó en la cooperación según describe; y es aquí en donde el autor esboza una de sus ideas más provocadoras, la cooperación entre nosotros como especie se ha dado siempre en relación a la creación de los mitos, al uso de la imaginación como la herramienta más poderosa para trabajar por objetivos que a primera vista parecieran imposibles.



De esta manera diversas culturas han creado gobiernos, estados, religiones y un sin fin de artificios para lograr que una gran multitud de personas cooperen y trabajen entre sí.

Para Noah Harari, la invención más trascendente en torno a la cual millones de personas en todas las latitudes movilizan sus energías a diario; es el dinero. Todos confiamos en la promesa de trabajar, para obtener billetes y monedas en las que depositamos nuestra seguridad, para conseguir a cambio bienes y servicios. Además, es el dinero el medio por el cual se ha facilitado el comercio a nivel mundial y se ha desarrollado el avance científico y tecnológico que hoy vivimos.

La lectura por otro lado, nos permite analizar cómo el Homo sapiens al igual que cualquier otra especie viviente en este planeta, se encuentra limitado por factores físicos,

químicos y biológicos propios de su composición o ADN. En este libro, el autor especula cómo debido al ritmo actual del desarrollo tecnológico, nuestra especie dará paso a seres totalmente distintos; basados en la biotecnología y el diseño inteligente, surgiendo así retos y escenarios aún no imaginados.

Sin duda, leer este libro nos llevará de la mano del autor en un viaje a través del tiempo; analizando el pasado para comprender los hechos del presente y proyectando las consecuencias de nuestras decisiones en el último siglo y los posibles lugares a donde estas nos conducirán como especie. Es un libro interesante de principio a fin, que nos ilustra cómo a partir de nuestra esencia como animales hemos alcanzado un desarrollo tecnológico que nos pone en la antesala de la creación de una nueva especie.

Yuvel Noah Harari, (2015), *De animales a Dioses. Breve historia de la humanidad*, México, Debate.

UNIVERSIDAD DEL ISTMO

Campus Tehuantepec, Ixtepec y Juchitán



**SEMINARIO DE INVESTIGACIÓN
Y DIVULGACIÓN CIENTÍFICA**



TRANSFERENCIA DE APRENDIZAJE PROFUNDO USANDO CÓMPUTO NEURONAL CONVOLUCIONAL

PARA EL RECONOCIMIENTO DE EXPRESIONES FACIALES HUMANAS

RESUMEN

Con el rápido y efectivo desarrollo del Aprendizaje Máquina, la investigación en aplicaciones basadas en reconocimiento facial en personas, ha atraído la atención de investigadores en ámbitos personales, tecnológicos y comercio. Sin embargo, el proceso de reconocerlas de forma automática sigue siendo una de las tareas más complicadas del aprendizaje máquina. En este artículo aplicamos Aprendizaje Profundo (DL - Deep Learning, por sus siglas en inglés), para reconocer 6 expresiones faciales humanas: disgusto, enojo, felicidad, miedo, sorpresa y tristeza, esto, con el empleo de una base de datos creada con 466 muestras de alumnos (hombres y mujeres) de entre 18 y 25 años de edad pertenecientes a la Universidad del Istmo campus Tehuantepec. El desempeño del modelo propuesto se compara con una red de alimentación hacia adelante (Feed- Forward) empleando la misma base de datos, también, se contrastan los resultados obtenidos en nuestro estudio con otros relacionados. En los resultados finales obtuvimos 95.7% de exactitud, esto demuestra que, con DL se obtiene una alta tasa de exactitud en la clasificación de expresiones faciales.

ABSTRACT

With the rapid and effective development of Machine Learning, research in applications based on facial recognition in people has attracted the attention of researchers in personal, technological and commercial fields. However, the process of automatically recognizing them is still one of the most difficult tasks in machine learning. In this paper we apply Deep Learning (DL), to recognize 6 human facial expressions: disgust, anger, happiness, fear, surprise, and sadness, this, with the use of a database created with 466 samples of students (men and women) between 18 and 25 years of age belonging to the Universidad del Istmo Campus Tehuantepec. The performance of the proposed model is compared with a feed-forward network using the same database, also, the results obtained in our study are contrasted with other related ones. In the final results, we obtained 95.7% accuracy, this shows that with DL a high rate of accuracy is obtained in the classification of facial expressions.

Palabras Clave: Aprendizaje profundo, expresión facial, red neuronal.

Ernesto Cortés Pérez^{*a}, Sergio Sanchez Sanchez^b, Francisco Aguilar Acevedo^c

^{a,c}Ingeniería en Computación, Universidad del Istmo, C.P. 70760, Sto. Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México, ^bLicenciatura en Matemáticas Aplicadas, Universidad del Istmo, C.P. 70760, Sto. Domingo Tehuantepec, Oaxaca, México

e-mail: cope144@gmail.com

1. INTRODUCCIÓN

Las expresiones faciales permiten a los seres humanos comunicarse, interactuar en sociedad, pero fundamentalmente expresar sus emociones. Liu (2019) mencionó que el reconocimiento de expresiones faciales se ha convertido en una de las áreas con un gran crecimiento en aplicaciones como: estudios de comportamiento, estudios sobre la salud mental, procesos cognitivos, sistemas interacción humano-computadora, entre otros. Además, conociendo las emociones del usuario, las computadoras pueden ser tutores más efectivos, incluso aprender las preferencias de los usuarios, monitorear los niveles de estrés y también en un escenario clínico, reconocer la inhabilidad de una persona y ayudar a detectar desórdenes psicológicos.

Entre las capacidades de percepción de los seres humanos, el reconocimiento de expresiones faciales es de los más complicados, ya que los rostros no solo están compuestos de distintos rasgos y configuraciones concretas, sino que van cambiando con la edad. Además, la estructura anatómica del rostro posee muchos músculos y los elementos que la componen, y pueden adoptar formas diferentes (Ya et al., 2017).

El reconocimiento de expresiones faciales entre personas es una tarea que se lleva a cabo constantemente y sin un esfuerzo aparente. No obstante, para la visión artificial, sigue siendo una tarea de gran esfuerzo computacional, aún más, cuando se realiza en tiempo real.

Las expresiones faciales son una forma importante de comunicación entre humanos, por ejemplo, en la investigación llevada a cabo por Ekman (1993) se da a conocer que la parte no verbal es el canal que más información proporciona en la comunicación social. Alabbasi et al. (2015) observaron que las expresiones faciales son un factor de gran importancia en la interpretación de los mensajes que se reciben, por ello cuando se intercambian palabras con otra persona, el mensaje no solo depende de la semántica, ya que al mismo tiempo también se reciben mensajes subjetivos de expresiones faciales que complementan la comprensión del mismo. Debido a que las expresiones faciales representan un alto impacto e importancia en la interacción humana, es necesario crear sistemas que reconozcan de forma automática estas expresiones, con el propósito de contribuir con el mejoramiento del proceso de Interacción Humano-Computadora, también es de gran utilidad contar con sistemas de este tipo, en áreas como la seguridad, educación, psicología, robótica, etc.

En este artículo se propone la aplicación de DL para el reconocimiento de expresiones faciales humanas (disgusto, enojo, felicidad, miedo, sorpresa, tristeza), dicho artículo contribuye a la investigación del desarrollo de sistemas de reconocimiento de patrones, y a la mejora del proceso de Interacción Humano-Computadora.

2. EXPRESIONES FACIALES

El rostro humano es una de las mejores fuentes de información sobre el estado emocional de una persona, y al mismo tiempo, uno de los métodos de comunicación no verbal. Esta forma de comunicación es especialmente eficaz, porque hay algunas emociones en la cual la

expresión facial, es la misma sobre toda la población. En contraste, la comunicación corporal o los gestos de la mano, suelen ser diferentes en otras culturas, Aly et al. (2016). Las emociones son una parte importante en la vida humana, con las expresiones faciales, distintos autores han desarrollado aplicaciones para solucionar problemas del mundo real, como lo menciona Badar y Shrawankar (2013).

2.1 Reconocimiento de expresiones faciales

Existe una gran cantidad de información sobre la construcción de sistemas para analizar automáticamente la configuración del rostro. La mayor parte de esta investigación se ha centrado en sistemas que utilizan visión por computadora y técnicas de reconocimiento de patrones para detectar pasivamente la actividad facial. La mayoría de estos sistemas pueden clasificarse en dos categorías (Bodhi y Naveen, 2015):

- Sistemas que reconocen las expresiones faciales prototípicas correspondientes a las emociones básicas. Por ejemplo: feliz, triste, enojado, etc.
- Sistemas que reconocen las acciones faciales. Por ejemplo: ceño fruncido, aumento de la ceja, arrugar la nariz, etc.

Chauhan et al. (2016) menciona que, gran parte de los sistemas que reconocen las expresiones faciales consisten de cuatro componentes básicos:

- Adquisición de la imagen
- Procesamiento de la imagen
- Extracción de características
- Reconocimiento de la expresión

Ekman (1993), desarrolló un sistema que reconoce expresiones faciales prototípicas: enojo, tristeza, felicidad, sorpresa, miedo, disgusto (véase Figura 2.1) más la neutral, debido a que son universales y corresponden a las emociones humanas básicas.



Figura 2.1. Expresiones faciales básicas. Fuente: Ekman, P., & Friesen, W. V. (1977).

Independientemente, si un sistema reconoce expresiones faciales o sólo las acciones faciales, la parte importante es la representación del rostro y los métodos para la extracción de características, ya que esta tarea se puede llevar a cabo en imágenes 2D o 3D, o una combinación de ambas.

3. TRABAJOS RELACIONADOS

El reconocimiento de expresiones faciales es un área activa, principalmente en el diseño de sistemas de interacción Humano-Computadora, sus aplicaciones pueden ser variadas, existen estudios que buscan alternativas a los métodos clásicos. Corneanu et al. (2016) proponen como alternativa el uso de la información de profundidad proporcionada por sensores Kinect 3D, esto, para evitar los principales problemas de los métodos clásicos basados en imágenes y secuencias de video 2D. Aunque describen las ventajas que tiene un sensor Kinect tanto en precio, portabilidad y adquisición de datos de profundidad, también muestran que solo pocos investigadores han usado este sensor para el reconocimiento automático de expresiones faciales. En su estudio, abordan este problema presentando un conjunto de datos RGBD obtenidos con el sensor Kinect 1.0, el cual incluye 7 expresiones (felicidad, tristeza, sorpresa, disgusto, miedo, ira y la neutral), obtenidos de 32 personas entre 10 y 30 años, y con diferentes tonos de piel.

Un ejemplo dedicado al pre-procesamiento, lo hace Corneanu et al. (2016b), en el que se dan a conocer técnicas en datos de profundidad 3D, las cuales permiten la detección, registro y extracción de características faciales, esto debido a que son partes críticas en los sistemas de identificación y autenticación. Para detectar el rostro, se hace la correspondencia con datos de textura mediante el detector de Viola y Jones (2001). Posteriormente se validan los rostros usando un clasificador PCA (Análisis de Componentes Principales, y se registran mediante un algoritmo ICP (Iteración del Punto Más Cercano convencional. Finalmente, sobre los rostros registrados se localizan la punta de la nariz y las esquinas del ojo. En la misma línea, estudios como el de Kim (2017), dan a conocer la importancia de las expresiones faciales en la interacción social, ya que ha sido un campo de estudio que se intensificó en los últimos años, además de que presentan un resumen general del análisis de distintas expresiones faciales en RGB, 3D e imágenes térmicas. También abarcan temas sobre los pasos en la detección de rostros, hasta el reconocimiento de expresiones faciales, describiendo y clasificando los métodos en el estado del arte. Por último, concluyen con una discusión general sobre tendencias, preguntas importantes y las futuras líneas de investigación.

4. APRENDIZAJE MAQUINA (MACHINE LEARNING)

Es una rama de la Inteligencia Artificial que se encarga de generar algoritmos que tienen la capacidad de aprender. Una definición más formal, es la propuesta por (Correa et al., 2013), no tanto en términos cognitivos sino operacionales: "Se dice que un programa de computadora

aprende de la experiencia E respecto a algún tipo de tareas T con desempeño P si su desempeño en tareas T , tal y como es medido por P , mejora con la experiencia E ".

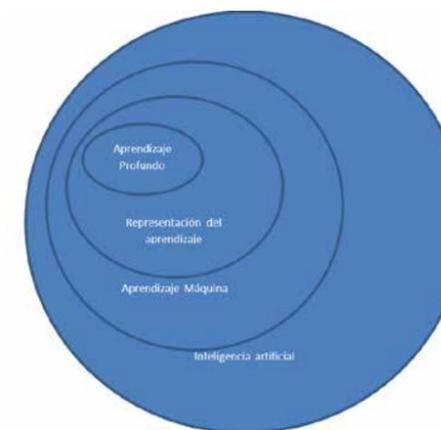


Figura 4.1. Diagrama de Venn que muestra como el aprendizaje profundo es un tipo de representación del aprendizaje, el cual a su vez es un tipo de aprendizaje máquina, que a su vez es una subárea de la Inteligencia Artificial, Fuente: Deep Learning con Matlab (2017).

4.1 Aprendizaje Profundo (Deep Learning)

El Aprendizaje Profundo es una técnica del Aprendizaje Máquina que emplean las redes neuronales profundas multicapa, (Convolución + ReLu + Pooling), esto es la verdadera esencia del Aprendizaje Profundo.

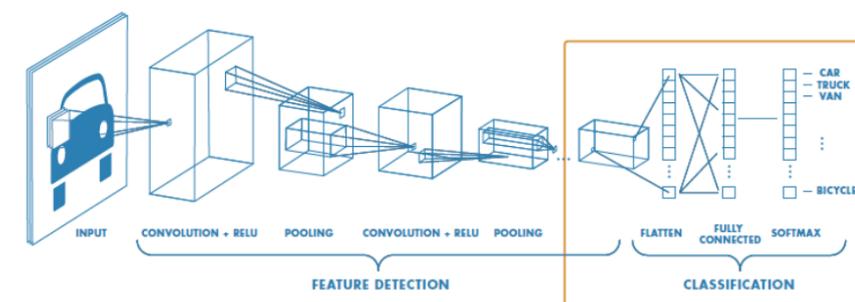


Figura 4.2. Un esquema general de DL en la clasificación de vehículos. Fuente: Deep Learning con Matlab (2017).

4.2 Regla de aprendizaje

La regla de aprendizaje del DL se basa en el algoritmo de retro-propagación del error (backpropagation) para ajustar sus pesos, este se muestra a continuación:

El primer paso es propagar la entrada hacia adelante a través de la red:

$$\mathbf{a}^{m+1} = \mathbf{f}^{m+1}(\mathbf{W}^{m+1}\mathbf{a}^m + \mathbf{b}^{m+1}) \text{ para } m = 0, 1, \dots, M - 1 \quad (1)$$

Donde:

M es el número de capas en la red.

\mathbf{f} es la función de activación utilizada en la capa actual.

\mathbf{W} es la matriz de pesos en la capa actual.

\mathbf{b} son los bias en la capa actual.

$\mathbf{a}^0 = \mathbf{p}$, es el punto de inicio para la ecuación (1), donde: \mathbf{p} es el vector de entrada inicial.

$\mathbf{a} = \mathbf{a}^m$, una vez propagada la entrada hacia la última capa \mathbf{a}^m se convierte en la siguiente entrada de la iteración del algoritmo.

El siguiente paso es propagar las sensibilidades hacia atrás a través de la red:

Para la capa final M :

$$\mathbf{s}^M = -2\mathbf{F}^M(\mathbf{n}^M)(\mathbf{t} - \mathbf{a}) \quad (2)$$

Donde:

\mathbf{t} es la salida esperada.

\mathbf{a} es la salida de la capa final.

Para las capas intermedias:

$$\mathbf{s}^m = \mathbf{F}^m(\mathbf{n}^m)(\mathbf{W}^{m+1})^T \mathbf{s}^{m+1}, \text{ para } m = M - 1, \dots, 2, 1 \quad (3)$$

Donde:

\mathbf{s}^{m+1} es la sensibilidad de la capa actual.

\mathbf{F} es la derivada de la función de activación en la capa actual.

\mathbf{n} es la salida de la capa actual antes de evaluarse en la derivada.

\mathbf{W} es la matriz de pesos en la capa actual.

Finalmente, los pesos y bias son actualizados:

$$\mathbf{W}^m(k + 1) = \mathbf{W}^m(k) - \alpha \mathbf{s}^m (\mathbf{a}^{m-1})^T \quad (4)$$

Donde:

$\mathbf{W}(k)$ es la matriz de pesos anterior.

\mathbf{a} es la salida final de cada capa.

$$\mathbf{b}^m(k + 1) = \mathbf{b}^m(k) - \alpha \mathbf{s}^m \quad (5)$$

Donde:

$\mathbf{b}(k)$ es el bias.

α es la tasa de aprendizaje.

\mathbf{s} es la sensibilidad calculada anteriormente.

4.3 Redes neuronales Convolucionales

DL también hace uso de redes neuronales convolucionales (CNN), las cuales son redes neuronales profundas, en las cuales se preserva la estructura jerárquica mediante el aprendizaje de representaciones internas de características en los problemas como reconocimiento de imágenes, y otros problemas de visión computarizada. No se limita a las imágenes; también logra obtener resultados en problemas de procesamiento del lenguaje natural y reconocimiento de voz.

4.3.1 La Convolución

Consiste de filtrar las imágenes con ventanas de $N \times N$, la convolución se enfoca en la extracción de características de las imágenes para preservar la relación espacial entre los píxeles que la conforman. Este esquema se puede ver en la Figura 4.3.

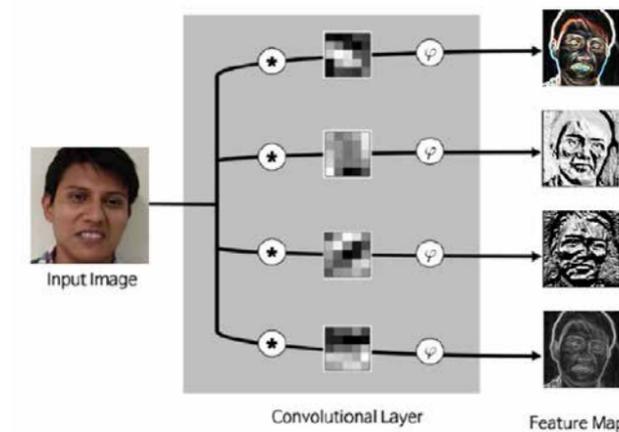


Figura 4.3. Un esquema general del proceso de Convolución en redes Neuronales Convolutivas. Fuente: Kim, P. (2017). Matlab Deep Learning: with Machine Learning. Neural Networks and Artificial Intelligence.

Donde el símbolo * denota la operación de convolución, y la marca ϕ es la función de activación ReLu (Rectified Linear Unit) la cual se puede ver en la ecuación 6. Los cuadrados en escala de grises entre estos operadores indican el filtro de convolución.

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

La convolución es una operación difícil de explicar ya que se encuentra en el plano bidimensional. Sin embargo, su concepto y cálculo, son simples, un ejemplo que ayuda a comprender cómo funciona es el siguiente, considere una imagen de 4x4 píxeles que se expresa como la matriz que se muestra en la Figura 4.4. Generaremos un mapa de características a través de la operación convolución de esta imagen.

1	1	1	3
4	6	4	8
30	0	1	5
0	2	2	4

Figura 4.4. Imagen de entrada (matriz) para ejemplificar el proceso de Convolución.
Fuente: elaboración propia.

Utilizamos los dos filtros de convolución que se muestran en la Figura 4.5.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Figura 4.5. Filtros de Convolución.
Fuente: elaboración propia.

Comencemos con el primer filtro. La operación de convolución comienza en la esquina superior izquierda de la sub-matriz que tiene el mismo tamaño que el filtro de convolución (Ver Figura 4.6).

1	1	1	3
4	6	4	8
30	0	1	5
0	2	2	4

 $\circledast \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7 & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix}$

Figura 4.6. La operación de Convolución comienza en la esquina superior izquierda.
Fuente: elaboración propia.

La operación de convolución es la suma de los productos de los elementos que son

ubicados en las mismas posiciones de las dos matrices. El valor 7 en la Figura 4.6 es calculado como: $(1 \times 1) + (1 \times 0) + (4 \times 0) + (6 \times 1) = 7$. De la misma manera, procesando el segundo filtro produce el siguiente mapa de características:

1	1	1	3
4	6	4	8
30	0	1	5
0	2	2	4

 $\circledast \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 7 & 7 \\ 36 & 4 & 9 \\ 0 & 3 & 7 \end{bmatrix}$

Figura 4.7. Resultado de aplicar el proceso de Convolución con el filtro 2.
Fuente: elaboración propia.

4.4 Agrupación (Pooling)

La capa de agrupación reduce el tamaño de la imagen, ya que combina píxeles vecinos de un área determinada de la imagen en un solo valor representativo. La agrupación es una técnica típica que muchos otros esquemas de procesamiento de imágenes ya emplean. Para realizar las operaciones en la capa de agrupación, debemos determinar cómo seleccionar los píxeles de la imagen y cómo calcular el valor final. Los píxeles vecinos generalmente se seleccionan en una matriz cuadrada. Los valores representativos generalmente se establecen como la media o el máximo de los píxeles seleccionados. El funcionamiento de la capa de agrupación es sorprendentemente simple, como ejemplo considerar la imagen de entrada de 4x4 píxeles, que se expresa mediante la matriz que se muestra en la Figura 4.8.

1	1	1	3
4	6	4	8
30	0	1	5
0	2	2	4

Figura 4.8. Imagen de entrada para ejemplificar el Pooling.
Fuente: elaboración propia.

Se combinan los píxeles de la imagen de entrada en una matriz de 2x2 sin sobreponer los elementos. Una vez que la imagen de entrada pasa a través de la capa de agrupación, se reduce a una imagen de 2x2 píxeles. La Figura 4.9 muestra el resultado de la agrupación utilizando la *media (Mean pooling)* y el *máximo (Max pooling)*.

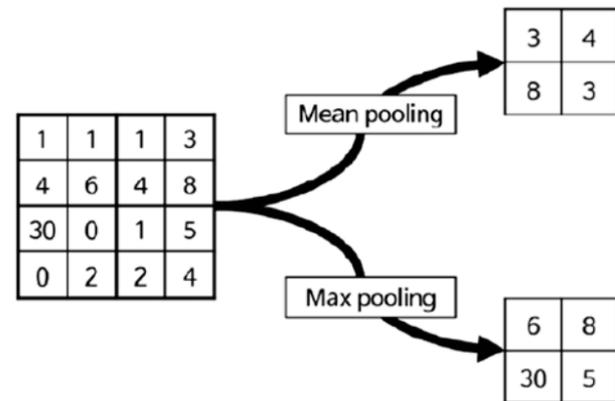


Figura 4.9. Los resultados del *Pooling* usando el metodo de la *media* y el *máximo*.
Fuente: elaboración propia.

Las Regla de aprendizaje, la Convolución + ReLu y el *Pooling* son las operaciones realizadas en las capas que componen una arquitectura típica DL, la cual se puede observar en la Figura 4.10.

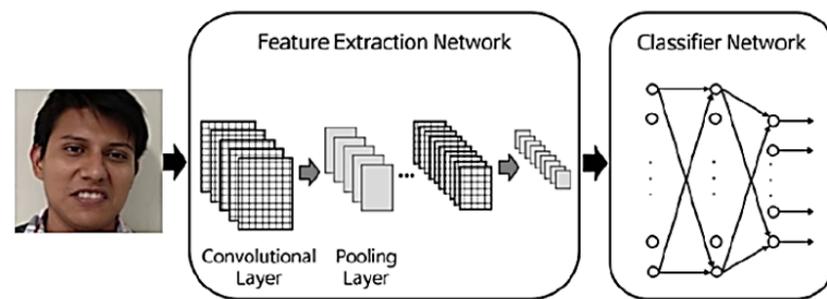


Figura 4.10. Arquitectura típica de DL.
Fuente: Kim, P. (2017). Matlab deep learning: With Machine Learning. Neural Networks and Artificial Intelligence.

5. BASE DE DATOS

La base de datos fue construida con información de alumnos de la Universidad del Istmo campus Tehuantepec, Oaxaca, México. Dicha base contiene 466 imágenes con información relacionada a expresiones faciales, las imágenes son de personas de 15 a 29 años, cada imagen es de tamaño 160x160 pixeles en escala de grises, en la figura 5.1 se muestran 200 rostros.



Figura 5.1. Base de datos para reconocer expresiones faciales con DL.
Fuente: elaboración propia.

Las expresiones faciales consideradas para el reconocimiento, se pueden ver en la figura 5.2.



Figura 5.2. Expresiones faciales consideradas para la clasificación con DL.
Fuente: elaboración propia.

El número de muestras está dividido de la siguiente manera:

- Disgusto - 62
- Enojo - 108
- Feliz - 99
- Miedo - 57
- Sorpresa - 60
- Tristeza - 80
-

6. METODOLOGÍA

El flujo de información entre la base de datos y la arquitectura DL se muestra en la Figura 6.1. Múltiples kernels en la capa de convolución (*conv1*) extraen las características de interés para clasificar las expresiones faciales, ésta capa tiene 20 filtros de dimensión 9x9, y genera nuevas

imágenes llamadas “mapas de características”, las cuales acentúan características únicas de la imagen original. La capa de convolución opera de una manera muy diferente en comparación con otras capas de redes neuronales no convolucionales, esta capa no emplea pesos de conexión y no emplea suma ponderada, en cambio, contiene filtros que transforman las imágenes los cuales comúnmente se llaman “filtros de convolución”.

Tabla 1. Arquitectura de la Red Neuronal Convolucional

Capa	Nombre de la capa	Tipo de capa	Detalles de la capa
1	input	Imagen de entrada	160x160 dimensión de la imagen
2	'conv1'	Convolución	20, 20x20x9 convoluciones
3	'relu1'	ReLU	ReLU
4	'pool1'	Pooling	3x3 max pooling
5	'relu2'	ReLU	ReLU
6	'prob'	Softmax	Softmax
7	'output'	Clasificación	Entropía cruzada 6 clases (sorpresa, enojo, feliz, miedo, sorpresa, trizeza)

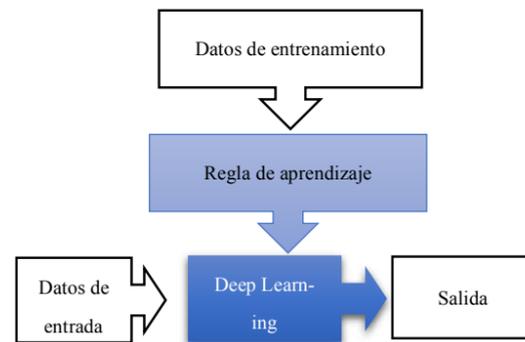


Figura 6.1. El concepto Flujo de información entre la base de datos y la arquitectura DL.
Fuente: Phil Kim (2017).

La salida de la capa de convolución pasa a través de la función *relu1*, seguida a la capa de agrupamiento (*pool1*). La clasificación de la red neuronal se lleva a cabo en la capa oculta y la capa de salida. La capa oculta tiene 100 nodos, ésta capa emplea la función de activación *relu1*, y la capa de salida (*output*) tiene 6 nodos (expresiones faciales) la cual emplea la función de activación *softmax*. La función *softmax* toma como entrada un vector de números reales (clases), y lo normaliza con una distribución de *M* probabilidades proporcionales al exponenciar el número de entradas (clases). Es decir, antes de aplicar *softmax*, algunos componentes del vector podrían ser negativos o mayores que uno; y podría no sumar 1; pero después de aplicar *softmax*, cada componente estará en el intervalo [0, 1], y la suma del vector resultante sumara 1, para que puedan interpretarse como probabilidades. La función *softmax* está definida en (7) y (8).

$$\sigma(x_j) = \frac{e^{x_j}}{e^{x_1} + e^{x_2} + e^{x_3} + \dots + e^{x_M}} \tag{7}$$

$$\sigma(x_j) = \frac{e^{x_j}}{\sum_{j=1}^M e^{x_j}} \tag{8}$$

Donde x_j es la suma ponderada del *j*-ésimo nodo de salida, y *M* es el número de nodos de salida. Siguiendo esta definición, la función *softmax* del clasificador, con 6 nodos de salida (sorpresa, enojo, feliz, miedo, sorpresa, tristeza), satisface la condición (9).

$$\sigma(x_1) + \sigma(x_2) + \sigma(x_3) + \sigma(x_4) + \sigma(x_5) + \sigma(x_6) = 1 \tag{9}$$

La Tabla 1 resume la arquitectura del modelo de la Red Neuronal Convolucional.

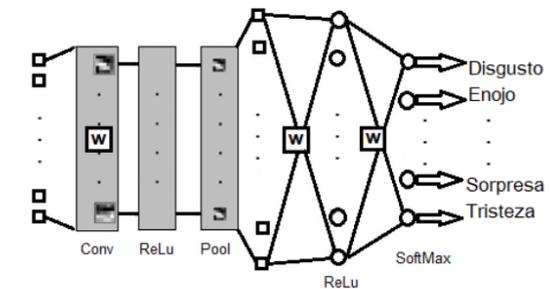


Figura 6.2. Arquitectura DL para clasificación de expresiones faciales.
Fuente: elaboración propia.

El proceso de ingresar la imagen a través de los filtros de convolución produce mapas de características, las Figuras 6.4, 6.5 y 6.6 muestran los resultados después de aplicar el proceso de convolución a la imagen de entrada de tamaño 160x160 píxeles en escala de grises, la cual se puede observar en la Figura 6.3. La capa de convolución genera el mismo número de mapas como los filtros de convolución. Por lo tanto, la capa de convolución contiene 20 filtros, generará 20 mapas de características.



Figura 6.3. Imagen de entrada.
Fuente: elaboración propia.

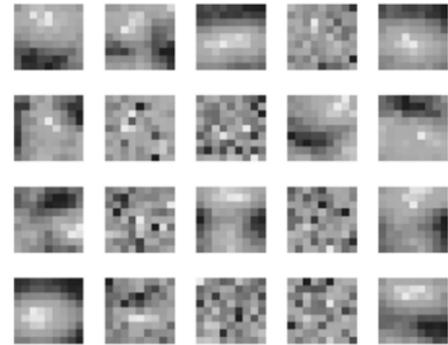


Figura 6.4. Mapas de características [Convolución].
Fuente: elaboración propia.

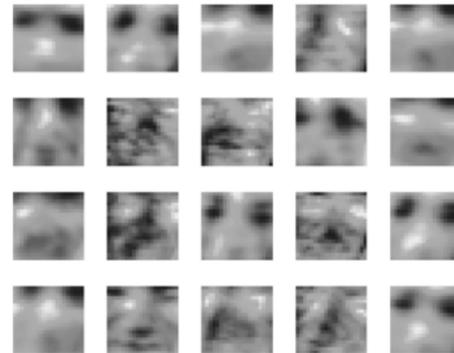


Figura 6.5. Mapas de características [Convolución + ReLu].
Fuente: elaboración propia.

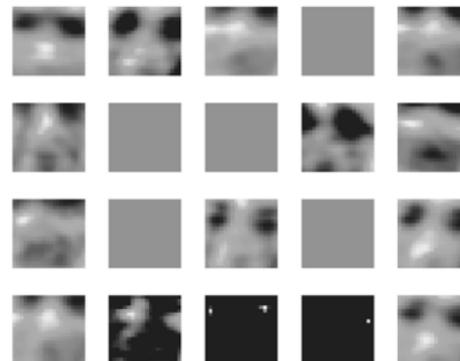


Figure 6.6. Mapas de características [Conv + ReLu + Pooling].
Fuente: elaboración propia.

7. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DESEMPEÑO EN EL RECONOCIMIENTO DE EXPRESIONES FACIALES CON DEEP LEARNING

Para las pruebas de desempeño, la base de datos se dividió como sigue:

- 90% datos para entrenamiento
- 10% datos para validación.

En general, se usaron 420 imágenes para el proceso de entrenamiento y 46 imágenes para validación. La función para medir el desempeño en DL es un concepto matemático relacionado con la teoría de optimización. Asimismo, la función de desempeño está relacionada al aprendizaje supervisado, donde la red neuronal ajusta sus pesos para reducir el error en los datos de entrenamiento. En este contexto, la medida del error de la red neuronal es la función costo. Existen dos tipos de funciones de costo para las redes neuronales de aprendizaje supervisado (10) y (11).

$$J = \sum_{i=1}^M \frac{1}{2} (d_i - y_i)^2 \quad (10)$$

$$J = \sum_{i=1}^M \{-d_i \ln(y_i) - (1 - d_i) \ln(1 - y_i)\} \quad (11)$$

Donde y_i es la salida de la red neuronal, d_i es la salida correcta de los datos de entrenamiento y M es el número de nodos de salida. La función de costo de la ecuación (10) es el cuadrado de las diferencias entre la salida de la red neuronal “ y ” y la salida correcta “ d ”, si estos valores son iguales, entonces el error es cero. Por otra parte, una diferencia grande entre estos dos valores, origina un error grande. La función de costo de la ecuación (11) es llamada *función de entropía cruzada*, esta ecuación es una concatenación de la ecuación (12). Debido a la definición del logaritmo, la salida “ y ”, deberá estar entre 0 y 1.

$$E = \begin{cases} -\ln(y) & d = 1 \\ -\ln(1 - y) & d = 0 \end{cases} \quad (12)$$

Para el entrenamiento, alimentamos la red por 200 épocas, con el primer conjunto de datos (entrenamiento), la cual tomo 5 horas 42 minutos 43 segundos. Se utilizó un GPU Intel i7 NVIDIA GeForce GTX 1050, memoria ram 16GB. El error mínimo alcanzado fue de 0.0001. Los resultados del desempeño en el entrenamiento se observan en la Figura 7.1.

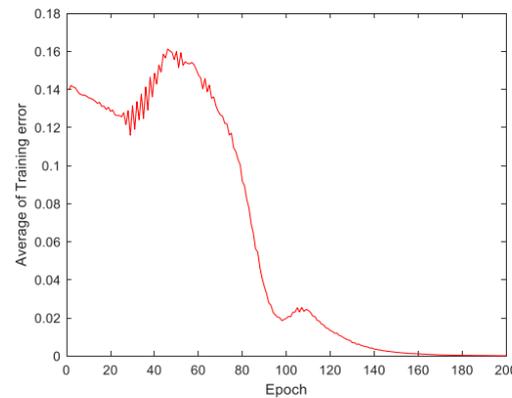


Figure 7.1. Desempeño del modelo DL.
Fuente: elaboración propia.

Para mostrar los resultados, los experimentos fueron realizados en una interfaz de usuario, en donde, se realizaron pruebas eligiendo personas al azar con su respectiva expresión facial. La Figura 7.2 muestra los resultados de una persona con expresión de sorpresa, y a la derecha se muestra en gráfica de barras los resultados de las probabilidades en la clasificación.

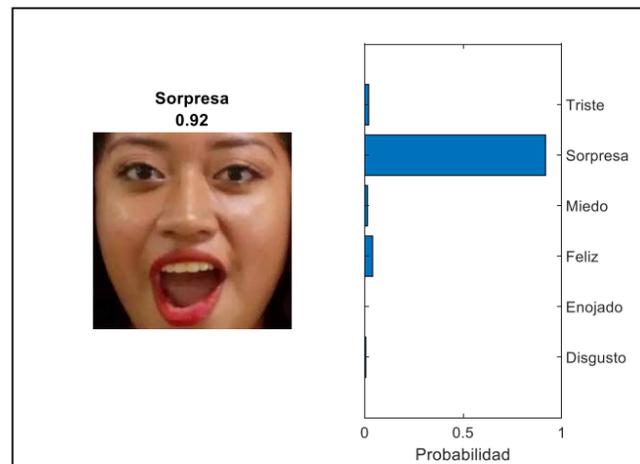


Figura 7.2. Interfaz para mostrar resultados.
Fuente: elaboración propia.

La Tabla 2 muestra los resultados de las probabilidades obtenidas en la imagen de entrada de la Figura 7.2, donde la primera columna tiene las etiquetas de cada una de las clases (expresiones faciales), y la segunda columna tiene la probabilidad de pertenencia a cada una de las clases. En la misma tabla se puede observar que la imagen de entrada pertenece a la clase *Sorpresa*, ya que su probabilidad de pertenencia fue mayor, esto se puede ver en la segunda fila de la Tabla 2.

Tabla 2. Probabilidades de pertenencia correspondientes a la Figura 7.2

Target	Probabilidad
Tristeza	0.0208
Sorpresa	0.9200
Miedo	0.0143
Felicidad	0.0408
Enojo	0.0001
Disgusto	0.0061

Continuando con las pruebas de desempeño, la Figura 7.3 muestra los resultados de 16 personas clasificadas de acuerdo a su expresión facial y su porcentaje de probabilidad de pertenencia a la clase, donde el valor de pertenencia está en el intervalo [0 - 1], 0 = no pertenece, 1 = pertenece.

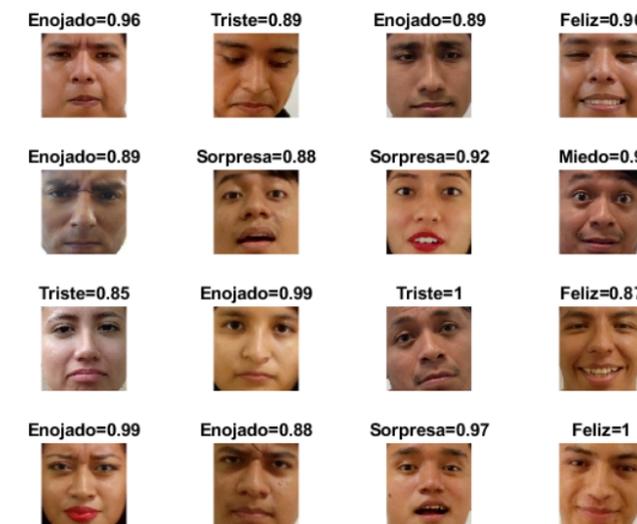


Figura 7.3. Resultados en la clasificación de 16 personas de acuerdo a su expresión facial, en cada una de ellas en texto se muestra la clase y su porcentaje de pertenencia a esa clase.
Fuente: elaboración propia.

Experimentando con grupos de datos, se realizaron 2 pruebas, la primera incluye los datos de entrenamiento y la segunda incluye los datos de validación. En la Figura 7.4 se muestran la matriz de confusión del experimento con datos de entrenamiento.

Confusion Matrix

Output Class	1	2	3	4	5	6	
1	2 0.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
2	0 0.0%	69 14.8%	0 0.0%	2 0.4%	0 0.0%	2 0.4%	94.5% 5.5%
3	0 0.0%	0 0.0%	94 20.2%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.2%	98.9% 1.1%
4	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	54 11.6%	2 0.4%	1 0.2%	94.7% 5.3%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 0.2%	77 16.5%	0 0.0%	98.7% 1.3%
6	0 0.0%	6 1.3%	3 0.6%	7 1.5%	13 2.8%	132 28.3%	82.0% 18.0%
	100% 0.0%	92.0% 8.0%	96.9% 3.1%	84.4% 15.6%	83.7% 16.3%	97.1% 2.9%	91.8% 8.2%
	1	2	3	4	5	6	
	Target Class						

Figura 7.4. Matriz de confusión del experimento realizado con datos de entrenamiento.

Fuente: elaboración propia.

Confusion Matrix

Output Class	2	3	4	5	6	
2	5 10.9%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
3	0 0.0%	15 32.6%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
4	0 0.0%	0 0.0%	2 4.3%	0 0.0%	0 0.0%	100% 0.0%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	7 15.2%	0 0.0%	100% 0.0%
6	0 0.0%	1 2.2%	0 0.0%	1 2.2%	15 32.6%	88.2% 11.8%
	100% 0.0%	93.8% 6.3%	100% 0.0%	87.5% 12.5%	100% 0.0%	95.7% 4.3%
	2	3	4	5	6	
	Target Class					

Figura 7.5. Matriz de confusión del experimento realizado con datos de validación.

Fuente: elaboración propia.

Los experimentos fueron reproducidos en base a la estructura del modelo DL expuesto. La exactitud de las pruebas finales fue de 91.84% y 95.65% respectivamente, y esto se muestra en la diagonal principal de las matrices de confusión de las Figuras 7.4 y 7.5, la cual indica que el método utilizado en este estudio logra una alta tasa de exactitud en la clasificación de expresiones faciales humanas.

8. ANÁLISIS COMPARATIVO DEEP LEARNING VS FEED FORWARD

Para contrastar los resultados, se empleó la misma base de datos con otra red neuronal de tipo Feed-Forward, (Pérez et al., 2012), las características empleadas para esta red neuronal son llamadas *landmarks*, la obtención de estas características se puede observar en [24, 25].

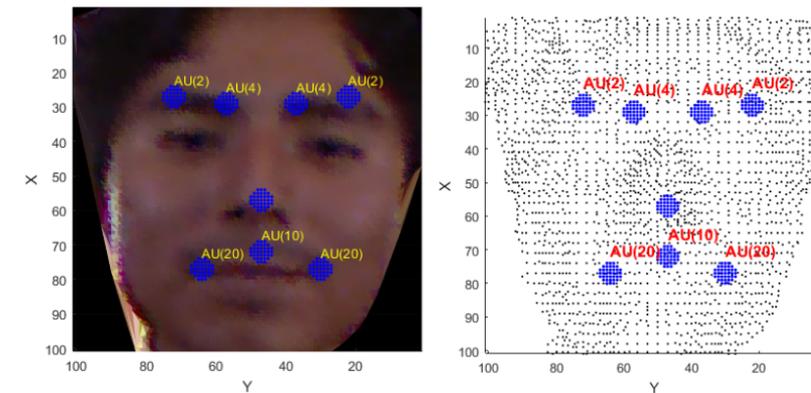


Figura 8.1. Extracción de land marks.

Fuente: elaboración propia.

La representación de cada gesto con esta propuesta es representado como vector de características [23], como se puede ver en la Figura 8.2

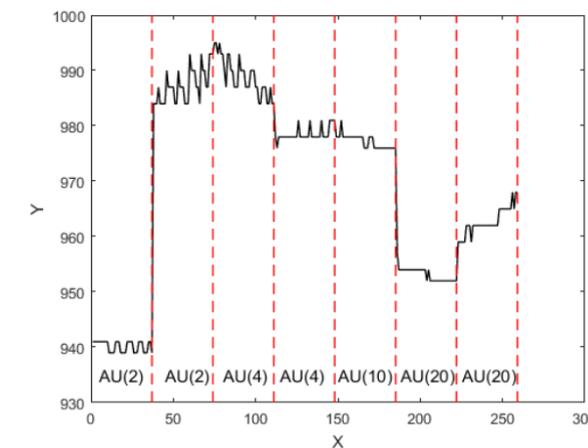


Figura 8.2. Vector característico landmarks.

Fuente: elaboración propia

La arquitectura del modelo empleado en la red neuronal de tipo Feed-forward se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Arquitectura de la Red Neuronal Feed Forward.

Parámetro	Valor
Neuronas de entrada	250 (landmarks)
Neuronas de salida	6 (expresiones faciales)
Neuronas ocultas	450
Método de entrenamiento	Gradiente conjugado escaldado (trainscg)
Taza de aprendizaje	0.01
Épocas	200
Error mínimo	1e-18
Función de activación	Tangente sigmoideal
Función de desempeño	Error medio cuadrático (<i>mse</i>)

Se empleó la misma base de datos, es decir 420 imágenes para entrenamiento y 46 imágenes de prueba. En la Figura 8.3 se puede ver el desempeño de la red neuronal Feed-Forward.

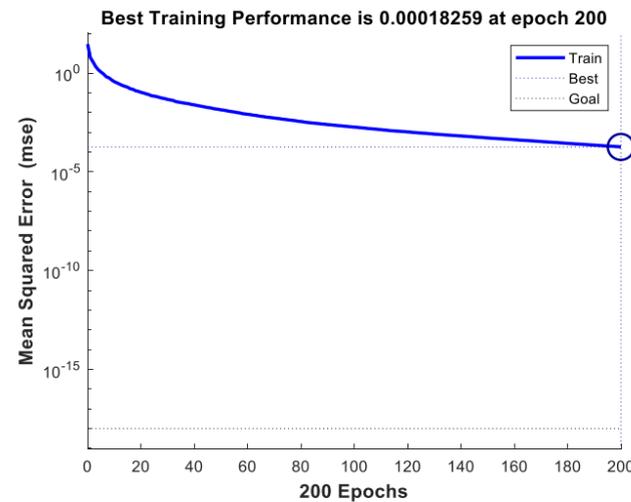


Figura 8.3. Desempeño de la red neuronal *Feed-Forward*.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 8.4 se muestran la matriz de confusión de los datos de prueba en la red neuronal Feed Forward. Y finalmente, la Tabla 4 muestra los resultados comparativos en el reconocimiento de expresiones faciales con Deep Learning vs Feed Forward.

Output Class \ Target Class	1	2	3	4	5	6	Accuracy
1	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	1 2.2%	0 0.0%	0 0.0%	0.0%
2	1 2.2%	8 17.4%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	88.9%
3	1 2.2%	0 0.0%	6 13.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	85.7%
4	0 0.0%	1 2.2%	0 0.0%	8 17.4%	0 0.0%	0 0.0%	88.9%
5	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	0 0.0%	9 19.6%	0 0.0%	100%
6	0 0.0%	0 0.0%	2 4.3%	0 0.0%	0 0.0%	9 19.6%	81.8%
Overall	0.0%	88.9%	75.0%	88.9%	100%	100%	87.0%

Figura 8.4. Matriz de Confusión que representa el desempeño de la Feed Forward.

Fuente: elaboración propia

Tabla 4. Comparación de desempeño en el reconocimiento de expresiones faciales humanas: Deep Learning vs Feed Forward

Método	Desempeño
Deep Learning	95.7%
Feed - Forward	87.0%

9. CONCLUSIONES

Los experimentos en el presente artículo fueron realizados con la herramienta TensorFlow y Matlab R2020. Basado en los resultados de prueba y la base de datos empleada, las conclusiones son las siguientes: el reconocimiento de expresiones faciales humanas mediante DL produce una alta tasa de exactitud de clasificación en las expresiones “Felicidad” y “Tristeza”, con 96.9% y 97.1% respectivamente, esto se puede observar claramente en los resultados de la matriz de confusión con los datos de entrenamiento, donde se obtuvieron 6 falsos positivos de 75 en la expresión “Felicidad”, y 4 falsos positivos de 136 en la expresión “Tristeza”. Por otra parte, en la matriz de confusión de los datos de validación se obtuvo 93.8% de exactitud en la clasificación de la expresión “Felicidad” con 1 falso positivo de 16, adicionalmente el siguiente valor más alto en la medida de desempeño con los datos de validación, fue la expresión Tristeza con 100% de exactitud en la clasificación, con 0 falsos positivos de 15. Consecuentemente, observamos que la expresión con menor exactitud en la clasificación fue “Sorpresa”, donde se obtuvo 83.7% y 87.5%, respectivamente. Así mismo, pudimos observar que existe una correlación entre la expresión *Enojo* y *Disgusto*, esto se puede

observar a la matriz de confusión de la Figura 7.4, donde ocurrieron el mayor número de falsos positivos (16.3%). Al comparar los resultados de la clasificación de expresiones faciales con una red neuronal de tipo Feed Forward, claramente se puede observar que el desempeño es mayor empleando Deep Learning, la diferencia radica esencialmente en que DL emplea mapas de características por convolución + ReLu y *Pooling*. Los resultados se pueden observar en la Tabla 4, donde la clasificación de expresiones faciales con una red neuronal de tipo Feed Forward fue de 87%.

La Tabla 5 muestra una comparativa en la exactitud del reconocimiento de expresiones faciales con otros métodos relacionados al estado del arte (redes neuronales convolucionales), tales como: AlexNet, VGGNet, GoogleNet, AdaGabor, 3D-CNN, SJMT, DMTL, y DDMTL.

Tabla 5. Comparativo - estado del arte.

Método	Exactitud en el entrena- miento	Exactitud en la valida- ción
AlexNet [26]	89.41%	91.21%
VGGNet [27]	90.33%	92.53%
GoogleNet [28]	91.90%	93.31%
AdaGabor [29]	91.07%	93.40%
3D-CNN [30]	93.53%	95.18%
SJMT [31]	93.39%	95.11%
DMTL [32]	93.51%	95.67%
Nuestro estudio	91.80%	95.70%

Las expresiones faciales empleadas en los trabajos de la Tabla 5 fueron: enojo, disgusto, miedo, felicidad, tristeza y sorpresa. Basado en los resultados, se demostró que DL puede tener efectos significativos en la clasificación automática de expresiones faciales.

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio, como recomendación, mencionamos que el número de muestras influye significativamente en el resultado (Szegegy et al., 2015), es decir una base de datos lo suficientemente densa, incrementa la exactitud en la clasificación, es por ello que continuamos enriqueciendo la base de datos. Así mismo, como recomendación, mencionamos que las muestras empleadas en nuestro estudio, únicamente presentan información relevante al rostro, es decir, la información visual como el cabello y el fondo, no es tomada en cuenta para la clasificación. Las capas que realizan la extracción de características son de tres tipos: Convolución, ReLu, y *Pooling* (Figura 6.6), los resultados prueban que dichas capas constituyen mapas de características confiables para la clasificación de expresiones faciales humanas, a diferencia de otros métodos de segmentación clásicos tales como (Aly et al., 2016; Saaidia et al., 2015). Finalmente, es importante mencionar que, para fortalecer los resultados, es necesario considerar más expresiones faciales (por ejemplo, la neutral) y la ejecución en tiempo real del modelo propuesto, estos aspectos se consideran como trabajos futuros.

10. REFERENCIAS

- Alabbasi, H. A., Moldoveanu, P., y Moldoveanu, A. (2015). Real Time Facial Emotion Recognition using Kinect V2 Sensor. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 17(3), 61–68. <https://doi.org/10.9790/0661-17326168>
- Aly, S., Abbott, A. L., y Torki, M. (2016). A multi-modal feature fusion framework for kinect-based facial expression recognition using Dual Kernel Discriminant Analysis (DKDA). *2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, WACV 2016*. <https://doi.org/10.1109/WACV.2016.7477577>
- Badar, P. B., y Shrawankar, U. (2013). *Human Mood Detection For Human Computer Interaction*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.1305.2827>
- Bodhi, S. R., y Naveen, S. (2015). Face Detection, Registration and Feature Localization Experiments with RGB-D Face Database. *Procedia Computer Science*, 46, 1778–1785. <https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2015.02.132>
- Chauhan, V., Agrawal, Y., Of, V. B.-I. J., y 2016, U. (2016). Emotion detection system using facial action coding system. *International Journal of Engineering and Technical Research (IJETR)*, 6(2). <https://www.academia.edu/download/54231816/IJETR042535.pdf>
- Corneanu, C. A., Simón, M. O., Cohn, J. F., y Guerrero, S. E. (2016a). Survey on rgb, 3d, thermal, and multimodal approaches for facial expression recognition: {History}, trends, and affect-related applications. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 38(8), 1548–1568.
- Corneanu, C. A., Simón, M. O., Cohn, J. F., y Guerrero, S. E. (2016b). Survey on RGB, 3D, Thermal, and Multimodal Approaches for Facial Expression Recognition: History, Trends, and Affect-Related Applications. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 38(8), 1548–1568. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2016.2515606>
- Correa, A. C., Salazar, A., Augusto, F., Ortiz, P., y Electrónico, I. (2013). Reconocimiento de rostros y gestos faciales mediante un análisis de relevancia con imágenes 3D. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 4(1), 7–20. <https://doi.org/10.19053/20278306.2563>
- Ekman, P. (1993). Facial expression and emotion. *American psychologist*, 48(4), 384. <http://files/218/Ekman - 1993 - Facial expression and emotion..pdf>
- Kim, P. (2017). Convolutional neural network. En *MATLAB deep learning* (pp. 121–147). Springer. http://files/231/978-1-4842-2845-6_6.html
- Liu, L. (2019). Human face expression recognition based on deep learning-deep convolutional neural network. *Proceedings - 2019 International Conference on Smart Grid and Electrical Automation, ICSGEA 2019*, 221–224. <https://doi.org/10.1109/ICSGEA.2019.00058>
- Pérez, E. C., Rodríguez, A. N., Torre, R. E. M. D. La, Danguillecourt, O. L., y Portela, J. R. D. (2012). Forecast of Wind Speed with a Backpropagation Artificial Neural Network in the Isthmus of Tehuantepec Region in the State of Oaxaca, Mexico. *Acta Universitaria*, 22, 7–14. <https://doi.org/10.15174/AU.2012.335>
- Saaidia, M., Zermi, N., y Ramdani, M. (2015). Facial Expression Recognition Using Neural

Network Trained with Zernike Moments. *Proceedings - 2014 4th International Conference on Artificial Intelligence with Applications in Engineering and Technology, ICAIET 2014*, 187–192. <https://doi.org/10.1109/ICAIET.2014.39>

Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V., y Rabinovich, A. (2015). Going deeper with convolutions. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 07-12-June-2015*, 1–9. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2015.7298594>

Viola, P., y Jones, M. (2001). Rapid object detection using a boosted cascade of simple features. *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1*. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2001.990517>

Ya, W., Bao, T., Chunhui, D., y Zhu, M. (2017). Face recognition in real-world surveillance videos with deep learning method. *2017 2nd International Conference on Image, Vision and Computing, ICIVC 2017*, 239–243. <https://doi.org/10.1109/ICIVC.2017.7984553>

BIBLIOTECA Y LIBRERIAS



BIBLIOTECA PÚBLICA DE LA UNIVERSIDAD DEL ISTMO

Se encuentra ubicada en el centro de la ciudad de Santo Domingo Tehuantepec, en un edificio de estilo colonial; cuenta con sala de lectura, préstamo de libros y revistas, sala de computo e internet gratuito, servicios de impresiones y fotocopiado, sala y equipo de proyección.

Brinda servicio a todo público, de lunes a viernes, en un horario corrido de 8:00 a 20:00 hrs.

Callejón Leona Vicario s/n, Barrio Laborío, Santo Domingo Tehuantepec, Oaxaca, Teléfono: 9717150948.

LIBRERÍAS UNIVERSITARIAS

La UNISTMO tiene tres librerías universitarias, cuenta con una gran variedad de publicaciones para nivel superior, medio superior, e incluso para el público infantil.

▶ Santo Domingo Tehuantepec: Callejón Leona Vicario s/n, Barrio Laborío, Centro. C.P. 70760, Teléfono: (01) 971 71 37838.

▶ Ciudad Ixtepec: Calle Nicolas Bravo, entre la calle corregidora y pensador mexicano.

▶ Juchitán de Zaragoza: Carretera Transísmica Juchitán - La Ventosa Km. 14, La Ventosa. C.P. 70102. Correo electrónico: lib_unistmo_juchitan@hotmail.com

INFORMES

Campus Tehuantepec

Ciudad Universitaria S/N, Barrio Santa Cruz
4a. Sección Sto. Domingo Tehuantepec
Oax., México C.P. 70760
Tel. 01 (971) 52 24050 Ext. 111 y 123
servesc@sandunga.unistmo.edu.mx

Campus Ixtepec

Carr. Chihuitan Ixtepec S/N
Ixtepec, Oax., México C.P. 70110
Tel. 01 (971)7127050 Ext. 212
servesc@bianni.unistmo.edu.mx

Campus Juchitán

Carretera Transísmica Juchitán - La Ventosa
Km. 14, La Ventosa, Oax., México C.P. 70102
servesc@sandunga.unistmo.edu.mx

