



- » Avances en el desarrollo de técnicas ópticas para la evaluación de perfiles aerodinámicos en álabes de aerogeneradores en la UNISTMO
- » Principales limitantes de las celdas solares basadas en el compuesto absorbedor SnS
- » El impacto de la amplitud de las ráfagas extremas de viento sobre el convertidor de potencia
- » Matriz de distancias mínimas entre lenguas
- » Riqueza del Golfo de México Profundo. Una solución a la decadencia de la producción nacional de crudo
- » Acceso a la energía eléctrica ¿Clave para la salvaguarda de derechos humanos?



#### REPRESENTANTES INSTITUCIONALES

Rectora  
María de los Ángeles Peralta Arias

Vice-rectora Académica  
Cora Silvia Bonilla Carreón

Vice-rector Administrativo  
Oscar Cortés Olivares

La Revista General UNISTMO es una publicación cuatrimestral editada por la Universidad del Istmo. Campus Tehuantepec, Cd. Universitaria s/n, Barrio Santa Cruz Tagolaba, 4ª Sección, Sto. Domingo Tehuantepec, Oaxaca. C.P. 70760. Tel. 971 522 40 50 / Campus Ixtepec, Carretera Ixtepec-Chihuitán, Ciudad Ixtepec, Oaxaca. C.P. 70110. Tel. 971 712 70 50 / Campus Juchitán, Carretera Transistmica Juchitán-La Ventosa, Km. 14, La Ventosa, Oaxaca. C.P. 70102, Tel. 971 712 70 50. [www.unistmo.edu.mx](http://www.unistmo.edu.mx), [contacto\\_revista@sandunga.unistmo.edu.mx](mailto:contacto_revista@sandunga.unistmo.edu.mx) / [contacto.revista.unistmo@gmail.com](mailto:contacto.revista.unistmo@gmail.com). Editor responsable: Isaac Montoya De Los Santos. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo (ISSN en trámite).

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



#### CONSEJO EDITORIAL

##### Director

Isaac Montoya De Los Santos  
Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

Xavier Mathew  
Universidad Nacional Autónoma de México

Nini Rose Mathews  
Universidad Nacional Autónoma de México

Maykel Courel Piedrahita  
Universidad de Guadalajara

Silver Hamill Turren Cruz  
Universitat Jaume I, España

Víctor Iván Moreno Oliva  
Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

Eduardo Campos Mercado  
Conacyt-Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

Daniel Pacheco Bautista  
Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

Jaime Torres Fragoso  
Universidad del Istmo, Campus Ixtepec

#### COMITÉ EDITORIAL

Juquila Araceli González Nolasco  
Universidad del Istmo, Campus Ixtepec

Antonio Salazar Campos  
Universidad del Istmo, Campus Ixtepec

Edwin Román Hernández  
Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

Edgar López Martínez  
Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

Edú Ortega Ibarra  
Universidad del Istmo, Campus Juchitán

#### DISEÑO EDITORIAL

Yuliana García Amaya  
Universidad del Istmo, Campus Tehuantepec

## SUMARIO

### ARTÍCULOS

---

- 5 **Avances en el desarrollo de técnicas ópticas para la evaluación de perfiles aerodinámicos en álabes de aerogeneradores en la UNISTMO**  
Gabriel Castillo-Santiago, Víctor Iván Moreno Oliva, Edwin Román Hernández, Jaime Peña Antonio, Eduardo Pérez Chaltell, Gabriel Villaseñor Castro
- 11 **Principales limitantes de las celdas solares basadas en el compuesto absorbedor SnS**  
Maykel Courel, F.J. Sánchez-Rodríguez, Karina G. Osorio, I. Montoya De Los Santos
- 17 **El impacto de la amplitud de las ráfagas extremas de viento sobre el convertidor de potencia**  
Gregorio Martínez Reyes, Emmanuel Hernández Mayoral, Carlos Javier Martínez Hernández, Efraín Dueñas Reyes
- 25 **Matriz de distancias mínimas entre lenguas**  
Mario Ramírez Mendoza, Mario Arciga Alejandre
- 33 **Riqueza del Golfo de México Profundo. Una solución a la decadencia de la producción nacional de crudo**  
Luis Guillermo Herrera Morales
- 49 **Acceso a la energía eléctrica ¿Clave para la salvaguarda de derechos humanos?**  
Lorena Higareda Magaña

# Carta Editorial

En un mundo en constante transformación, donde los avances científicos y tecnológicos definen nuestra manera de vivir, es imperativo contar con fuentes de información que nos guíen y nos inspiren en este viaje hacia el futuro. En este contexto, surge la “Revista General Unistmo”, una publicación multidisciplinaria que nos sumerge en el apasionante mundo de las ciencias exactas, sociales y tecnológicas.

En un momento en que los problemas globales requieren soluciones integrales, la revista se erige como un espacio donde las ideas se entrelazan para formar un tapiz de comprensión profunda y rica. La “Revista General Unistmo” no se limita a explorar las profundidades de las matemáticas y la física, sino que también se aventura en los misterios de las ciencias sociales y en las maravillas de la innovación tecnológica. Este enfoque audaz y sin miedo alienta a los lectores a desafiar las convenciones y a abrazar la exploración de múltiples perspectivas.

En un mundo inundado de información, es un alivio contar con una revista que se erige como faro de rigor y veracidad. Cada artículo, cada estudio presentado en la “Revista General Unistmo” ha sido sometido a un escrutinio minucioso y a un proceso de revisión riguroso. Esto garantiza que los lectores tengan acceso a información confiable y fundamentada, en un momento en que la desinformación se esconde en las sombras de la era digital.

En conclusión, la “Revista General Unistmo” no es simplemente una revista, es un puente entre disciplinas aparentemente dispares, un catalizador de descubrimientos y un espacio donde las ideas convergen y se entrelazan. Al abrir sus páginas, nos embarcamos en un viaje fascinante y enriquecedor a través de los diversos paisajes del conocimiento, recordándonos que la interconexión de las ciencias exactas, sociales y tecnológicas son el motor que impulsa la innovación y nos acerca a un futuro más brillante y comprensivo.

Sus aportaciones serán recibidas a los correos:  
[contacto.revista.unistmo@gmail.com](mailto:contacto.revista.unistmo@gmail.com)  
[contacto\\_revista@sandunga.unistmo.edu.mx](mailto:contacto_revista@sandunga.unistmo.edu.mx)

¡Gracias por su atención!

Atentamente

**Isaac Montoya De Los Santos**  
**Director de la Revista General Unistmo**

# Avances en el desarrollo de técnicas ópticas para la evaluación de perfiles aerodinámicos en álabes de aerogeneradores en la UNISTMO

Gabriel Castillo-Santiago\*  
Víctor Iván Moreno Oliva  
Edwin Román Hernández  
Jaime Peña Antonio  
Eduardo Pérez Chaltell  
Gabriel Villaseñor Castro

Instituto de Estudios de la Energía  
Universidad del Istmo

Correspondencia:  
\*gabrielcsan@gmail.com

**Palabras Clave:**  
Óptica geométrica, Perfil aerodinámico,  
Metrología, Triangulación láser

## RESUMEN

Se presentan métodos ópticos para reconstruir perfiles aerodinámicos en álabes para aerogeneradores de baja potencia, así como una propuesta para evaluar la deflexión, desarrollados en el Laboratorio de Óptica Aplicada de la UNISTMO. La reconstrucción de los perfiles se realiza con un proceso de triangulación láser, regular o en sistema estéreo, el perfil reconstruido se puede interpretar como una nube de puntos en 2D o 3D, útil para evaluar sus coeficientes aerodinámicos con software especializado, así como para medir la desviación de su forma ideal. La deflexión se puede evaluar al realizar un proceso de calibración, que es capaz de medir el movimiento de una marca particular colocada en el álabe en cuestión, esta distancia se relaciona con el desplazamiento en una dirección determinada. Es importante comentar que estos procesos son de bajo costo en implementación.

## ABSTRACT

Optical methods are presented to reconstruct aerodynamic airfoils in blades for low power wind turbines, as well as a proposal to evaluate deflection, developed in the Applied Optics Laboratory of UNISTMO. The reconstruction of the profiles is carried out with a laser triangulation process, regular or in a stereo system, the reconstructed profile can be interpreted as a cloud of points in 2D or 3D, useful to evaluate its aerodynamic coefficients with specialized software, as well as to measure deviation from its ideal shape. The deflection can be evaluated by performing a calibration process that is capable of measuring the movement of a particular mark placed on the blade in question, this distance being related to displacement in a given direction. It is important to comment that these processes are low cost in implementation.

## 1. Introducción

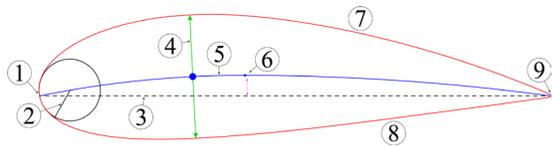
Para obtener la máxima eficiencia en un aerogenerador, los álabes requieren formas y perfiles aerodinámicos específicos, por lo que el proceso de fabricación requiere técnicas de medición y evaluación. Existen variados métodos de metrología para garantizar que los perfiles aerodinámicos tengan los parámetros esperados, algunos usan mediciones de máquinas especializadas (CMM) [1], que es un método confiable de medición de perfiles, tiene la mayor precisión y la capacidad de probar perfiles con formas complejas. Otro método es el radar láser (LR) [2] utilizado en para evaluar perfiles en la producción de álabes de aerogeneradores marinos. La fotogrametría [3] permite una representación 3D de un objeto a partir de un grupo de fotografías tomadas en múltiples ángulos, se puede aplicar a objetos grandes y tiene la ventaja

de la portabilidad, su principal desventaja es la baja sensibilidad y necesita una segunda referencia a escalas válidas. La triangulación láser es un proceso muy utilizado en técnicas de metrología relacionadas con imágenes [4-7], se basa en la proyección de luz estructurada, un objeto bajo prueba y una cámara. La luz estructurada, generalmente una línea recta, cambia de forma en la perspectiva del sensor en relación con el objeto bajo prueba, estas variaciones se pueden medir como desplazamientos laterales de puntos. Además, la velocidad de medición es rápida y flexible, por lo que existe una amplia gama de aplicaciones en la inspección y el control de calidad del proceso de producción. Haciendo uso de las capacidades de la triangulación láser, proponemos un método de monitoreo de deflexión para álabes en operación, de una manera satisfactoria, económica y

confiable. Las deflexiones tienen múltiples orígenes, por ejemplo, cuando existe una diferencia de masa entre los álabes se sufre un desequilibrio rotacional o cuando la góndola sufre de inclinación cambiando el eje de rotación de todos los álabes.

## 2. Perfiles Aerodinámicos

Existen variedad de perfiles aerodinámicos, no exclusivamente para fines de recurso eólico [8,9] de una gama tan amplia, podemos centrar nuestro interés en la serie NACA de 4 dígitos, de la cual por podemos elegir un ejemplar particular, el NACA 4424 para describir las partes geométricas más importantes, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1.** Partes importantes en un perfil aerodinámico: 1. Borde de ataque, 2. Radio de curvatura del borde de ataque, 3. Cuerda, 4. Espesor máximo, 5. Línea de curvatura media, 6. Ordenada máxima de la línea de curvatura a media, 7. Extradós, 8. Intradós, 9. Borde de salida.

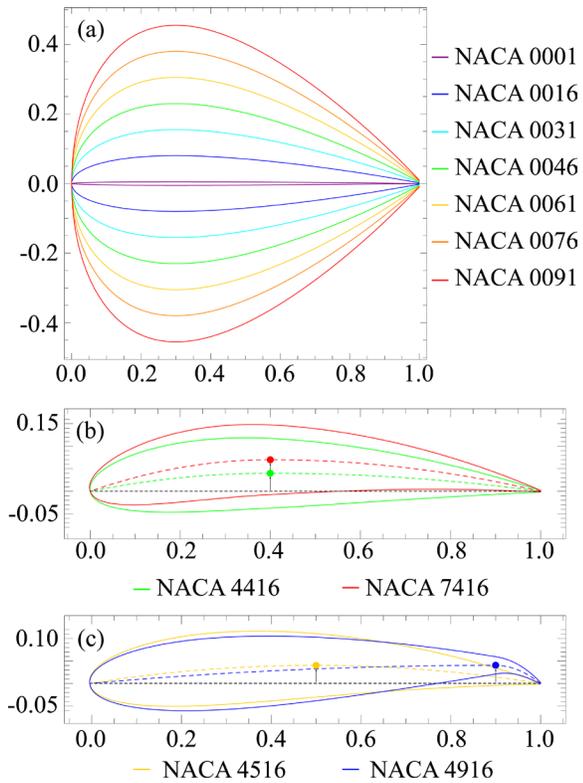
Fuente: Elaboración propia.

El primer dígito especifica el camper máximo en porcentaje de la cuerda, también llamado término  $m$ , el segundo dígito o factor  $p$ , indica la posición de el camper máximo en décimas de la cuerda y los dos últimos dígitos representan el espesor máximo en porcentaje de la cuerda, o factor  $t$ . Una representación esquemática de variar estos parámetros se muestra en la Figura 2. En total, matemáticamente podemos obtener 8019 perfiles aerodinámicos, sin embargo, no todos tienen utilidad de ningún tipo. Existen reportados 78 tipos de NACA de cuatro dígitos [10] y en particular en el recurso eólico podemos encontrar aproximadamente 28 [11].

El modelo NACA 4424 en la Figura 1 por ejemplo, tiene un espesor máximo del 24%, con camper del 4% colocado al 40% de la cuerda.

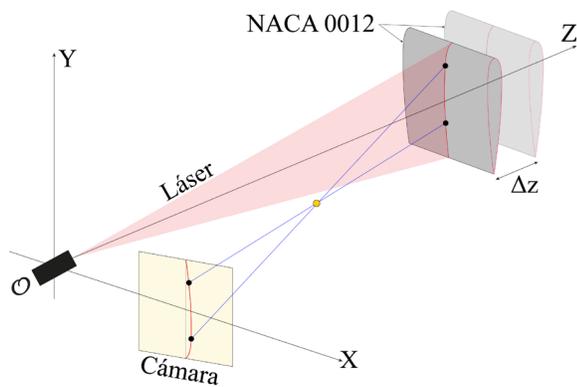
## 3. Pruebas ópticas en perfiles

En la necesidad humana de medir la forma de los instrumentos surgió la metrología óptica, cuyas aplicaciones son muy versátiles [12,13]. En este trabajo nos centraremos en la evaluación de la forma geométrica de los perfiles aerodinámicos utilizando la triangula-



**Figura 2.** (a) Variación del espesor máximo  $t$ , últimos dos dígitos. (b) Variación de  $m$ , primer dígito. (c) Variación de  $p$ , segundo dígito. Fuente: Elaboración propia.

ción óptica y algunas de sus variantes. En la Figura 3 podemos ver el principio básico, tenemos un perfil a evaluar cuya forma geométrica ideal puede o no ser conocida, un láser y una cámara, el láser viajará en línea recta hasta toparse con el perfil, entonces iluminará en él, una línea de color rojo, u otro color que se esté utilizando, la cámara observará esta línea, si el perfil fuera un plano la vería recta, pero como el



**Figura 3.** Esquema de triangulación óptica para la evaluación de perfiles aerodinámicos. Fuente: Elaboración propia.

perfil tiene una forma curva, la cámara observará una deformación en consecuencia de dicha curva. Si procedemos a tomar una fotografía y procesarla, podemos evaluar la forma de la superficie, ya sea por reconstrucción geométrica o utilizando un proceso de calibración.

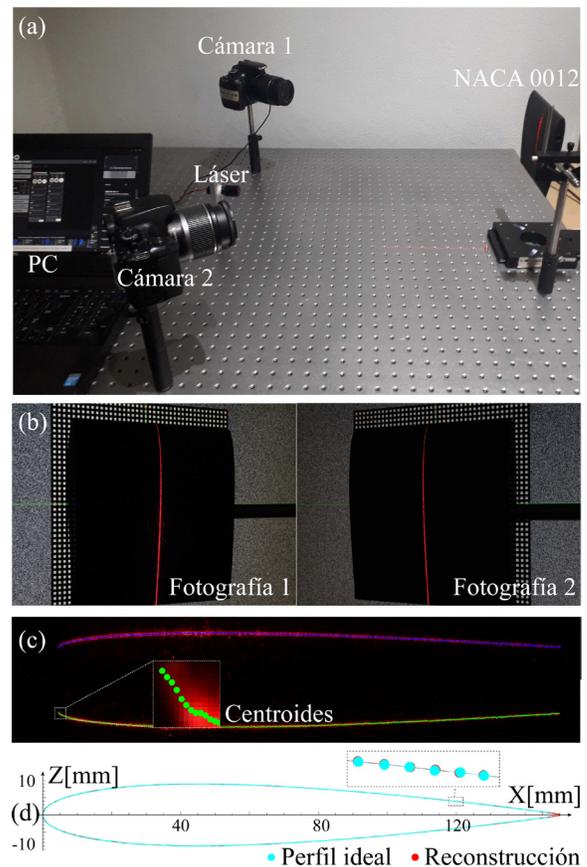
### 3.1 Sistema estéreo

Existen situaciones en que la pieza a evaluar es muy compleja o que una sola cámara no puede abarcar toda el área deseada, ya sea por cuestiones de espacio o de la capacidad de los dispositivos. Para solucionar ese tipo de problemas, implementamos el arreglo experimental estéreo, que es básicamente una triangulación simultánea utilizando dos cámaras. Como podemos observar en la fotografía de la Figura 4 (a), tenemos un láser apuntando hacia el álabe e ilumina el perfil aerodinámico en cuestión, dos cámaras observando el mismo punto, pero en posiciones diferentes, y finalmente una computadora que nos permite tomar fotografías de forma automática, cabe mencionar que en este método la alineación del sistema es muy importante.

En la Figura 4 (b) se muestran las dos fotografías encontradas, como se puede ver, a pesar de ser el mismo objeto, pareciera que están inclinadas hacia un lado preferente, sin embargo, después de un procesamiento de imágenes, que se resume en la Figura 4 (c) podemos obtener información de cada línea roja deformada sintetizada en forma de centroides. Finalmente, transformando la información al espacio bidimensional o tridimensional según sea el caso, podemos reconstruir la forma de un perfil completo como se muestra en la Figura 4 (d), esto, sin embargo, implica un movimiento mecánico en la pieza bajo prueba, ya que las cámaras necesitan observar el álabe completo para poder reconstruirlo. La reconstrucción por sistema estéreo, incluyendo la resolución de la disparidad en las fotografías, nos ha brindado una precisión de 0.06 mm.

## 4. Calibración óptica

Otro método para reconstruir superficies cuya forma desconocemos, es la proyección de franjas, a grandes rasgos es utilizar un sistema que pueda desplegar imágenes sobre una superficie, como lo es un proyector, dicho sistema despliega franjas sobre un objeto



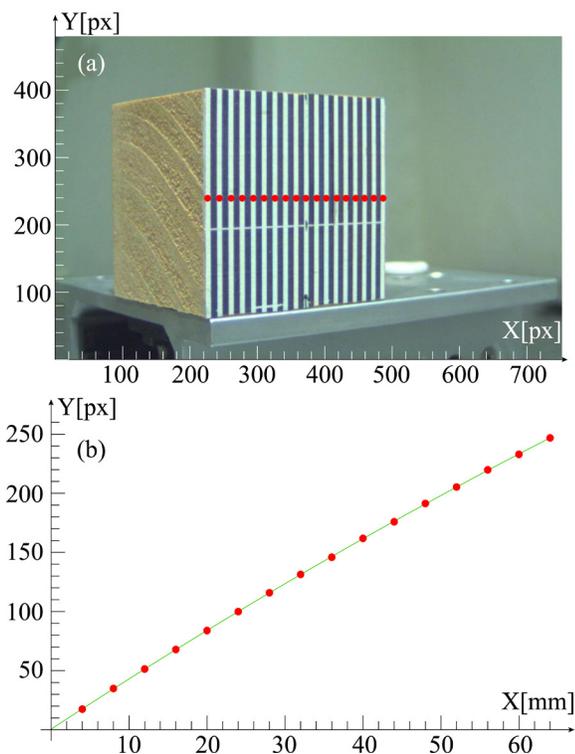
**Figura 4.** Esquema de triangulación para la evaluación de perfiles aerodinámicos.  
Fuente: Elaboración propia.

desconocido, se toma una fotografía y se analiza por computadora, el método más utilizado para procesar dichas imágenes es el corrimiento de fase [14], es muy robusto, sin embargo, requiere el uso de algoritmos complejos para su correcta implementación. En esta sección proponemos una variación de la triangulación, ya que desplegaremos franjas, pero las analizaremos por un sistema de calibración mediante el procesamiento de imágenes. Iniciando con la Figura 5 (a) tenemos una fotografía de un objeto geométrico conocido, un cubo, que a su vez tiene franjas en una de sus caras, si bien estas franjas pueden ser desplegadas por un objeto electrónico, también se puede realizar este análisis con una pieza de papel adherida en una superficie.

Por medio de software especializado o incluso software de libre acceso podemos encontrar la posición en píxeles de cada centro de cada franja y la separación entre ellas, en un espacio definido por la misma fotografía. Como el cubo es conocido, tam-

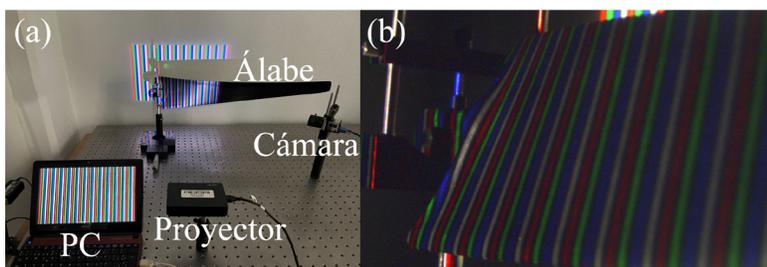
bién lo es la separación real en milímetros que hay entre cada franja, en este caso, la pieza de papel se imprimió con franjas claras separadas cuatro milímetros entre ellas, con la información de la separación en píxeles de la Figura 5 (a) y el conocimiento a priori de la separación en milímetros, podemos graficar la Figura 5 (b), donde podemos observar la distribución en el eje X para los milímetros, comparados en el eje Y con los píxeles equivalentes. Esta relación puede ser lineal o algún orden superior, por lo cual se realiza un ajuste, esto es, obtener una curva matemática, usualmente un polinomio, que relacione las variables en milímetros y píxeles, con ello calcular cualquier valor de separación siempre y cuando esté dentro o cerca del rango seleccionado, dicho proceso se llama interpolación o regresión lineal.

Este método nos puede ayudar a reconstruir múltiples perfiles aerodinámicos a la vez, como se propone en la Figura 6, donde se puede observar como se despliegan franjas diseñadas por computadora por medio de un proyector, el procesamiento de dicha imagen nos dará la forma geométrica de los perfiles. Por último presentamos una propuesta para medir la deflexión en álabes estáticos o en operación, el método consiste en una variación de la triangulación óptica que hemos venido presentando a lo largo de este artículo. La deflexión es la desviación que sufre el álabe completo de su forma prediseñada cuando se encuentra instalado en la góndola, las causas pueden ser variadas pero principalmente debido la fuerza del viento o cargas sobre la pieza. Es posible pero poco práctico montar un sistema de franjas en un álabe completo para poder seguir el desplazamiento que conlleva la deflexión, por ello proponemos realizar el seguimiento de un solo punto de interés, cuyo movimiento podrá ser percibido en tiempo real. Empezando por la Figura 7 (a), se muestra una pantalla de un celular el cual despliega una serie de puntos, es importante mencionar que puede utilizarse cualquier dispositivo con una pantalla como una tablet, televi-

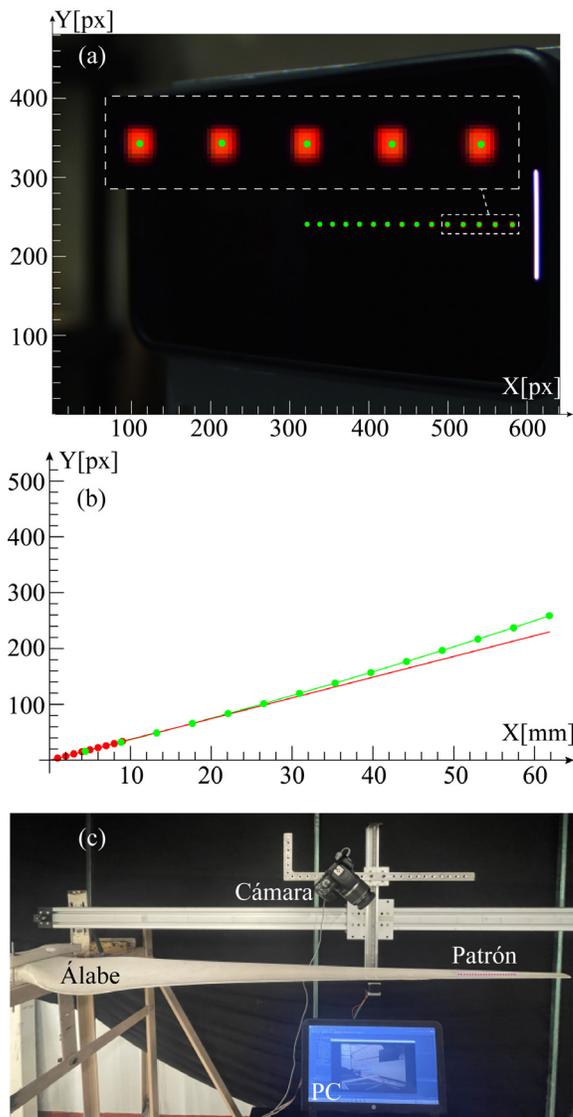


**Figura 5.** (a) Posición en píxeles de los centros de cada franja. (b) Relación en forma de ajuste de la separación de franjas en milímetros contra píxeles.  
Fuente: Elaboración propia.

sor, monitor, etc., dichos puntos los podemos colocar en el espacio de la fotografía y calcular sus centros, lo interesante de utilizar un dispositivo electrónico es que podemos desplegar un video e ir tomando fotografías a periodos controlados. Otra ventaja es que podemos asegurar que los píxeles desplegados en las pantallas medirán una distancia establecida con error mínimo en orden de fracciones de micrómetros. En la Figura 7 (b) se muestran dos gráficas de calibración, los puntos verdes representan una calibración por dispositivo electrónico, los puntos rojos, representan una calibración por desplazamientos mecánicos realizados mediante una platina de desplazamiento con espacios de 1 mm. Después de un análisis numérico para ambas resultó que el ajuste lineal es mejor para



**Figura 6.** (a) Propuesta para la evaluación de múltiples perfiles aerodinámicos por proyección de franjas de colores. (b) Fotografía de las franjas deformadas en el álabe.  
Fuente: Elaboración propia.



**Figura 7.** (a) Arreglo para calibración dinámica. (b) Curva de calibración comparando dinámica (verde) y mecánica (rojo). (c) Implementación para medir deflexión en condiciones de laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

desplazamientos cortos, sin embargo, para desplazamientos largos colocados en forma continua como franjas o calibración dinámica en dispositivos electrónicos, se requiere un ajuste de segundo o tercer orden, ya que, el patrón se aleja del centro de la cámara al estar todo al mismo tiempo en la misma imagen.

En el caso de álabes en operación, se colocaría una marca en cada álabe, ya sea física o un punto láser desplegado desde la góndola, al estarse moviendo debemos tomar fotografías cuando cada uno pase por cierta posición en la cual la cámara los pueda observar, si hubiera una deflexión este punto se iría desplazando en concordancia con el resto de álabes,

o bien se puede realizar una comparación de la posición ideal con la posición actual de cada uno de ellos. En la Figura 7 (c) podemos ver una implementación con un álabe en condiciones de laboratorio.

## Conclusiones

El método de triangulación óptica es muy eficiente y flexible para evaluar formas geométricas por medio de calibración o caracterización de los sistemas ópticos involucrados. Se puede utilizar una fuente de luz estructurada como el láser, o un sistema de proyección, la cámara puede ser de uso comercial o especializada para metrología, no requiere grandes capacidades de cálculo para arrojar resoluciones de fracciones de milímetro. La evaluación de perfiles aerodinámicos se puede realizar de forma rápida e incluso en tiempo real, utilizando variantes de la triangulación. La calibración se puede realizar con cualquier patrón, ya sea impreso, digital, proyectado o una línea láser incidiendo en un perfil aerodinámico. La calibración por desplazamientos mecánicos tiene la ventaja de requerir un ajuste lineal que facilita la interpolación y cálculo, la desventaja es que no es precisa para desplazamientos mayores a pocos centímetros, la calibración por proyección dinámica o estática requiere un cálculo de segundo o tercer orden, pero su funcionamiento abarca varios centímetros sin problema y se puede realizar con una sola fotografía o video.

## Referencias

- [1] Chang, H. C. & Lin, A. C. (2005). Automatic inspection of turbine blades using a 3-axis CMM together with a 2-axis dividing head. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26(7-8), 789-796. <https://doi.org/10.1007/s00170-003-1877-6>
- [2] Summers, A., Wang, Q., Brady, N. & Holden, R. (2016). Investigating the measurement of offshore wind turbine blades using coherent laser radar. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 41, 43-52. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2016.02.007>
- [3] Mikerov, M., Shrestha, R., van Dommelen, P., Mittleman, D. M. & Koch, M. (2020). Analysis of ancient ceramics using terahertz imaging and photogrammetry. *Optics Express*, 28(15), 22255. <https://doi.org/10.1364/oe.399336>
- [4] Moreno- Oliva, V. I., Román- Hernández, E., Torres- Moreno, E., Dorrego- Portela, J. R., Avendaño- Alejo, M., Campos- García, M. & Sánchez- Sánchez, S. (2019). Measurement of quality test of aerodynamic profiles in wind turbine blades using laser triangulation technique.

- Energy Science & Engineering, 7(5), 2180-2192. <https://doi.org/10.1002/ese3.423>
- [5] Ye, Z., Lianpo, W., Yonggang, G., Songlin, B., Chao, Z., Jiang, B. & Ni, J. (2018). Three-Dimensional Inner Surface Inspection System Based on Circle-Structured Light. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 140(12). <https://doi.org/10.1115/1.4041480>
- [6] Sansoni, G., Trebeschi, M. & Docchio, F. (2009). State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation. *Sensors*, 9(1), 568-601. <https://doi.org/10.3390/s90100568>
- [7] Zhang, H., Ren, Y., Liu, C. & Zhu, J. (2014). Flying spot laser triangulation scanner using lateral synchronization for surface profile precision measurement. *Applied Optics*, 53(20), 4405. <https://doi.org/10.1364/ao.53.004405>
- [8] Abbott, I. H. & Doenhoff, V. A. E. (1959). *Theory of Wing Sections: Including a Summary of Airfoil Data*. Dover Publications.
- [9] Flores Galindo. (2006). *Diseño de perfiles aerodinámicos* [Tesis]. Instituto Politécnico Nacional.
- [10] NACA Airfoils. (s. f.). NASA. <https://www.nasa.gov/image-feature/langley/100/naca-airfoils/>
- [11] NACA 4 digit airfoil generator (NACA 2412 AIRFOIL). (s. f.). <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>
- [12] Marrugo, A. G., Gao, F. & Zhang, S. (2020). State-of-the-art active optical techniques for three-dimensional surface metrology: a review [Invited]. *Journal of the Optical Society of America A*, 37(9), B60. <https://doi.org/10.1364/josaa.398644>
- [13] Osten, W. (2018). Optical metrology: the long and unstopable way to become an outstanding measuring tool. *Speckle 2018: VII International Conference on Speckle Metrology*. <https://doi.org/10.1117/12.2322533>

# Principales limitantes de las celdas solares basadas en el compuesto absorbedor SnS

Maykel Courel<sup>1\*</sup>  
F.J. Sánchez-Rodríguez<sup>2</sup>  
Karina G. Osorio<sup>1</sup>  
I. Montoya De Los Santos<sup>3</sup>

Correspondencia:  
\*maykel.courel@academicos.udg.mx

**Palabras Clave:**  
SnS, celdas solares, SCAPS, defectos  
interfaciales/volumétricos

## RESUMEN

El SnS es un material atractivo para aplicaciones fotovoltaicas. Este material absorbedor está constituido por elementos que presentan una alta abundancia en la corteza terrestre y que no son tóxicos. Sin embargo, todavía existen varios retos a considerar a fin de obtener una eficiencia superior al 20% en este tipo de tecnología. En este trabajo se presenta el análisis de una celda solar CdS/SnS a fin de entender los principales factores que limitan esta tecnología. Se demuestra que los defectos de volumen y en la intercara CdS/SnS juegan un papel fundamental en el desempeño del dispositivo.

## ABSTRACT

SnS is an attractive material for photovoltaic applications. This absorber material is composed of elements that are highly abundant in the Earth's crust and are non-toxic. However, there are still several challenges to consider in order to achieve an efficiency higher than 20% in this type of technology. This work presents the analysis of a CdS/SnS solar cell in order to understand the main factors that limit this technology. It is demonstrated that volume defects and defects at the CdS/SnS interface play a fundamental role in the device performance.

<sup>1</sup> Centro Universitario de los Valles (CUValles). Universidad de Guadalajara

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas. Universidad Autónoma de Sinaloa

<sup>3</sup> Instituto de Estudios de la Energía. Universidad del Istmo

## 1. Introducción

El incremento de la población mundial juntamente con el aumento de la demanda energética mundial para continuar satisfaciendo el modo de vida actual, establecen la necesidad de emigrar a fuentes de energía no convencionales tales como las renovables. Entre los distintos tipos de energías renovables, la energía solar constituye un candidato atractivo al considerar la cantidad de energía que incide sobre la superficie de la Tierra en cada segundo, así como el tiempo de vida del Sol. De hecho, solo una pequeña porción de la energía proveniente del Sol que llega a la superficie terrestre sería potencialmente capaz de suplir la necesidad energética de las futuras generaciones de seres humanos. Dentro de las distintas variantes de aprovechamiento de la energía solar, las celdas solares constituyen un dispositivo que permiten la transformación de la energía solar en electricidad de manera directa. La obtención de la energía eléctrica al incidir luz en las celdas solares es el resultado de la absorción de las partículas provenientes del Sol

llamadas fotones por los materiales absorbedores, creándose de esta manera un par electrón-hueco por cada fotón absorbido, siendo el electrón de carga negativa y el hueco de carga positiva; posteriormente, los pares electrón-hueco al ser separados y recolectados originan un voltaje. De esta manera se tiene el efecto fotovoltaico, es decir, la incidencia de luz genera un voltaje.

El silicio (Si) es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y presenta propiedades semiconductoras, puesto que ha sido descrito por un ancho de zona prohibida de 1.14 eV. Al ser reconocido como el elemento madre de la microelectrónica, se tiene que la producción de paneles fotovoltaicos que domina el mercado está basada en Si; sin embargo, este material presenta una baja absorción de fotones debido a la naturaleza indirecta de ancho de zona prohibida en donde además de la presencia de un fotón con igual energía del ancho de zona prohibida se requiere de la intervención de una segunda partícula llamada fonón, producto de las vibraciones de la

red cristalina. Como resultado del bajo coeficiente de absorción de fotones del silicio, en la producción de las celdas solares se presenta la necesidad de utilizar mayores espesores del material, lo cual resulta en un encarecimiento de los costos de producción. Por otra parte, los procesos experimentales requeridos para la obtención de las celdas solares de silicio son bastantes costosos, los cuales van de la extracción del silicio, su purificación para la formación de las obleas, para su posterior impurificación de tipo p y n mediante procesos de difusión, a fin de obtener la unión p-n requerida para el efecto fotovoltaico. De esta forma, el uso de una mayor cantidad de material, así como el empleo de procesos más complejos conllevan al encarecimiento del costo del dólar por watt pico de esta tecnología. A fin de que la población pueda tener el acceso a una tecnología fotovoltaica más barata, diversos grupos de investigación a nivel global se han enfocado en la búsqueda de nuevos materiales semiconductores que cumplan con las características adecuadas para ser aplicado como absorbedor en celdas solares. Dentro de estas características se espera que el material tenga conductividad tipo p, un ancho de zona prohibida cercano a 1.4 eV y un mayor coeficiente de absorción respecto al silicio. Los materiales CdTe y  $\text{CuInGaSe}_2$  (CIGS) han sido propuestos y muy estudiados para reemplazar la tecnología de celdas solares de Si. En este tipo de celdas, han sido alcanzadas eficiencias de conversión energética mayores al 20%; sin embargo, la poca abundancia de elementos tales como Te, In y Ga en la corteza terrestre, así como la toxicidad del Cd han sido los principales obstáculos para el escalamiento de esta tecnología. Como resultado de esto, existen en la actualidad diversas líneas de investigación enfocadas al estudio y aplicación en celdas solares de materiales basados en elementos de alta abundancia y poca toxicidad. La familia de las kesteritas, perovskitas, calcogenuros de estaño y calcogenuros de antimonio se encuentran dentro de estas propuestas que siguen siendo estudiadas. En particular, el compuesto sulfuro de estaño (SnS) constituye un material potencial para aplicaciones fotovoltaicas.

El material semiconductor SnS presenta una cristalinidad ortorrómbica y ha sido de gran interés para la comunidad científica debido a que presenta las propiedades adecuadas para aplicaciones foto-

voltaicas. De hecho, este material tiene un ancho de zona prohibida de 1.1 eV -1.5 eV caracterizado por sus transiciones directas entre interbandas y, por lo tanto, puede ser usado como material absorbedor en celdas solares debido a su alto coeficiente de absorción (Jae Yu Cho et al, 2020). Además, este material no es tóxico y está basado en elementos abundantes en la naturaleza. Otra característica de este compuesto es la facilidad de depositar películas delgadas mediante técnicas de bajo costo en comparación a las tradicionales de silicio. La obtención de las películas delgadas de SnS ha sido posible mediante las siguientes técnicas: evaporación térmica (M. Ganchev et al, 2016), erosión catódica (Katy Hartman et al, 2011) y depósito por baño químico (Ocampo Ortega C. et al, 2022). En cuanto a la aplicación de este material en celdas solares, en el año 2006, Ramakrishna et al reportaron la celda solar con configuración CdS/SnS usando la técnica de rocío pirolítico con una eficiencia de 1.3% (K. T. Ramakrishna et al, 2006). Posteriormente, P. Sinsermsuksakul et al. en el año 2014, lograron una eficiencia del 4.36%, el cual constituye hasta la actualidad la mayor eficiencia obtenida para este tipo de celdas (P. Sinsermsuksakul et al, 2014).

Para promover la eficiencia de este tipo de celdas a valores mayores del 20% como se han obtenido en celdas de CdTe Y CIGS, se requieren análisis tanto experimentales como teóricos para una mejor comprensión de los fenómenos. En particular, el modelado y la simulación de las celdas solares constituyen un enfoque atractivo para comprender el comportamiento de los dispositivos. Si bien las rutas experimentales implican una inversión de materiales y tiempo para estudiar una posible tendencia de los parámetros de la celda solar con alguna modificación de las condiciones experimentales, la herramienta de simulación proporciona una ruta más fácil para estudiar el efecto de tales modificaciones experimentales en el rendimiento del dispositivo, garantizando una reducción del material y del tiempo invertidos. Sin embargo, la simulación precisa que da como resultado la predicción correcta del rendimiento del dispositivo depende de los resultados experimentales reportados para los parámetros microscópicos. Como resultado, la reproducción precisa de los datos experimentales reportados para las celdas solares tradicionales es un primer paso importante.

## 2. Estructura de la celda solar CdS/SnS

Existen muchas configuraciones para la construcción de una celda fotovoltaica, en las cuales se pueden variar algunos componentes. Una celda fotovoltaica está constituida principalmente por materiales semiconductores tipo-p, tipo-n, contacto metálico, resistencia, y en muchos casos una capa antirreflejante. En la construcción de una celda solar, comúnmente se utilizan dos configuraciones, siendo las mismas de sustrato y superestrato. En la configuración de sustrato, se parte del material utilizado como sustrato para el depósito del contacto trasero de la celda solar, seguido del depósito del material absorbedor tipo p y posteriormente de los materiales tipo n tales como la capa llamada búfer y capa ventana. En el caso de la configuración superestrato, se considera primeramente el depósito de la capa ventana sobre el sustrato, seguido por la capa búfer para poder posteriormente depositar el material absorbedor tipo p y finalmente el contacto metálico para completar el dispositivo. Experimentalmente el uso de la estructura sustrato o superestrato dependerá tanto de las temperaturas bajo las cuales sea necesario procesar y cristalizar el material absorbedor, así como los tiempos necesarios para este proceso. En particular, si durante la fabricación de las celdas el material absorbedor requiere someterse a altas temperaturas durante tiempos prolongados y el material tipo n es previamente depositado (estructura superestrato), se correría el riesgo de perder la calidad de la unión p-n por procesos de interdifusión de elementos durante el tratamiento térmico, de ahí que sea más conveniente usar la estructura de celda de sustrato.

En la Figura 1 se muestra un diagrama esquemático de una celda solar típica de CdS/SnS fabricada considerando la estructura de sustrato. El absorbedor, que en este caso es SnS, constituye el material más importante en la celda solar, el cual requiere tener ciertas propiedades eléctricas, electrónicas, y ópticas fundamentales para el funcionamiento de la celda solar. Este material debe ser capaz de generar electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia producidos por la absorción de fotones del espectro de radiación solar. Estos portadores de cargas llamados electrones y huecos generados por la incidencia de luz, deben ser primeramente separados

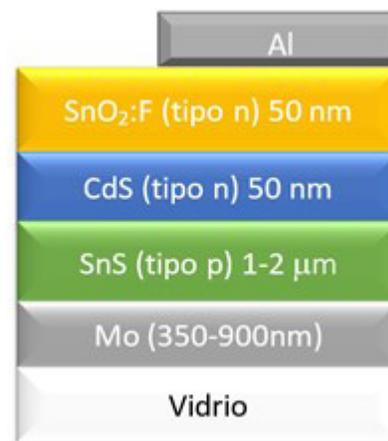


Figura 1. Estructura de celda solar basada en el compuesto SnS.

por el campo eléctrico presente en la unión p-n, el cual es el que produce el efecto fotovoltaico, para ser recolectados posteriormente por los contactos. Por otra parte, los materiales búfer y ventana requieren de propiedades específicas, las cuales ayuden a la creación de los pares electrón-hueco libres presentes por el efecto fotovoltaico en el material absorbedor. Estos materiales son semiconductores tipo-n intrínsecos; en ocasiones también se mejora su población de donores por medio de impurificaciones, los cuales forman un papel fundamental en la celda solar. Para la elección de un material búfer y ventana óptimos, se debe tener en cuenta dos características fundamentales: la primera es que su ancho de zona prohibida debe ser superior a 2.2 eV, dejando pasar así gran cantidad de fotones incidentes a la celda solar para ser absorbidos en el material tipo-p, y la segunda característica fundamental en el momento de elegir un material semiconductor tipo-n para la celda solar es que debe tener una alta conductividad con respecto al material absorbedor, buscando que la mayor parte de la zona empobrecida de carga se encuentre en el material semiconductor absorbedor para que se produzca la separación de cargas de manera más eficiente. Por último, los contactos de la celda solar se componen por el contacto posterior y el contacto frontal, los cuales son materiales conductores utilizados en los extremos de la celda, proporcionando electrodos necesarios para extraer la carga producida por el efecto fotovoltaico presente en la celda solar. Los materiales utilizados para esta función tienen que producir pérdidas eléctricas y ópticas mínimas, por lo cual para el contacto frontal son comúnmente utilizados los óxidos

conductores transparentes (TCO, por sus siglas en inglés) que consisten en semiconductores degenerados; estos materiales son utilizados para maximizar la entrada de luz sin entorpecer la conducción necesaria de los electrodos. Estos materiales deben ser de alta transparencia dado que la absorción en estos semiconductores se logra mediante el dopaje, por lo que existe una compensación entre la conductividad y la transmisión de luz. Los materiales comúnmente utilizados para esto son el óxido de indio y estaño (ITO por sus siglas en inglés), y el óxido de estaño dopado con flúor (FTO por sus siglas en inglés).

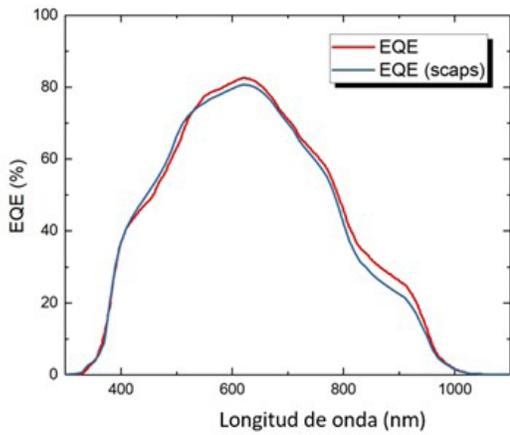
### 3. Modelado teórico de la celda solar

Los estudios teóricos ayudan a entender el comportamiento de la celda solar. Las simulaciones se llevaron a cabo mediante un simulador de celdas solares en una dimensión (SCAPS-1D por sus siglas en inglés), considerando un espectro solar de AM1.5G y a temperatura ambiente (300 K o 24 °C). En particular, SCAPS consiste en una aproximación numérica, la cual resuelve las ecuaciones tradicionales de los semiconductores y uniones, junto a las condiciones de frontera, obteniendo una respuesta numérica a diferentes parámetros de importancia del dispositivo. En el caso del presente trabajo, los resultados de densidad de corriente-voltaje (J-V) y eficiencia cuántica externa (EQE) son los que resultan de interés, ya que esta información en celdas solares experimentales basadas en el material SnS está disponible para comparación. A fin de entender las limitantes de este tipo de celda solar, en un primer paso se busca reproducir la información experimental reportada para J-V y EQE. Para ello, es importante realizar una revisión minuciosa de la información experimental y teórica reportada en la literatura para las propiedades de los materiales que conforman la celda solar. Una vez que los parámetros reportados en la literatura para este tipo de celdas solares son extraídos, los mismos se utilizan para estudiar el impacto de los defectos con el fin de establecer el modelo preciso que permite la reproducción de la información experimental reportada para este tipo de celdas. Los cálculos permiten la obtención de las curvas J-V y EQE, los cuales serán comparados con la información experimental disponible a fin de validar el modelo utilizado. Los

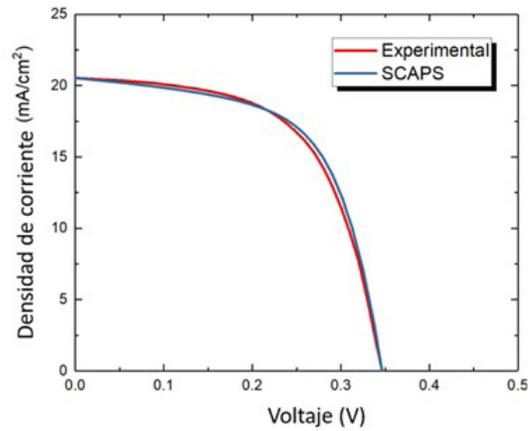
cálculos se realizan considerando el límite radiativo y no radiativo. En este sentido, bajo el límite radiativo se puede evaluar la máxima eficiencia esperada de estos materiales en celdas solares, para estudiar el mayor potencial esperado en la aplicación de estos materiales en celdas solares. Por otra parte, el límite no radiativo permite comprender valores de baja eficiencia informados experimentalmente para estas tecnologías. Cada conjunto de parámetros seleccionados dará como resultado una característica J-V específica, que se utilizará para obtener información de los parámetros optoelectrónicos del dispositivo tales como el voltaje de circuito abierto, la densidad de corriente de cortocircuito, el factor de forma y la eficiencia del dispositivo.

### 4. Resultados de la simulación de la celda solar

Partiendo de los parámetros reportados en la literatura para cada una de las películas que conforman la celda solar de SnS tales como espesores, concentraciones de aceptores y donores, constantes dieléctricas, afinidades electrónicas, movilidades, densidades de estados, ancho de zona prohibida entre otros, e incorporando el efecto de los defectos de volumen en el material SnS así como en la intercara CdS/SnS, se realizó la simulación de las características EQE de la celda solar. En particular, la información que ofrece como producto el SCAPS es comparada con la información disponible en la literatura. La Figura 2 muestra el comportamiento de la EQE experimental (curva roja) y la EQE calculada (curva azul). La información experimental es tomada de la literatura (Jae Yu Cho et al, 2020). En la Figura 2 se muestra que la información experimental es reproducida con bastante precisión. En la región de 400 nm a 500 nm, los resultados de SCAPS de eficiencia cuántica están ligeramente por encima del reportado experimentalmente. Sin embargo, en el rango de 550 nm a 650 nm están ligeramente por debajo de lo reportado experimentalmente, mientras que en la región de 650 nm a 800 nm se ajusta muy bien el modelo y finalmente en la región de 800 nm a 1100 nm se puede observar que los datos experimentales están un poco por encima de los teóricos. De esta forma se establece la validez del modelo utilizado donde se supone un papel determinante de los defectos de volumen y de intercara.



**Figura 2.** Comparación de la información experimental de la EQE (curva roja) con la data obtenida de SCAPS (curva azul).



**Figura 3.** Comparación de la información experimental de la curva J-V (curva roja) con la data obtenida de SCAPS (curva azul).

Por otra parte, se demuestra el papel fundamental que presentan los defectos de volumen en el material SnS, los cuales hacen que los resultados de la eficiencia cuántica externa para longitudes de onda mayores de 700 nm presenten una caída de manera paulatina (forma triangular), lo cual se aleja de la caída esperada de forma abrupta para materiales absorbedores con una menor contribución de los defectos. De manera general se observa que para longitudes de onda cercanas a los 600 nm se obtiene que el 80% de los fotones incidentes son aprovechados en la generación, separación y recolección de pares electrón-hueco. Un resultado importante de la correcta reproducción de la información EQE es la posibilidad de obtener posteriormente un valor de densidad de corriente de cortocircuito cercano al reportado experimentalmente.

En un siguiente paso se estudió el comportamiento de la densidad de corriente del dispositivo en función del voltaje, comparándose los resultados disponibles experimentales con los obtenidos del cálculo usando SCAPS. Este resultado permite una mejor conclusión de la validez de los mecanismos que afectan el dispositivo. La comparación de la información experimental con la teórica se muestra en la gráfica 3. Es importante notar que la información experimental del comportamiento de la densidad de corriente con el voltaje se reproduce con bastante precisión. Como resultado de esto, se obtiene una densidad de corriente de cortocircuito de 20.7 mA/cm<sup>2</sup>, un voltaje de circuito abierto de 349 mV y un factor de forma del 60%, los cuales resultan en una eficiencia del 4.3%.

Estos resultados están en buena correspondencia con los reportados experimentalmente. Teniendo en

cuenta el límite radiativo, el cual permite predecir las mejores eficiencias que se esperan para este tipo de celda solar en el caso de una contribución despreciable de defectos, el cual fundamentalmente depende del ancho de zona prohibida del material, se puede concluir que uno de los principales problemas de esta tecnología es la pérdida de voltaje de circuito abierto, lo cual es resultado del papel fundamental que juegan los defectos en las pérdidas de portadores de carga. De esta manera se establece la necesidad de reducir la concentración de defectos de volumen y de intercambiar en este tipo de celdas a fin de lograr eficiencias que superen el 20%. Para lograr una disminución del efecto de los defectos de volumen, resulta necesario encontrar rutas experimentales que permitan una mejor cristalinidad en el material. Esto es, las condiciones óptimas de tratamientos térmicos que pudieran resultar en películas cristalizadas con una menor densidad de defectos de volumen. A fin de reducir el papel de los defectos de intercara, es necesario realizar investigaciones que tengan en cuenta el uso de materiales alternativos. El uso de materiales tipo n con una alineación de bandas adecuadas con el absorbedor SnS y con tipo de estructura y parámetros de red similares, resultaría en un mejor transporte electrónico. También se recomienda el uso de un material tipo n con un mayor ancho de zona prohibida a fin de aumentar la absorción de fotones en el material absorbedor y por ende disminuir las corrientes parásitas. Por último, el uso de capas intermedias entre los materiales SnS y CdS podría ayudar a un mejor acople reticular entre materiales, disminuyendo la formación de defectos en la intercara. Todos estos puntos mencionados son

campos abiertos y se necesitan mayores investigaciones en torno a estos temas.

## 5. Conclusiones

El material absorbedor SnS es un semiconductor atractivo para aplicaciones fotovoltaicas, pues presenta las propiedades adecuadas tales como ancho de zona prohibida óptimo, conductividad tipo p, un alto coeficiente de absorción y está constituido por elementos abundantes y de poca toxicidad en la corteza terrestre. Sin embargo, los valores de eficiencia de conversión energética publicados hasta el momento son muy bajos, siendo necesarios estudios posteriores tanto teóricos como experimentales a fin de incrementar la eficiencia del dispositivo. En particular, se demuestra que los defectos de volumen en el material absorbedor, así como los defectos en la intercara CdS/SnS constituyen la principal causa de las bajas eficiencias de este dispositivo. En este sentido, se requieren estudios experimentales subsecuentes que permitan establecer las rutas de síntesis más apropiadas de este material, así como las condiciones de tratamiento térmico que permitan la obtención de las propiedades estructurales requeridas.

## 6. Referencias

- [1] Jae Yu Cho, SeongYeon Kim, Raju Nandi, Junsung Jang, Hee-Sun Yun, Enkhjargal Enkhbayar, Jin Hyeok Kim, Doh-Kwon Lee, Choong-Heui Chung, JunHo Kim and Jaeyeong Heo. *J. Mater. Chem. A* 8 (2020) 20658-20665 <https://doi.org/10.1039/D0TA06937J>
- [2] M Ganchev, P Vitanov, M Sendova-Vassileva, G Popkirov, H Dikov *J. Phys.: Conf. Ser.* 682 (2016) 012019 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/682/1/012019>
- [3] Katy Hartman, J. L. Johnson, Mariana I. Bertoni, Daniel Reicht, Michael J. Aziz, Michael A. Scarpulla, Tonio Buonassisi, SnS thin-films by RF sputtering at room temperature, *Thin Solid Films* 519, Issue 21 (2011) 7421-7424, <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2010.12.186>
- [4] Ocampo-Ortega, C.; Riech, I.; Abelenda, A.; Mis-Fernández, R.; Rodríguez-Fragoso, P.; Mendoza-Alvarez, J. Chemical Bath Deposited Orthorhombic SnS Films for Solar Cell Applications. *Coatings* 12 (2022) 283. <https://doi.org/10.3390/coatings12020283>
- [5] K. T. Ramakrishna Reddy, N. Koteswara Reddy, R.W. Miles, Photovoltaic properties of SnS based solar cells, *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 90 (2006) 3041-3046. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.06.012>
- [6] P. Sinsermuksamkul, P., Sun, L., Lee, S.W., Park, H. H., Kim, S.B., Yang, C., Gordon, R.G. Overcoming efficiency limitations of SnS-based solar cells. *Adv. Energy Mater.*, 4 (2014) 1400496. <https://doi.org/10.1002/aenm.201400496>
- [7] Jae Yu Cho, Seong Yeon Kim, Raju Nandi, Junsung Jang, Hee-Sun Yun, Enkhjargal Enkhbayar, Jin Hyeok Kim, Doh-Kwon Lee, Choong-Heui Chung, JunHo Kim, Jaeyeong Heo. *J. Mater. Chem. A* 8 (2020) 20658-20665. <https://doi.org/10.1039/D0TA06937J>

# El impacto de la amplitud de las ráfagas extremas de viento sobre el convertidor de potencia

Gregorio Martínez Reyes<sup>1\*</sup>  
Emmanuel Hernández Mayoral<sup>2</sup>  
Carlos Javier Martínez Hernández<sup>1</sup>  
Efraín Dueñas Reyes<sup>1</sup>

<sup>1</sup>División de estudios de posgrado  
Ingeniería Industrial  
Universidad del Istmo

<sup>2</sup>Instituto de Energías Renovables  
Universidad Nacional Autónoma de  
México, Morelos

Correspondencia:  
\*mrg.23@hotmail.com

## Palabras Clave:

Aerogeneradores, Convertidores electrónicos de potencia Ráfagas extremas de viento

## RESUMEN

Se emplean dos taxonomías de ráfagas de viento extremas, la Ráfaga Extrema de Operación (EOG) y la Ráfaga Extrema Coherente (ECG). Se desarrolla un método de detección de ráfagas extremas con la finalidad de determinar las ráfagas de viento extremas de mayor intensidad y amplitud con ayuda del software Matlab-Simulink®, para posteriormente modelarlas y simularlas en una estructura de un aerogenerador aislado de baja potencia sin control automático mediante el software PSIM, con ello, se analiza el efecto de la intensidad y amplitud de las ráfagas extremas sobre la confiabilidad del convertidor electrónico de potencia, donde la intensidad de la ráfaga de viento resulta ser más preponderante que la amplitud al ocasionar un mayor impacto negativo en el mismo, lo cual contribuye en el diseño de debidas protecciones del convertidor de potencia.

## ABSTRACT

Two taxonomies of extreme wind gusts are used, the Extreme Operating Gust (EOG) and the Extreme Coherent Gust (ECG). A method for detecting extreme gusts is developed in order to determine the extreme wind gusts of greatest intensity and amplitude with the help of Matlab-Simulink® software, to subsequently model and simulate them in a structure of an isolated low-power wind turbine without control automatic through the PSIM software, with this, the effect of the intensity and amplitude of the extreme gusts on the reliability of the electronic power converter is analyzed, where the intensity of the wind gust turns out to be more predominant than the amplitude by causing a greater negative impact on it, which contributes to the design of proper protections for the power converter.

## 1. Introducción

Hoy en día, los aerogeneradores representan una instalación destacada para generar grandes cantidades de energía limpia y renovable para las redes de servicios públicos. Básicamente, hay muchas buenas razones para utilizar más energía eólica en las redes eléctricas. Sin embargo, los WT's presentan inconvenientes al momento de interconectarse a la red eléctrica en materia de la calidad de la energía. Uno de los problemas de mayor consideración son los parpadeos eléctricos o también llamados flickers en el idioma inglés, lo cual se define como una percepción visual del parpadeo de la luz resultante de las fluctuaciones rápidas de voltaje causadas por pulsaciones de potencia activa y/o cambios en el flujo de carga según el escaneo operativo. El parpadeo es vulnerable a las características del viento, los cuales son ocasionados

por vientos turbulentos, también llamados ráfagas de viento.

Como ya se mencionó, las ráfagas de viento generan parpadeos eléctricos en aerogeneradores, los cuales son causados principalmente por fluctuaciones en la potencia derivados de los cambios de carga en la red eléctrica y en menor medida por la cizalladura del viento, la sombra de la torre y problemas mecánicos, como describe (Fuladi & Akbari, 2016).

Los parpadeos eléctricos de régimen permanente presentes en turbinas eólicas, son causados por ráfagas de viento variando la velocidad en los aerogeneradores, por lo tanto, este fenómeno no puede ser compensado, ni controlado en su totalidad por el sistema de control. La mitigación de Flickers mecánicamente se puede realizar con el incremento en el diámetro de las palas (Guerrón et al., 2014).

Según (Saad et al, 2018), la energía eléctrica de las turbinas eólicas ahora se clasifica como más eficiente y más valiosa que otros recursos de energía verde. Este notable desarrollo puede atribuirse principalmente al desarrollo de la tecnología. Sin embargo, las turbinas pequeñas aún se encuentran en su etapa de desarrollo.

Indica (Ezhiljenekha & MarsaleinBerno, 2020), que el convertidor electrónico de potencia es parte del sistema de control, cuyos objetivos son extraer la máxima potencia de salida, mitigar o reducir los aspectos negativos de la calidad de la energía. Asimismo, un convertidor electrónico de potencia en un sistema o equipo electrónico que tiene por objetivo la conversión de energía eléctrica entre dos formatos diferentes.

En México, el uso de aerogeneradores de baja potencia es muy poco conocido, ya que depende de las condiciones del viento, sin embargo, prometen un gran futuro para la sociedad, un mundo más limpio y reducción de costos.

De acuerdo a la norma IEC 61400-2, describen 5 tipos de ráfagas.

- Ráfaga Extrema de Operación (EOG).
- Cambio de Dirección Extremo (EDC).
- Ráfaga Extrema Coherente (ECG).
- Ráfaga Extremadamente Coherente con Cambio de Dirección (ECD).
- Cizalladura Extrema del Viento (EWS).

De igual manera, Branlard, menciona 5 métodos de detección.

- El incremento de velocidad sobre el umbral.
- Procedimiento Peak-Peak.
- Incremento de velocidad.
- Pico sobre el umbral.
- De correlación.

El objetivo del presente trabajo es determinar las taxonomías de las ráfagas de viento a utilizar, caracterizar las mismas, así como también la detección de las ráfagas de viento extremas, lo cual consiste en la identificación de umbrales, de cambios de la velocidad del viento en cierto tiempo que sean predefinidos como una ráfaga de viento extrema y determinar el efecto de las ráfagas de viento extremas en el convertidor electrónico de potencia en un aerogenerador de

baja potencia, mediante una base de datos del Istmo de Tehuantepec.

## 2. Metodología

Esta investigación se centró en el estudio de dos tipos de ráfagas de viento, argumentando que (Branlard, 2009) describe que la ráfaga EOG y ECG son parecidas a la ráfaga de sombrero mexicano y la ráfaga frente. Es por eso, que se analizan dos taxonomías de ráfagas de viento extremas. A continuación, en la Fig. 1 y Fig. 2 se presentan las ráfagas descritas por la norma IEC 61400-2 y la Fig. 3 y Fig. 4, son las ráfagas descritas por (Branlard, 2009).

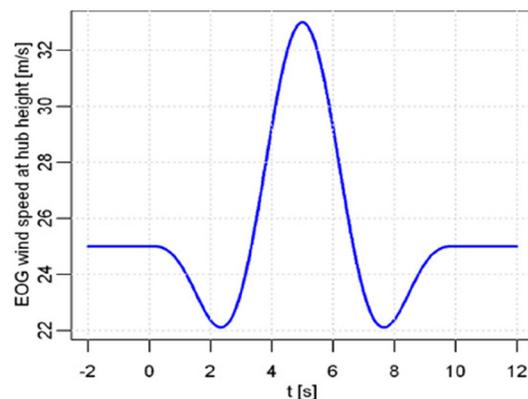


Figura 1. Ráfaga Extrema de Operación (EOG), IEC (2013).

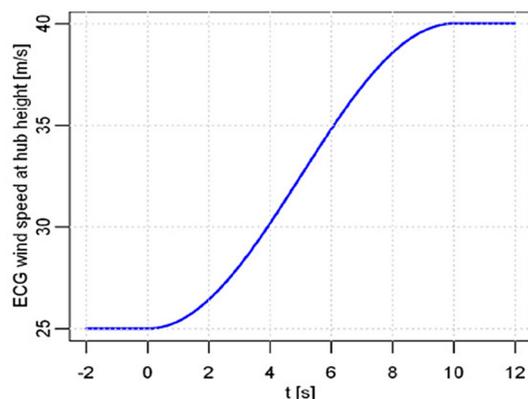


Figura 2. Ráfaga Extrema Coherente (ECG), IEC (2013).

Indica (Branlard, 2009), la ráfaga extrema de operación (EOG), es una disminución de la velocidad seguida de una subida pronunciada una caída pronunciada y un aumento de regreso al valor original. La amplitud y duración de la ráfaga, varían con el período del retorno. En cambio, la ráfaga extrema coherente (ECG), se trata de un cambio sostenido en

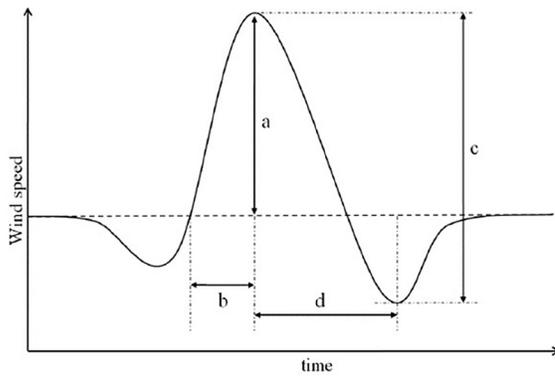


Figura 3. Ráfaga de sombrero mexicano, (Branlard, 2009).

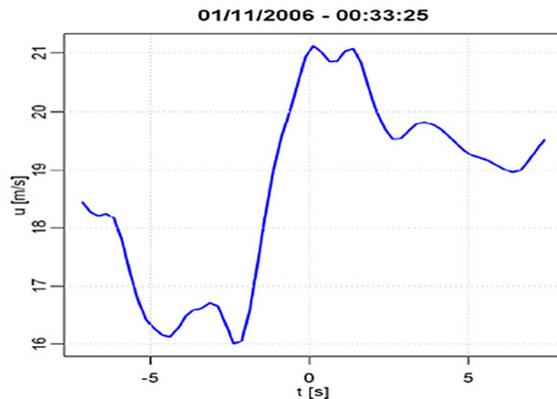


Figura 4. Un frente, Branlard (2009).

la velocidad del viento, con una curva en forma de coseno, pero que termina en una velocidad del viento constante que corresponde a un aumento del viento, en comparación con la velocidad del viento antes de la ráfaga. La ráfaga EOG y la ráfaga ECG, vienen dadas por la Ec.1 y Ec.2, respectivamente.

$$V(t) = \{V(z) - 0.37 \text{ mps} \sin\left(\frac{3\pi t}{T}\right) \left(1 - \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right)\right)\} V(z) \quad (1)$$

$$V(t, z) = \{V(z) V(z) 0.5 U_{cg} \left(1 - \cos\left(\frac{\pi t}{T}\right)\right)\} V(z) + U_{cg} \quad (2)$$

$v(t)$  = velocidad del viento

$mp$  = amplitud de la ráfaga de viento EOG

$v(z)$  = velocidad del viento

$U_{cg}$  = amplitud de la ráfaga de viento ECG

Para determinar el impacto de las ráfagas de viento en el convertidor electrónico de potencia de un aerogenerador de baja potencia el proceso consta de cuatro fases, en la primera fase se determinan los

tipos de ráfagas de viento extremas a utilizar, como segunda fase se propone un método de detección de ráfagas intensas de viento, como tercera fase se determinan las ráfagas más intensas mediante una metodología de caracterización de ráfagas y por último, con ayuda del software PSIM las ráfagas de viento extremas se modelan y simulan en un aerogenerador aislado de baja potencia.

El método de detección utilizado está basado en el método de incremento de velocidad sobre cierto umbral (Branlard, 2009), el cual solo fue usado con ráfagas ECG, el fundamento del código, es con base a un umbral de la diferencia de velocidades del viento en un movimiento de ventana variable. Este método presenta ciertas ventajas frente a los demás:

- Detecta ráfagas de cualquier duración y amplitud.
- Utiliza una variable ajustable de diferencia de velocidades de viento.
- Especifica la forma de dos tipos de ráfagas.

La metodología para caracterizar la ráfaga de viento se muestra en la Figura 5.

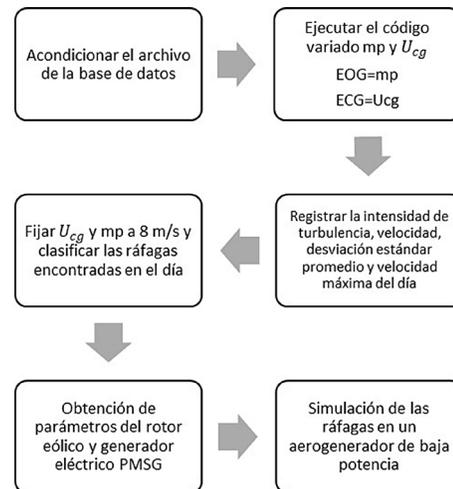


Figura 5. Metodología de caracterización.

Para la simulación, se utilizó el software PSIM, se desarrollaron dos modelos de las ráfagas de viento, el modelo para la Ráfaga Extrema de Operación (EOG) para la Ráfaga Extrema Coherente (ECG), con ayuda de las ecuaciones 1 y 2, mencionadas anteriormente.

Se detectaron 12 ráfagas máximas con el código detector, 6 ráfagas EOG y 6 ráfagas ECG. Se clasificaron

caron en “altas-medias-bajas”, sin embargo, estas ráfagas cumplen con una condición establecida a criterio propio. La condición fue que, en el par de ráfagas, una debería tener mayor amplitud, pero menor intensidad que la otra, por su parte, la otra ráfaga que completa el par, debería tener mayor intensidad, pero menor amplitud que la ya mencionada. Esto, con el fin de conocer, si la amplitud o intensidad, causan un mayor impacto negativo en el convertidor electrónico de potencia.

Las Ráfagas Extremas de Operación (EOG) detectadas se encuentran en el rango de 12.1 m/s a 9.5 m/s, siendo la ráfaga extrema máxima de viento de 12.1 m/s. En cambio, las Ráfagas Extremas Coherentes (ECG) detectadas, se encuentran en el rango de 18.5 m/s a 14.3 m/s, siendo la ráfaga extrema máxima de viento ECG de 18.5 m/s.

En la Fig. 6 y Fig.7, se muestran las ráfagas EOG y ECG más intensas del periodo estudiado, ambas ráfagas tienen un tiempo de evolución de 9 segundos de acuerdo a la Tabla I.

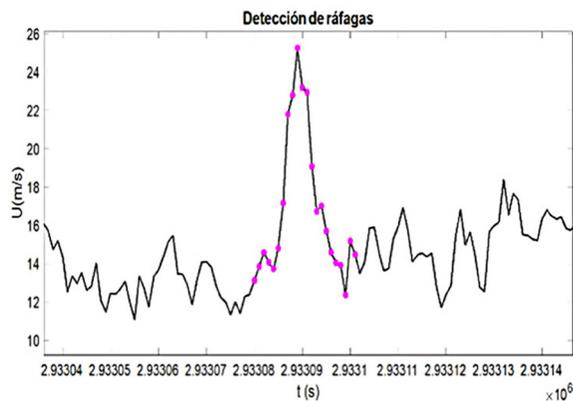


Figura 6. Ráfaga de Operación más intensa.

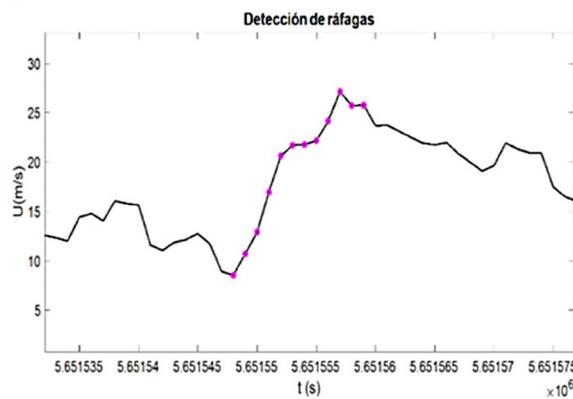


Figura 7. Ráfaga Coherente más intensa.

Se realizaron cuatro pruebas en PSIM, que son las siguientes:

- Potencia en una línea que ingresa al convertidor del lado de la máquina.
- Voltaje Drenaje-Fuente de un interruptor de potencia.
- Corriente en un interruptor de potencia en el convertidor de lado de la máquina.
- Corriente en un interruptor de potencia en el convertidor de lado de la red.

La Tabla I, presenta el tiempo de evolución de la pendiente positiva de las ráfagas extremas de viento utilizadas en la simulación.

Tabla I. Tiempo de ráfagas.

Clasificación	EOG/ ECG
A-Rojo	4 s
B-Cyan	5 s
C-Verde	6 s
D-Amarillo	7 s
E-Azul	8 s
F-Magenta	9 s

La base de datos utilizada en el estudio, corresponde al emplazamiento de La Ventosa, ubicada en la región del Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, México, con una frecuencia de muestreo de 1 Hz a una altura de 17.5 m en un periodo de septiembre de 2017 a enero de 2018.

La detección de ráfagas de viento se realiza mediante un código detector programado en el software Matlab®, que consiste en detectar los dos tipos de ráfagas EOG y ECG, asimismo, detectan el periodo de la ráfaga. En la Fig. 8, se observan diferentes colores, que se refiere al tiempo de evolución de acuerdo a la Tabla I.

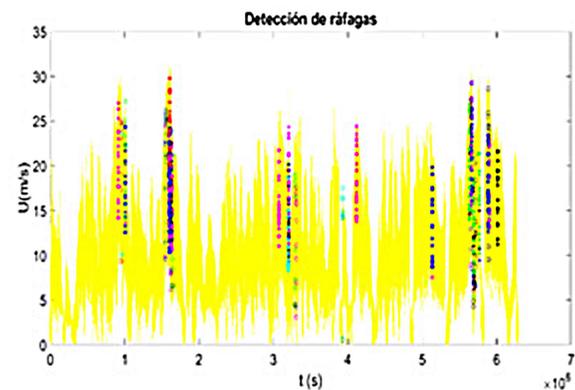


Figura 8. Ráfagas detectadas.

En las Tablas II y III, se presentan los parámetros de la máquina y del rotor eólico respectivamente utilizados en la simulación de las ráfagas extremas de viento en el software PSIM.

**Tabla II.** Parámetros de la máquina de 19 kW.

Parámetros	Máquina 19 kW
Resistencia estator	1mΩ
Inductancia en d	1mH
Inductancia en q	1mH
Valor experimento	7112
Número de polos	30
Momento de inercia	100m
Constante del eje	1

**Tabla III.** Parámetros del rotor eólico.

Parámetros	Rotor eólico
Potencia nominal	19kW
Velocidad base	12m/s
Velocidad rotacional	190rpm
Velocidad inicial	50m/s
Momento inercia	1m

En la Fig. 9, se muestra la estructura del aerogenerador aislado, el cual se compone por un rotor eólico, un generador de imanes permanentes, un convertidor electrónico de potencia espalda con espalda de dos niveles de escala completa y se puede observar que no se aplica ninguna estrategia de control, es decir, se encuentra en lazo abierto, esto con el objetivo de obtener los valores reales de las ráfagas extremas de viento.

En la Tabla IV, se presentan las ráfagas extremas máximas EOG y ECG, que se utilizaron para la simulación.

**Tabla IV.** Ráfagas extremas.

Clasificación	EOG (m/s)	ECG (m/s)
Altas	11.4 – 12.1	16.6 – 18.5
Medias	10.3 – 11.0	16.0 – 16.4
Bajas	9.5 – 10.0	14.3 – 14.8

### 3. Resultados y discusión

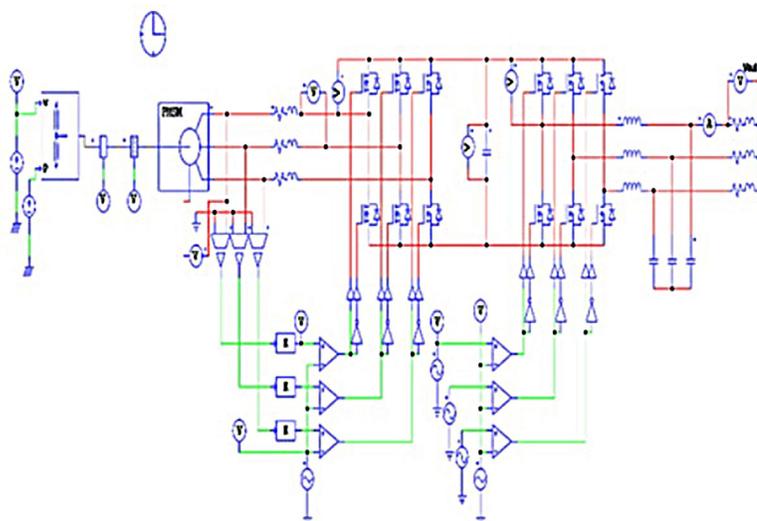
En las Tablas V, VI y VII se presentan los resultados obtenidos de la simulación separados de acuerdo a la clasificación de “altas, medias y bajas” mencionada en la tabla IV con las Ráfagas Extremas de Operación (EOG). Las unidades de amplitud son m/s y de intensidad  $m/s^2$ . Es importante mencionar, que los datos obtenidos son los resultados picos de la simulación.

**Tabla V.** Resultados clasificación alta.

Datos	12 m/s	Amp 12.1 Int 1.34	Amp 11.4 Int 1.42
Potencia	3.41 kW	200.9 kW	254.0 kW
Voltaje	256.81 V	1149.5 V	1557.4 V
Corriente	28.7 A	253.06 A	268.99 A
Corriente	20.8 A	121.62 A	228.21 A

**Tabla VI.** Resultados clasificación media.

Datos	12 m/s	Amp 11.0 Int 1.22	Amp 10.3 Int 1.72
Potencia	3.41 kW	107.8 kW	210.9 kW
Voltaje	256.81 V	899.65 V	1123.5 V
Corriente	28.7 A	175.87 A	230.2 A
Corriente	20.8 A	108.12 A	125.5 A



**Figura 9.** Estructura simulación ráfaga.

**Tabla VII.** Resultados clasificación baja.

Datos	12 m/s	Amp 10.0 Int 1.1	Amp 9.5 Int 1.9
Potencia	3.41 kW	11.47 kW	8.93 kW
Voltaje	256.81 V	392.99 V	341.35 V
Corriente	28.7 A	68.55 A	59.95 A
Corriente	20.8 A	42.79 A	32.77 A

Las Figs. 10, 11, 12 y 13, corresponden a las ráfagas extremas de viento EOG, se observa que en las cuatro gráficas respeta un patrón, el cual es que la intensidad resulta ser más preponderante en las ráfagas altas y medias, en cambio, la amplitud, resulta ser más preponderante en las ráfagas bajas.

A continuación, en las Tablas VIII, IX y X se presentan los resultados obtenidos de la simulación fraccionados de acuerdo a la clasificación de “altas, medias y bajas” mencionada en la Tabla IV con las Ráfagas Extremas Coherentes (ECG). Es importante mencionar, que los datos obtenidos son los resultados picos de la simulación.

**Tabla VIII.** Resultados clasificación alta.

Datos	12 m/s	Amp 18.5 Int 2.05	Amp 16.6 Int 2.07
Potencia	3.41 kW	181.1 kW	348.6 kW
Voltaje	256.81 V	1430.1 V	1749.2 V
Corriente	28.7 A	267.32 A	314.18 A
Corriente	20.8 A	210.14 A	242.13 A

**Tabla IX.** Resultados clasificación media.

Datos	12 m/s	Amp 16.4 Int 2.05	Amp 16.0 Int 3.2
Potencia	3.41 kW	313.0 kW	192.4 kW
Voltaje	256.81 V	1548.1 V	1115.2 V
Corriente	28.7 A	304.94 A	226.43 A
Corriente	20.8 A	191.22 A	127.40 A

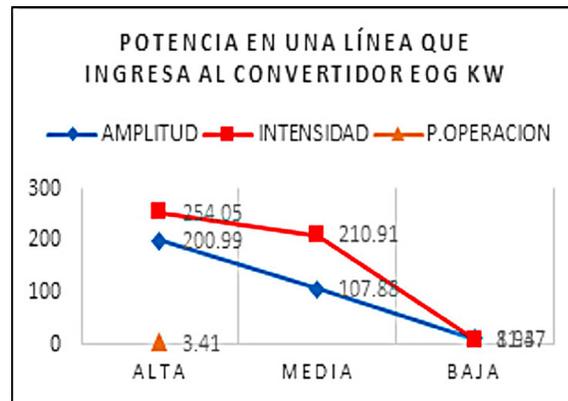
**Tabla X.** Resultados clasificación baja.

Datos	12 m/s	Amp 14.8 Int 1.64	Amp 14.3 Int 2.3
Potencia	3.41 kW	103.8 kW	310.7 kW
Voltaje	256.81 V	1018.9 V	1838.0 V
Corriente	28.7 A	200.47 A	337.17 A
Corriente	20.8 A	99.12 A	196.34 A

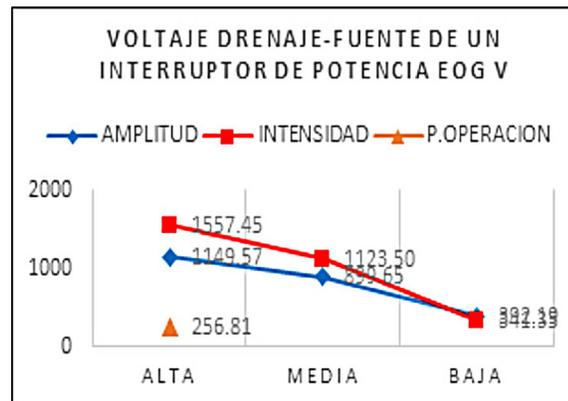
Las Figs. 14, 15, 16 y 17, corresponden a las ráfagas extremas de viento (ECG), se aprecia que en las cuatro gráficas respeta un mismo patrón, la intensidad resulta ser más preponderante en las ráfagas altas y

bajas, en cambio, la amplitud resulta ser más preponderante en las ráfagas medias.

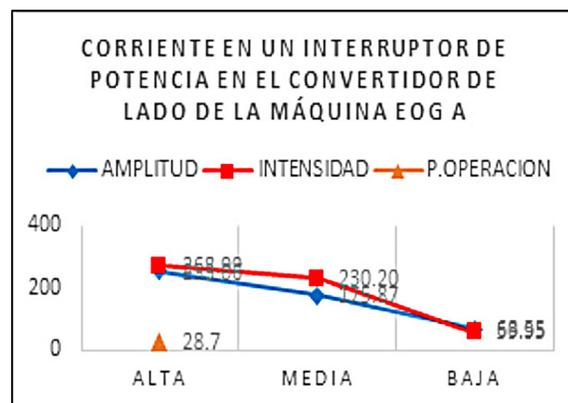
Las ráfagas EOG muestran un patrón donde la intensidad es más preponderante en las ráfagas altas y medias, en las ráfagas bajas, la amplitud resulta ser más preponderante. En cambio, en las ráfagas ECG las ráfagas altas y bajas, la intensidad resulta ser más preponderante, y las ráfagas medias, la amplitud es más preponderante.



**Figura 10.** Gráfica potencia amplitud-intensidad.



**Figura 11.** Gráfica voltaje amplitud-intensidad.



**Figura 12.** Gráfica corriente máquina amplitud-intensidad.

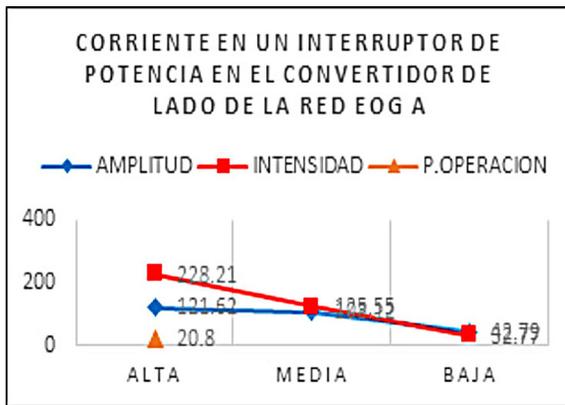


Figura 13. Gráfica corriente red amplitud-intensidad.

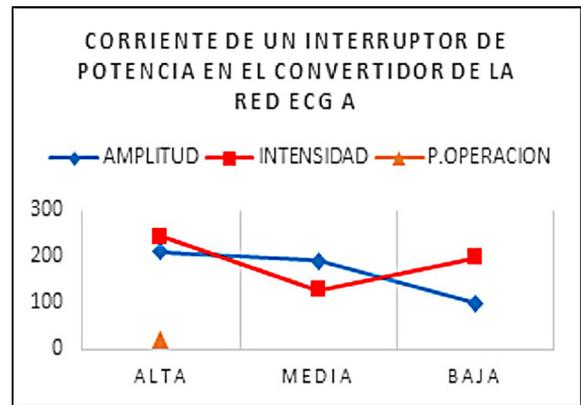


Figura 16. Gráfica corriente máquina amplitud-intensidad.

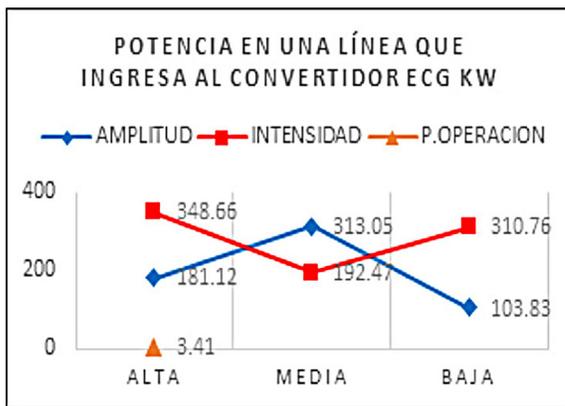


Figura 14. Gráfica potencia amplitud-intensidad.

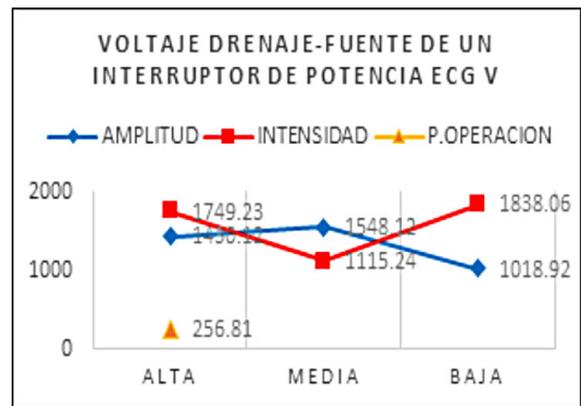


Figura 17. Gráfica corriente red amplitud-intensidad.

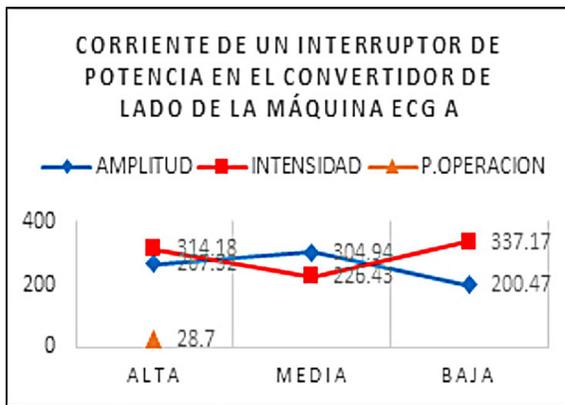


Figura 15. Gráfica voltaje amplitud-intensidad.

## 4. Conclusiones y Perspectivas

En este artículo, se realizó el análisis de las ráfagas de viento extremas, donde se decide estudiar dos tipos de ráfagas, la Ráfaga Extrema de Operación (EOG), y la Ráfaga Extrema Coherente (ECG), el criterio de clasificación fue de acuerdo a la literatura. Así como también, fue propuesto un método de detección de

ráfagas de viento, que es capaz de detectar cualquier amplitud de ráfagas, así como su intensidad de la misma. Además, las ráfagas de viento extremas coherente constituyen al 91% de las ráfagas detectadas de la base de datos. Finalmente, la intensidad de la ráfaga de viento se mostró como el parámetro más relevante comparado con la amplitud de la ráfaga de viento en cuanto a la confiabilidad del convertidor de potencia.

## Referencias

- Abulanwar, S., Ghanem, A., Rizk, M. E. M. y Hu, W. (2019). A proposed flicker mitigation scheme of DFIG in weak distribution networks. *Alexandria Engineering Journal*, 58(2), 677–687. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.05.014>
- Kasem Alaboudy, A. H., Daoud, A. A., Desouky, S. S. y Salem, A. A. (2013). Converter controls and flicker study of PMSG-based grid connected wind turbines. *Ain Shams Engineering Journal*, 4(1), 75–91. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2012.06.002>.
- Branlard, E. (2009). *Wind energy: On the statistics of gust and their propagation through a wind farm*. Países Bajos.

- Ezhiljenekha, G. y MarsalineBeno, M. (2020). Review of Power Quality Issues in Solar and Wind Energy. *Materials Today: Proceedings*, 24, 2137-2143. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.670>
- Fooladi, M y Akbari Foroud, A. (2016). Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbines. *IET Renewable Power Generation*, 10(2), 250-259. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0419>
- Cardona-Carmona, H. E. (2006). Influencia de los sistemas de innovación tecnológica y científica en el desarrollo. *Tecnológicas*, (16), 9. <https://doi.org/10.22430/22565337.520>
- Guerrón, G., García, E. y Montero, A. (2014). Influencia de las ráfagas de viento en la calidad de la energía de los parques eólicos. *Enfoque UTE*, 5(3), 25-44. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v5n3.42>
- Commission, I. E. (1987). *Norme internationale: Transformateurs de courant = International Standard: current transformers*. (2a ed.). International Electrotechnical Commission.
- Saad, M. M. M., Bin Mohd, S. y Zulkafli, M. F. (2018). Power generation of small wind turbine: Under high-speed operation. *Sustainable Energy Technologies and Assessment*, 26, 1-5. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.01.002>

# Matriz de distancias mínimas entre lenguas

Mario Ramírez Mendoza\*  
Mario Arciga Alejandre

Licenciatura en Matemáticas  
Aplicadas  
Universidad del Istmo

Correspondencia:  
\*mexico12ago@hotmail.com

## Palabras Clave:

Grafica lingüística, Interacción de lenguas, Matriz léxica.

## Keywords:

Linguistic graph, Language interaction, Lexical matrix.

## RESUMEN

Con el presente trabajo se pretende aportar un nuevo enfoque de aplicación de la herramienta matemática en la investigación de la conexión lingüística basado en la aplicación de la teoría de gráficas. Después de una breve introducción y una ligera explicación de la teoría de gráficas, se tendrá un panorama general de la manera en que es posible aplicar esta teoría. Se aplica el concepto de gráfica con peso en su forma de matriz para obtener la matriz de distancias mínimas de conexión lingüística. Las raíces lingüísticas en estudio son el céltico, el germano, el eslavo, el romance y lenguas conexión entre éstas, nos referimos a la ugrofinesa, la báltica, la griega y la albanesa. Se analizará la interpretación lingüística de las herramientas matemáticas que se encuentran en la teoría de gráficas. Es precisamente la interacción escondida de las lenguas lo que genera la idea de abordar su análisis con herramientas matemáticas. Esta forma de estudio permitiría analizar más propuestas de análisis lingüístico.

## ABSTRACT

The present paper is an attempt to show how graph theory may help to provide new tools for linguistic research. After a brief introduction and an overview of graph theory, the paper presents the ways graph theory can be used. The concept of weighted graphs will be used in the form of matrices to obtain the matrix of shortest paths between linguistic connections. In the linguistic constellation, each node represents a language and each side the approximate linguistic distance. Even though language families are extensive, this study is limited to the most widely represented worldwide. Celtic, Germanic, Slavic and Romance languages are the linguistic clusters or roots to which other languages, i.e. Finno-Ugric, Baltic, Greek and Albanian are linked. The interpretations of the mathematical tools that are part of graph theory are analyzed. The hidden language interaction generates the idea of analyzing this interaction with mathematical tools. This form of study would allow to analyze more proposals of linguistic analysis.

## 1. Introducción

La teoría de graficas está basada en los conceptos de vértice o nodo y lado o arista, los cuales a su vez están ligados a los elementos de distancia y grado, este último también conocido como valencia. Estos dos últimos términos son expresiones matemáticas que serán llevadas al campo del sistema lingüístico. La palabra *distancia* representará la distancia entre lenguas y el *grado* estará asociado a la conexión de una lengua con otras. La palabra distancia, matemáticamente, no es simplemente el intervalo de tiempo o de espacio entre dos sucesos. Su aplicación en diferentes áreas de la ciencia ha llevado a los matemáticos a dar una definición más concisa, de tal manera que pueda ser aplicada en otros campos. Hoy en día, es ya más escuchado el concepto de distancia léxica. (Trad D.G, Bakker, D y Haspemath, M.).

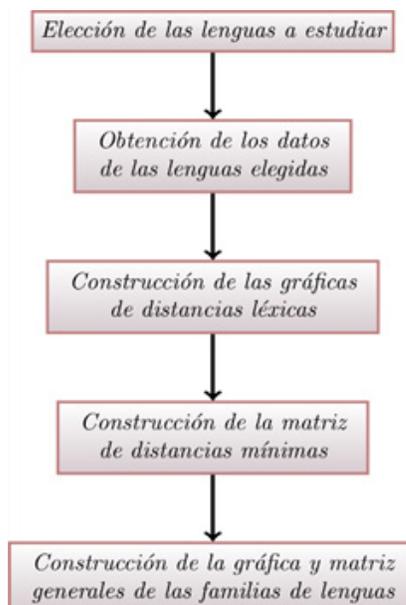
Hay trabajos en la teoría lingüística que usan el concepto de gráfica donde el estudio solo aborda el análisis de relaciones semánticas en el léxico disponible y no se hace un uso más profundo aprovechando la riqueza de esta herramienta matemática (Echeverría, M. et al., Salcedo, L.); aunque al mismo tiempo existen libros enteros dedicados al estudio de la matemática lingüística (Anisimov, A., Gladkii, A. et al., Pitrovskii, R. et al.).

En el estudio de las conexiones lingüísticas, las palabras *distancia* y *grado* se encuentran de manera intrínseca en el análisis y desarrollo de la teoría lingüística. En otras áreas de aplicación es ya un hecho que para una gráfica en estudio, la expresión cuantificada y asociada a ella, refleja aspectos de tipo estructural.

Con lo anteriormente expresado se puede pensar que, para poder introducir de alguna forma los conceptos matemáticos al estudio de la teoría lingüística y profundizar en su estudio, habrá que definir nuevas formas de distancia léxica.

## 2. Metodología

La metodología a seguir se muestra a continuación:



Exponemos en la Tabla 1 una relación no exhaustiva entre algunos conceptos propios de la teoría de gráficas y los respectivos términos léxicos.

**Tabla 1.** Relación de conceptos de la teoría de gráficas y términos léxicos.

Término de la teoría de gráficas	Término léxico
Gráfica	Estructura léxica
Vértices	Lenguas
Arista	Enlace léxico
Camino	Camino léxico
Matriz de adyacencia (MA)	Matriz léxica (ML) de distancias
Vectores propios de la MA	Vectores propios de la ML (aplicación futura)
Árbol	Árbol léxico con características particulares

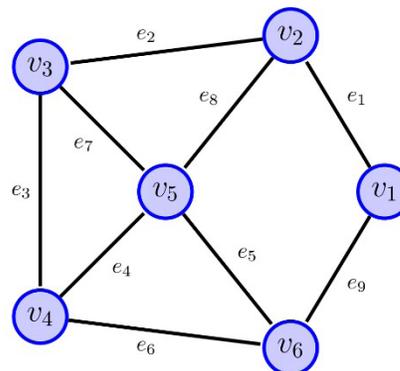
Para enfatizar como la teoría de gráficas es aplicable a la teoría lingüística, daremos la definición de los conceptos aplicados en nuestro estudio y que son propios de la teoría de gráficas (Rosen, K.).

Una *gráfica simple* se forma por un conjunto no vacío  $V$  cuyos elementos llamaremos vértices y un conjunto  $A \subseteq \{X \subseteq V : |X|=2\}$ , cuyos elementos llamaremos aristas. La Figura 1 muestra una representación de una gráfica simple, donde  $V = \{v_1, \dots, v_6\}$ ;  $A = \{e_1, \dots, e_9\}$ ;  $e_1 = \{v_1, v_2\}, \dots, e_9 = \{v_1, v_6\}$

Existe el concepto de *multigráfica*, la cual admite la existencia de más de una arista entre pares de vértices.

Como se ha mencionado, en nuestro trabajo los vértices representan las lenguas y las aristas representan sus conexiones.

El *grado de un vértice* es el número de aristas incidentes con él. Se simboliza como  $\delta(v)$ . Daremos un ejemplo gráfico para que quede claro lo anteriormente dicho.



**Figura 1.** Gráfica.  
Fuente: Elaboración propia

La gráfica de la Figura 1 está constituida por 6 vértices y 9 aristas. Podemos ver que el vértice marcado con el símbolo  $v_1$  tiene dos aristas unidas a él, por lo que escribimos

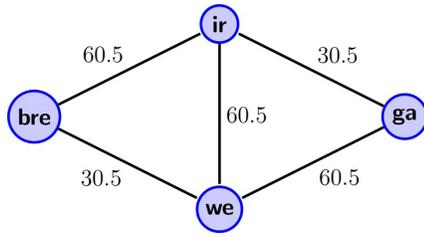
$$\delta(v_1) = 2$$

De la misma manera, los vértices marcados con los símbolos  $v_2$  y  $v_5$  tienen unidas 3 y 4 aristas, respectivamente, y escribimos

$$\delta(v_2) = 3, \delta(v_5) = 4$$

Introduciéndonos en nuestro tema en estudio, tomemos la gráfica formada por la *raíz lingüística*<sup>1</sup> céltica (Trad D.G.).

<sup>1</sup> Raíz lingüística es la familia de lenguas con origen común.



**Figura 2.** Gráfica de la raíz lingüística céltica.  
Fuente: Elaboración propia.

En esta grafica etiquetamos los vértices con símbolos que representan algunas de las lenguas en estudio. Así, la gráfica léxica está formada por 4 vértices: *ga*, *we*, *bre*, *ir* y por 5 aristas. Los grados correspondientes son

$$\delta(ga) = 2, \delta(we) = 3, \delta(bre) = 2, \delta(ir) = 3$$

Los vértices  $v_i, v_j$  de una gráfica  $G(V, A)$  se dice que son *adyacentes* (vecinos) si  $e = \{v_i, v_j\}$  es una arista de la gráfica, en cuyo caso se dice que la arista *e* incide en los vértices  $v_i$  y  $v_j$ .

Un camino  $C(v_j, v_k)$  del vértice  $v_j$  al  $v_k$  en una gráfica dada es una sucesión de aristas adyacentes que unen el vértice inicial  $v_j$  con el vértice final  $v_k$ . En particular, estos vértices pueden coincidir. Si  $e_1 = \{v_1, v_2\}$ ,  $e_2 = \{v_2, v_3\}$ , ...,  $e_n = \{v_n, v_{n+1}\}$ , el vértice inicial es  $v_1$  y el vértice final es  $v_{n+1}$ , entonces se dice que este camino tiene *longitud n*. Escribimos  $l(C) = n$ .

Se dice que el camino es una *trayectoria T*, si no repite vértices, y es un *paseo P*, si no repite aristas. La longitud de éstos se simboliza como  $l(T)$  y  $l(P)$  respectivamente.

Una gráfica se dice que es *conexa* si para cualquier par de vértices existe un camino.

Sea  $G(V, A)$  una gráfica conexa. Si  $v_j, v_k \in V$ , entonces su distancia se define como:

$$d(v_j, v_k) = \min\{l(T) : T \text{ es una trayectoria de } v_j \text{ a } v_k\}$$

La definición anterior es el concepto principal que aplicaremos en el presente trabajo, solo que la longitud estará definida sobre una gráfica ponderada, y la mínima longitud es lo que llamaremos distancia mínima.

*Gráfica ponderada* es aquella donde a cada arista

le asociamos un número. Este número se llama *peso* de la arista. En nuestro estudio, la *longitud del camino* estará dado por la suma de los pesos de las aristas.

El presente trabajo toma como inicio la definición de distancia léxica, que tiene su base en el concepto de camino. Para hacer aplicable el contenido de las herramientas de la teoría de gráficas en nuestro estudio, los vértices de la gráfica representaran las lenguas y las aristas la conexión entre éstas. La *distancia léxica* la definiremos como el camino léxico de distancia mínima de divergencia entre los vocabularios de dos lenguajes. El *grado de una lengua* la definimos como el número de lenguas que se relacionan de forma directa con ella dentro de la gráfica léxica y se expresa como  $\delta(v_i)$ , donde  $v_i$  denota al *i*-ésimo vértice (lengua). Con la expresión: forma directa, se quiere decir la conexión adyacente de una lengua con otra.

En el presente trabajo las lenguas en estudio son tomadas del trabajo *Lexical Distance Among the Languages of Europe* (Trad D.G). En nuestro análisis se aplican los métodos propios de la teoría de gráficas extendiendo su contenido al estudio de gráficas léxicas. Como ya se mencionó anteriormente, se emplea el concepto de gráfica con peso. El concepto anterior lo definimos como la función que relaciona las aristas de una gráfica con los números reales:

$$w : A \rightarrow \mathbb{R}$$

bajo la regla

$$w(e) = r; e \in A, r \in \mathbb{R}$$

Así, por ejemplo, los pesos para las aristas de la raíz céltica de la figura 2 son

$$\begin{aligned} w(\{bre, ir\}) &= 60.5, w(\{bre, we\}) = 30.5, \\ w(\{ir, ga\}) &= 30.5, w(\{ir, we\}) = 60.5, \\ w(\{ga, we\}) &= 60.5 \end{aligned}$$

Considerando las notaciones para longitud y distancia, la gráfica de la figura 2 muestra que  $d(bre, ir) = 60.5$  y la longitud de la trayectoria *bre, we, ir* es  $l(bre, ir) = 91$ .

La siguiente fórmula es una herramienta valiosa de aplicación de la teoría de gráficas y es uno de los puntos que se comentan en el presente trabajo:

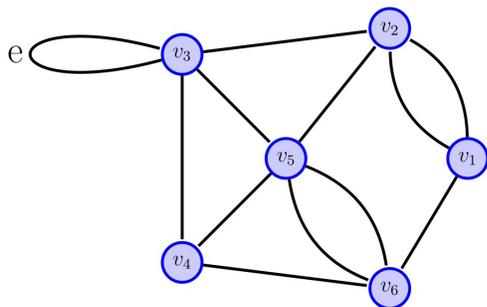
$$\delta(v_1) + \delta(v_2) + \dots + \delta(v_n) = 2|A| \quad (1)$$

En esta expresión,  $|A|$  es el número de aristas que conforman la gráfica. La fórmula expresa que la suma total de los grados de los vértices (lenguas) de una gráfica es igual a dos veces el número de aristas. Para la Figura 2 la igualdad anterior toma la forma

$$\delta(ga) + \delta(we) + \delta(bre) + \delta(ir) = 2(5)$$

$$2 + 3 + 2 + 3 = 10$$

A partir del procedimiento dado se pueden obtener útiles aplicaciones. Una aplicación consiste en la verificación de la construcción válida de la gráfica léxica. Para esto debemos de comprobar que la igualdad se cumple, de otra manera la gráfica léxica apropiada estaría mal construida. Esta fórmula, además, aplica para multigráficas con lazos. Un lazo es una arista que conecta un vértice consigo mismo sin pasar por otros vértices, como el vértice e en la Figura 3.



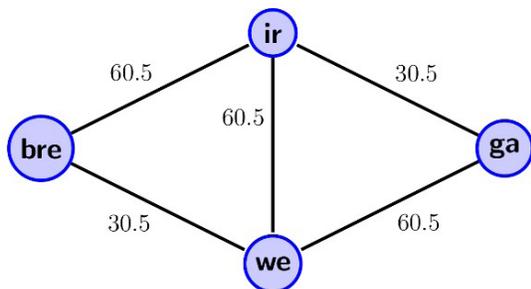
**Figura 3.** Multigráfica con lazos.  
Fuente: Elaboración propia

Aquí, la fórmula toma la forma

$$\delta(v_1) + \delta(v_2) + \delta(v_3) + \delta(v_4) + \delta(v_5) + \delta(v_6) = 2|A|$$

$$3 + 4 + 5 + 3 + 5 + 4 = 2(12)$$

En la siguiente sección se dará el contenido léxico que encierra el corolario matemático que se desprende de la fórmula (1): El número de vértices de grado impar es un número par.



	ga	we	bre	ir
ga	0	60.5	91	30.5
we	60.5	0	30.5	60.5
bre	91	30.5	0	60.5
ir	30.5	60.5	60.5	0

**Figura 4.** Gráfica y matriz de camino léxico de distancia mínima de la raíz celta.  
Fuente: Elaboración propia

### 3. Resultados

Regresemos a la fórmula (1) y apliquemos este resultado a la gráfica léxica céltica, simplemente por ser la gráfica más sencilla en nuestro estudio. Notamos que los vértices que tienen grado impar son (*we*) e (*ir*), es decir, son dos, un número par. Esta aplicación es una herramienta muy útil para comprobar que nuestro esquema está bien construido y que, por ejemplo, no se dejó alguna conexión o vértice olvidado; además esta expresión, en el campo de la lingüística, se puede traducir de la siguiente manera: El número total de lenguas que tienen conexión impar con otras lenguas en un esquema de léxicos es un número par.

Pasemos a describir los resultados obtenidos para la gráfica léxica dada en *Lexical Distance Among the Languages of Europe* (Trad D.G.). Como resultado del presente estudio, se obtienen las matrices de camino léxico de distancias mínimas para cada raíz y lenguas de interconexión: el céltico, el germano, el eslavo, el romance y lenguas que aparecerán como conexión entre estos, la ugrofinesa, la báltica, la griega y la albanesa. Las presentamos junto con su gráfica léxica para su mejor comprensión.

Las filas y columnas de las matrices, a partir de la figura 4, están formadas por las mismas lenguas, el mismo orden tanto en las columnas como en las filas. Por ejemplo, para la matriz de la Figura 4 se tiene el siguiente orden: *ga*, *we*, *bre*, *ir*; tanto en las filas como en las columnas; por tanto, la matriz es simétrica. Esto quiere decir que los elementos simétricos, con respecto a la diagonal principal de la matriz, coinciden. La diagonal principal de la matriz es aquella donde se colocan los elementos que se encuentran en el mismo número de fila y columna. En nuestro caso es donde se encuentran los valores cero; y estos es debido a que el orden de divergencia de una lengua con respecto a si misma es cero.

La distancia entre léxicos se halla intersecando la fila con la columna elegida. Por ejemplo, la distancia entre la segunda fila (*we*) y la tercera columna (*bre*) es 30.5. Debido a que la matriz es simétrica, la distancia anterior es la misma que la distancia de la segunda columna (*we*) con la fila tercera fila (*bre*). Hay otros caminos con diferente distancia a la dada, como por ejemplo: *we – ir – bre* o *we – ga – ir – bre* pero notemos que estas distancias son valores mayores a la distancia encontrada inicialmente.

El orden de las lenguas en las restantes matrices se señala en la parte superior de cada matriz.

Posteriormente unimos todas las gráficas y matrices formando una sola gráfica y matriz general de camino léxico de distancias mínimas. La matriz, como se ha dicho, es una matriz simétrica con respecto a su diagonal principal. Presentamos en la Figura 9 la gráfica general.

Hallemos el camino léxico de distancia mínima entre las lenguas ga-rus, por-bur, por elegir algunas. Para el primer caso, el camino léxico es {*ga,ir,por,spa,rom,alb,slo,svk,rus*}, la distancia mínima es 368. Para el segundo caso: el camino léxico es {*por,spa,rom,alb,slo,svk,ukr,bur*}, la distancia mínima es 265.

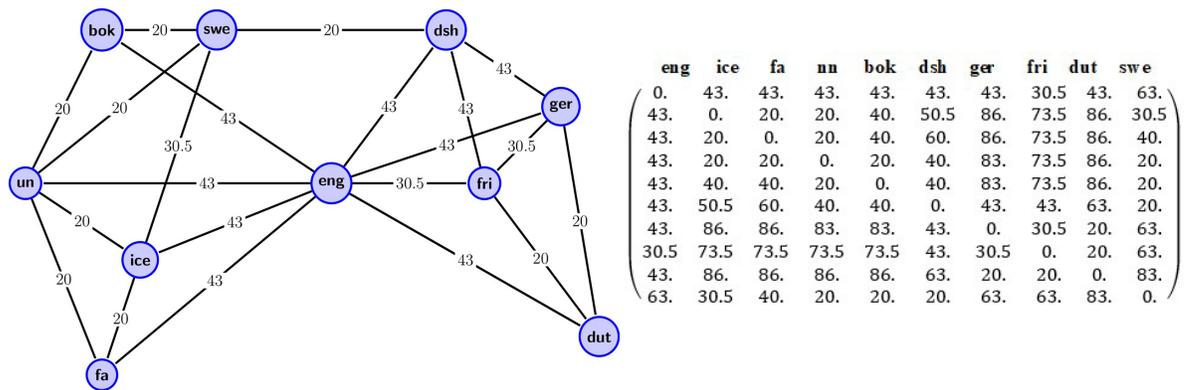


Figura 5. Gráfica y matriz de camino léxico de distancia mínima de la raíz germana. Fuente: Elaboración propia

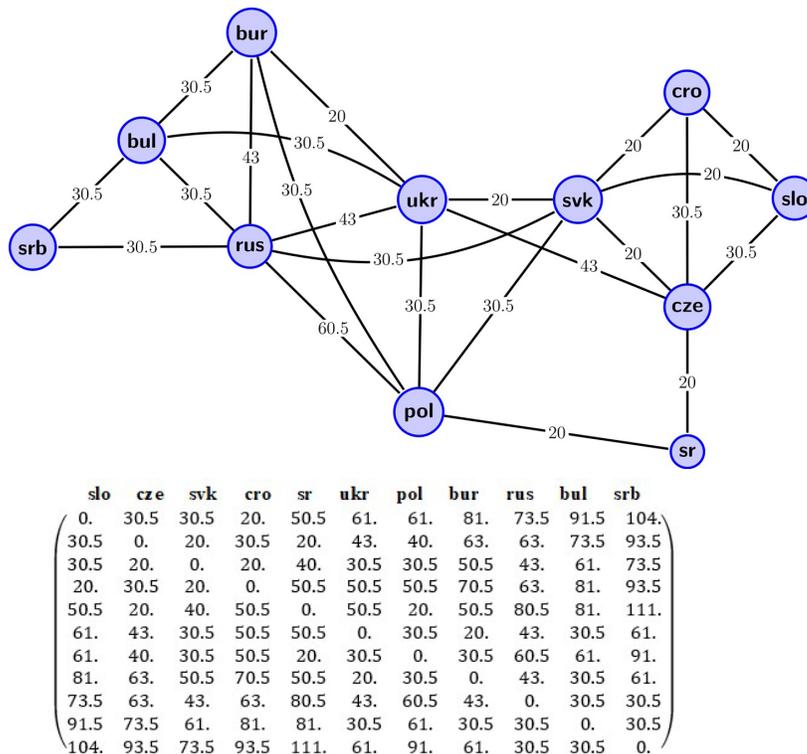
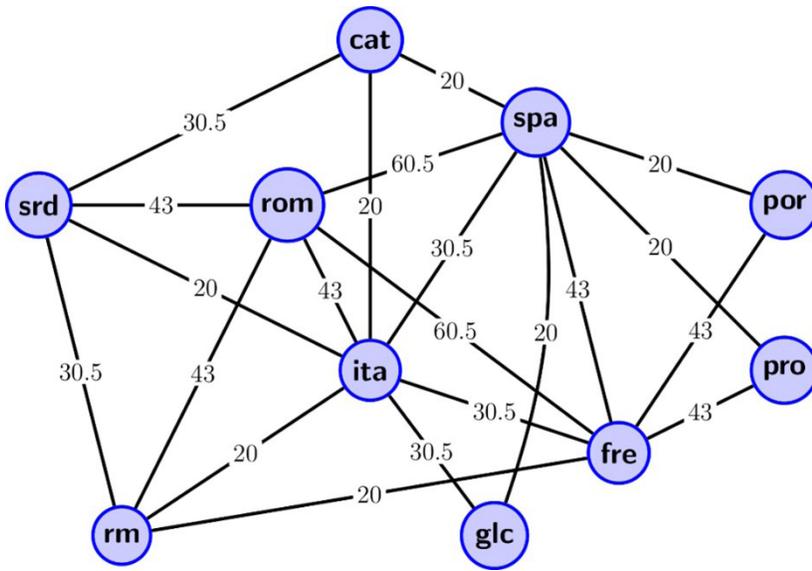
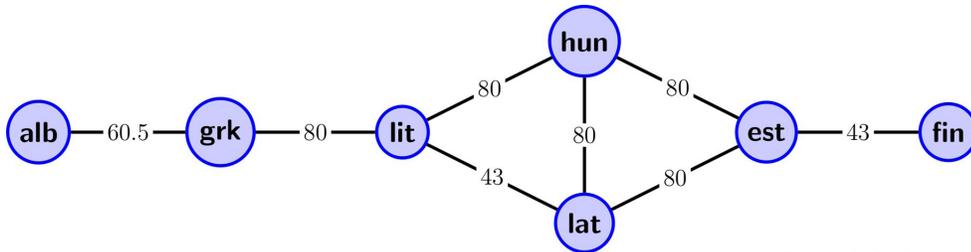


Figura 6. Gráfica y matriz de camino léxico de distancia mínima de la raíz eslovaca. Fuente: Elaboración propia



fre	rm	rom	spa	por	pro	ita	srd	cat	glc
0.	20.	60.5	43.	43.	43.	30.5	50.5	50.5	61.
20.	0.	43.	50.5	63.	63.	20.	30.5	40.	50.5
60.5	43.	0.	60.5	80.5	80.5	43.	43.	63.	73.5
43.	50.5	60.5	0.	20.	20.	30.5	50.5	20.	20.
43.	63.	80.5	20.	0.	40.	50.5	70.5	40.	40.
43.	63.	80.5	20.	40.	0.	50.5	70.5	40.	40.
30.5	20.	43.	30.5	50.5	50.5	0.	20.	20.	30.5
50.5	30.5	43.	50.5	70.5	70.5	20.	0.	30.5	50.5
50.5	40.	63.	20.	40.	40.	20.	30.5	0.	40.
61.	50.5	73.5	20.	40.	40.	30.5	50.5	40.	0.

Figura 7. Gráfica y matriz de camino léxico de distancia mínima de la raíz romance. Fuente: Elaboración propia.



fin	est	hun	lat	lit	grk	alb
0.	43.	123.	123.	166.	246.	306.5
43.	0.	80.	80.	123.	203.	263.5
123.	80.	0.	80.	80.	160.	220.5
123.	80.	80.	0.	43.	123.	183.5
166.	123.	80.	43.	0.	80.	140.5
246.	203.	160.	123.	80.	0.	60.5
306.5	263.5	220.5	183.5	140.5	60.5	0.

Figura 8. Gráfica y matriz general de camino léxico de distancia mínima de las lenguas de interconexión. Fuente: Elaboración propia.

En la última gráfica general es posible observar las lenguas con mayor y menor incidencia. Las de mayor incidencia se encuentran dentro de cada raíz y se nota su importancia como una “lengua de conexión” entre todas las lenguas que forman la raíz. Las lenguas de menor incidencia dan la conexión entre

las raíces. De ahí la importancia de unas y otras, sin olvidar que en el presente trabajo se analizan las lenguas europeas más relevantes. Observando los pesos señalados en la gráfica es posible notar, en cada raíz léxica, que si bien las lenguas de mayor incidencia se pueden considerar como lenguas de paso, no por eso éstas son las más próximas a cada lengua. Es decir,

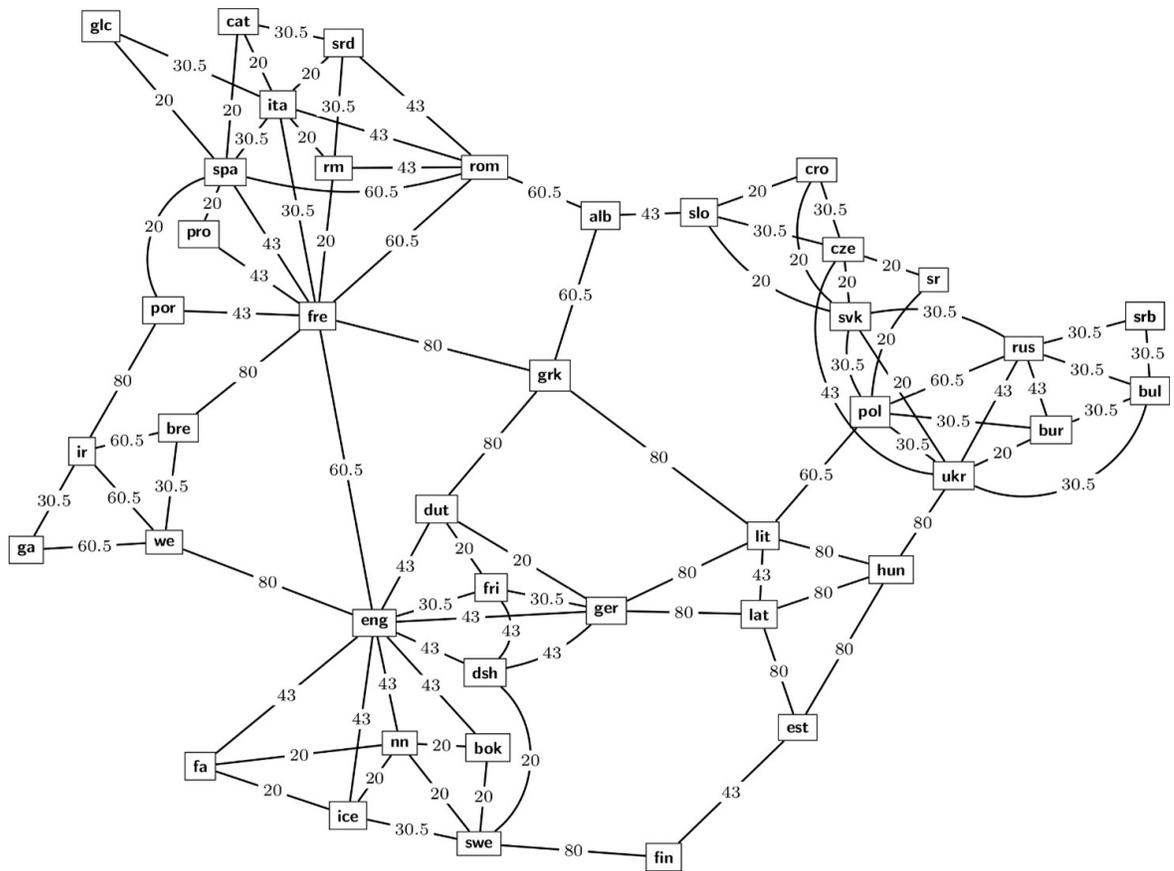


Figura 9. Gráfica general.  
Fuente: Elaboración propia.

es posible evitar la lengua de mayor incidencia para conocer otra de menor incidencia.

Debido a la observación anterior se afirma que, a pesar de la diferencia en criterios en cuanto a que se excluye o incluye tal o cual lengua en un análisis lingüístico, desde el punto de vista matemático, esto simplemente enriquece el estudio pues es posible presentar la matriz de camino léxico para cada variante que se proponga. Por ejemplo, en la Figura 10, donde la gráfica representa a cualquier

raíz léxica en nuestro estudio, podemos pasar de la gráfica léxica 10 a) a la 10 b) incluyendo la lengua  $v$  entre  $v_1, v_5$ , y la lengua  $u$  entre  $v_2, v_6$ .

## 4. Conclusiones

Las características y propiedades de las estructuras llamadas gráficas que se encuentran en diferentes áreas de la ciencia, en nuestro caso, la lingüística, han ido encontrando mayor aplicación. Otros campos de la matemática, como la teoría de conjuntos y el álgebra van teniendo mayor interés para los especialistas.

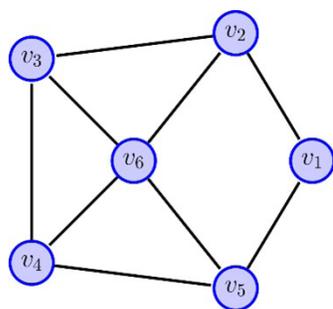


Figura 10a)

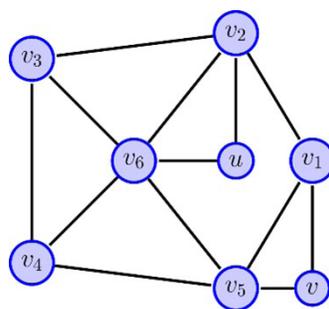


Figura 10b)

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se muestra que la aplicación del aparato matemático, en particular la teoría de gráficas, permite un análisis de una gama de fenómenos varios, en particular en el estudio de la conexión lingüística. El especialista puede, con base a su experiencia acumulada, proyectar nuevas gráficas léxicas de interés tecnológico, de análisis, etc. con la finalidad de penetrar en esa interacción escondida de las lenguas que genera la idea de abordar su análisis con herramientas matemáticas. Esta forma de estudio permitiría analizar una gran cantidad de propuestas de análisis lingüístico, que sin la ayuda del aparato matemático requeriría de un proceso experimental costoso y un proceso complejo de cálculos.

## Referencias

- Anisimov, A. (1991). *Lingüística Computacional*. Ucrania: Ciencia.
- Bakker, D., & Haspelmath, M. (2013). *Languages Across Boundaries: Studies in Memory of Anna Siewierska*. Berlin: Walter de Gruyter GmbH.
- Echeverría, M., Vargas, R., Urzúa, P., & Ferreira, R. (2008). DispoGrafo-una nueva herramienta computacional para el análisis de relaciones semánticas en el léxico disponible. *Revista Lingüística Teórica y Aplicada*, 46 (1), 81-91.
- Trad D,G. (2014). *Lexical Distance Among the Languages of Europe*. European Parliament. <https://termcoord.eu/2014/01/lexical-distance-languages-europe/>
- Gladkii, A., & Melchuk, I. (1969). *Elementos de la Lingüística Matemática*. Moscú: Ciencia.
- Pitrovskii, R., Bektaev, K., & Pitrovskaja, A. (1977). *Lingüística Matemática*. Moscú: Escuela Superior.
- Rosen, K. (2004). *Matemática Discreta y sus Aplicaciones*. España: Mc Graw Hill.
- Salcedo, L. (2013). El léxico disponible en geometría de alumnos de Concepción de Chile. *Actas del VII CIBEM*, VII, pp. 3363-3370.

# Riqueza del Golfo de México Profundo. Una solución a la decadencia de la producción nacional de crudo

Luis Guillermo Herrera Morales\*

Ingeniería de Petróleos  
Universidad del Istmo

Correspondencia:  
\*lgherrera12@gmail.com

## Palabras Clave:

Yacimientos, Aguas profundas, Reservas, Golfo de México, Recursos prospectivos

## RESUMEN

Por definición, los recursos prospectivos es el volumen de hidrocarburos, estimado a una fecha determinada, que se infiere puede ser potencialmente recuperable a partir de acumulaciones no descubiertas mediante la aplicación de proyectos futuros. México cuenta con distintas provincias petroleras, tanto terrestre como marinas, una de ellas, la Provincia Petrolera del Golfo de México Profundo (PPGMP), la cual es susceptible de proponer bloques exploratorios con gran potencial petrolero y se componen por las Provincias Salina del Bravo, Cinturón Plegado Perdido, Cordilleras Mexicanas, Cinturón Plegado de Catemaco y Cuenca Salina. Este documento expone, de manera general, la riqueza petrolera con la que cuenta el País como recurso prospectivo en dichas zonas para hacer frente a la decadencia de producción nacional en los campos ya descubiertos y como podría ser una solución factible para solventar sus demandas energéticas.

## ABSTRACT

Prospective resources are the volume of hydrocarbons, estimated at a given date, that are inferred to be potentially recoverable from undiscovered accumulations through the application of future projects. Mexico has different petroleum provinces, both onshore and offshore, one of them, the Deep Gulf of Mexico Petroleum Province (PPGMP), which is susceptible to propose exploratory areas with great petroleum potential and is composed by the Provinces Salina del Bravo, Perdido Folded Belt, Mexican Cordilleras, Catemaco Folded Belt and Salina Basin. This document exposes, in a general way, the oil wealth that the country has as a prospective resource in these areas to face the decline of national production in the fields already discovered and how it could be a feasible solution to solve its energy demands.

## 1. Introducción

La estrategia exploratoria de Petróleos Mexicanos (PEMEX), en particular, sobre las de la cuenca del Golfo de México Profundo permitirá evaluar el potencial petrolero estimado en 29 mil 500 millones de petróleo crudo equivalente y que representa más del 50% del total de los recursos prospectivos del país.

Parte fundamental del cumplimiento de la estrategia exploratoria de PEMEX-PEP ha consistido en adquirir más de 45 mil kilómetros de sísmica 2D y alrededor de 55 mil kilómetros cuadrados de sísmica 3D.

A partir de 2010 Pemex efectuó una campaña de adquisición sísmica 2D en la parte oriental del Golfo de México, para realizar los estudios exploratorios necesarios que permitieran identificar los recursos prospectivos del área y que contribuyan a evaluar el potencial petrolero en aguas profundas. Asimismo,

se han perforado y terminado 15 pozos de los cuales, nueve se declararon productores y seis improductivos (hasta agosto 2021) lo que da una tasa de éxito exploratorio de 66%, a pesar de tratarse de pozos de alto riesgo.

Esta amplia región del territorio mexicano es un área frontera que se encuentra en su fase inicial de evaluación del potencial. Las etapas siguientes del proceso exploratorio, de incorporación de reservas, de caracterización inicial y delimitación de yacimientos, ya se están cumpliendo con los pozos exploratorios productores en objetivos terciarios, con la finalidad de reducir el tiempo del ciclo exploración-producción.

## 2. Definición de aguas profundas a nivel internacional y nacional

No existe una convención internacional para definir las aguas profundas. El gobierno de Estados Unidos

–el país en el que se inició esa rama de la industria petrolera–, las considera aquellas en más de 1000 pies, es decir, alrededor de 300 metros, y, en ese mismo país algunas publicaciones petroleras especializadas denominan profundas a las de más de 500 metros y ultra profundas a las de más de mil 500 metros de tirante de agua.

Brasil que es un país pionero en esas actividades, no ha propuesto alguna definición y fue avanzando en la exploración marítima, perforando sus primeros campos en más de 500 metros desde 1985. En Noruega y en Reino Unido, llaman profundos a los campos de 400 metros, hasta el 2015, en el Mar del Norte, sólo existen cuatro campos en más de 500 metros, tres de los cuales permanecen vírgenes.

Pemex se alineó durante varias décadas con la definición de Estados Unidos, pero en el sexenio del presidente Vicente Fox, se empezó a denominar profundas sólo a las perforaciones en más de 500 metros. En la Figura 1, se muestra un bosquejo de algunos de los pozos perforados con mayor profundidad de tirante de agua en el Golfo de México y cuyos resultados han sido favorables, así como algunas de las condiciones del lecho marino para equipos de instalación de pozos.

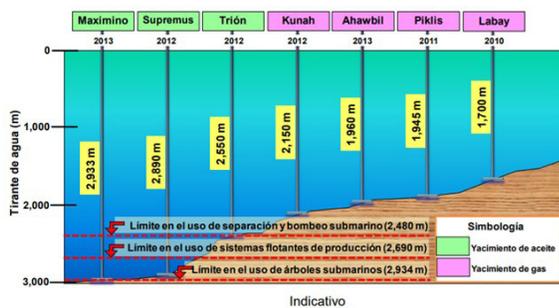


Figura 1. Bosquejo de los pozos con mayor tirante de agua en el Golfo de México Profundo (PEMEX, 2012; CNH, 2012-2013).

### 3. Provincia petrolera del Golfo de México Profundo

La Figura 2, muestra la ubicación de la Provincia Petrolera del Golfo de México Profundo (PPGMP), que corresponde a la porción central del Golfo, limitada por la isobata de 500 m y el límite de mar territorial.

En los últimos años se han realizados trabajos exploratorios para evaluar el potencial petrolero del área, desde estudios regionales hasta la perforación de pozos exploratorios en áreas estratégicas. Con base en estos estudios se han identificado en la re-

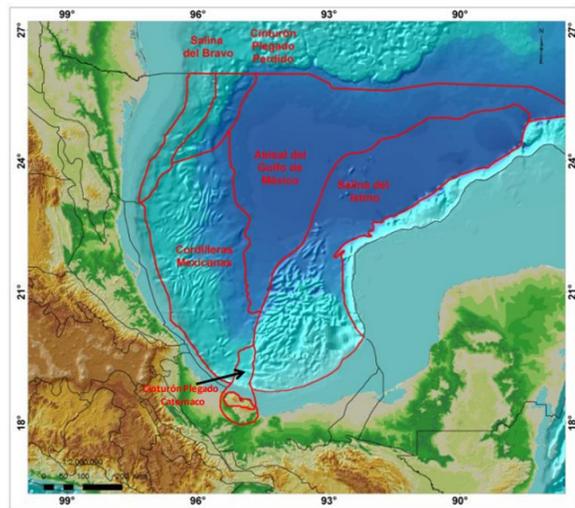


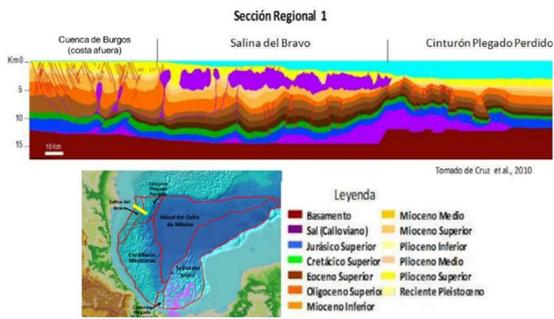
Figura 2. Mapa de localización de la Provincia Petrolera Golfo de México Profundo. (Tomado de PEMEX-CNH, 2010).

gión seis subprovincias con características geológicas distintivas, las cuales se describen, de forma general, a continuación:

a) Salina del Bravo: esta provincia se localiza en el sector nororiental del Golfo de México, frente al delta del Río Bravo (Fig. 3) en tirantes de agua que varían de 500 a 2500 m, se caracteriza por la presencia de mantos tabulares de sal, toldos y diapiros, evacuados desde el poniente, que, de acuerdo con el modelo geológico regional, traslapan a un cinturón plegado subsalino que hacia el oriente emerge como el Cinturón Plegado Perdido.

En esta provincia se han realizado estudios de manifestaciones superficiales y muestreo de fondo marino que indican la presencia de hidrocarburos líquidos que se pueden estar fugando de arenas turbidíticas terciarias de complejos de canales y abanicos submarinos (Guzmán, 1999; Holguín et al., 2005), las cuales se encuentran conformando trampas estratigráficas, estructurales y combinadas tales como acuñamientos contra diapiro y estructuras tipo tortuga, entre otros.

b) Cinturón Plegado Perdido: se localiza al oriente de la subprovincia Geológica Salina del Bravo y se caracteriza por presentar un estilo de pliegues y fallas inversas orientadas de suroeste a noreste, que despegan en la sal autóctona jurásica (Fig. 3). Este cinturón plegado se asocia a la compresión y al mecanismo de inflación de la sal originado por la tectónica gravitacional ocurrida al occidente del área, en la Provincia Petrolera Burgos, durante el Oligoceno-Mioceno (Cruz et al., 2010).



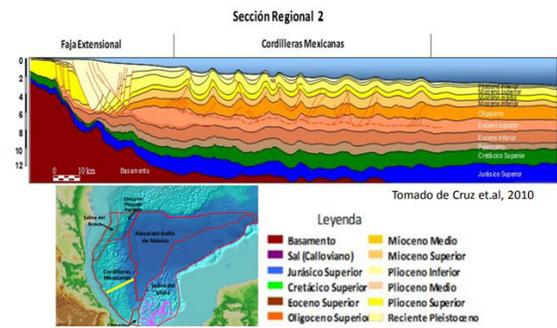
**Figura 3.** Sección estructural tipo de las Provincias Geológicas Salina del Bravo y Cinturón Plegado Perdido (Tomado de CNH, 2015).

Las trampas de este cinturón son grandes estructuras anticlinales (con áreas de 100 a 250 km<sup>2</sup>). El cinturón de pliegues se extiende hacia la parte estadounidense del Golfo de México, en donde se han realizado varios descubrimientos importantes de aceite entre los que se encuentran Baha, Trident, Great White, Tobago, Silvertip y Tiger.

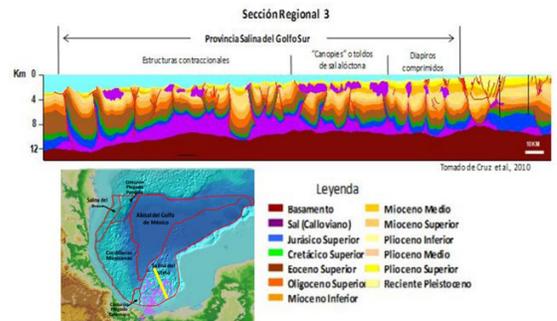
c) Cordilleras Mexicanas: esta provincia se localiza al oriente de la plataforma continental del Golfo de México, frente a la costa de los estados de Veracruz y Tamaulipas, donde se formó un amplio cinturón plegado desde la parte sur de la Provincia Salina del Bravo hasta el límite noroccidental de la Provincia Geológica del Cinturón Plegado Catemaco, generado como respuesta a la extensión gravitacional de la faja extensional desarrollada en la parte sur de la Cuenca de Burgos y en la Provincia Geológica del Cinturón Extensional Quetzalcóatl.

Este cinturón plegado se extiende a lo largo de 500 km y cubre cerca de 70,000 km<sup>2</sup> en tirantes de agua entre 1,000 y 3,000 m. Se caracteriza por anticlinales simétricos largos y angostos, generalmente con vergencia al oriente y en algunos casos en sentido opuesto. El sistema ligado extensión - compresión que genera la Provincia Geológica Cordilleras Mexicanas se transmite a través de más de una superficie de despegue dentro del Terciario, interpretándose la más importante en el Paleógeno (Fig. 4).

En esta provincia se ha perforado un pozo corroborando la presencia de hidrocarburos en fase gaseosa en las secuencias del Mioceno, mientras que en trampas preservadas por debajo del despegue del Eoceno el pronóstico es de aceites medios a ligeros que pueden estar almacenados en areniscas turbidíticas depositadas en aguas



**Figura 4.** Sección estructural tipo de la Provincia Geológica Cordilleras Mexicanas. (Tomado de CNH, 2015).

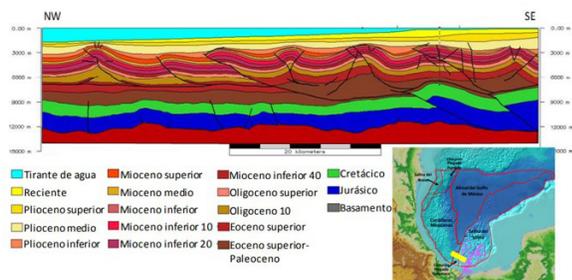


**Figura 5.** Sección estructural tipo de la Provincia Geológica Salina del Istmo. (Tomado de CNH, 2015).

profundas como sistemas de nivel bajo (Guzmán, 1999; Salomón et al., 2004; Holguín et al., 2005).

d) Salina del Istmo, esta provincia es la extensión hacia aguas profundas de la Provincia Salina del Istmo y se distribuye desde la isobata 500 m hasta la planicie abisal, es la contraparte sur de la Provincia Geológica Salina del Bravo. Se caracteriza por presentar diferentes estilos de tectónica salina, que en una dirección sur-sureste a norte-noroeste, evoluciona de diairos comprimidos, algunos colapsados, que están conectados con la sal madre por su origen asociado a procesos de "downbuilding" y formación de minicuenas, a geometrías de toldos de sal alóctona emplazados cerca del fondo marino y estructuras contraccionales con inflación de sal (Fig. 5).

De acuerdo con estudios de muestreo de fondo marino y modelados de cuenca se considera que el tipo de hidrocarburos esperados podrían ser desde gas y condensado hasta aceites superligeros a pesados que estarían atrapados en calizas mesozoicas fracturadas y areniscas turbidíticas terciarias de complejos de canales y abanicos submarinos depositados sobre límites de secuencia principalmente como sistemas de nivel bajo cuya distribución estuvo influencia-



**Figura 6.** Sección estructural tipo de la Provincia Geológica Cinturón Plegado Catemaco. (Tomado de CNH, 2015).

da por la tectónica salina concentrando areniscas en minicuenas (Guzmán, 1999; Cruz y Villanueva, 2004; Holguín et al., 2005).

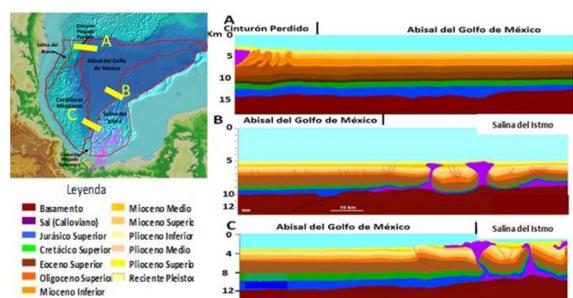
e) Cinturón Plegado Catemaco, esta provincia se localiza al norte del Complejo Volcánico de los Tuxtlas, en la porción marina profunda. Es un cinturón deformado con pliegues asimétricos con orientación noreste-suroeste y vergencia al noroeste, afectados por fallas inversas y cabalgaduras que despegan de superficies ubicadas en la base del Paleoceno y el Eoceno (Fig. 6).

De acuerdo con las secuencias de expansión asociadas a la deformación, este sistema plegado se formó durante el Mioceno medio-tardío, contemporáneo a la deformación Chiapaneca y por la orientación de sus ejes parece estar influenciado por el colapso gravitacional del Neógeno. Los recientes descubrimientos en el área han corroborado la presencia de gas en trampas neógenas y se postula que en trampas más antiguas pueda existir la presencia de aceite ligero (Holguín et al., 2005).

f) Abisal del Golfo de México, se localiza en la parte central y más profunda del Golfo de México (Fig. 7), en esta área la columna sedimentaria no tiene una deformación importante, por lo que solo pudieran existir estructuras de muy bajo relieve o trampas estratigráficas que pudieran ser de interés económico, se infiere que en ella están contenidas rocas arcillosas y desarrollos de areniscas de abanicos de piso de cuenca, por su tirante de agua representarían la última frontera en el Golfo de México Profundo.

#### 4. Recursos prospectivos del Golfo de México Profundo

La identificación, localización y cuantificación de los recursos prospectivos dentro del territorio nacional, es de suma trascendencia para las actividades de explo-



**Figura 7.** Secciones estructurales en la Provincia Geológica Abisal del Golfo de México mostrando la escasa estructuración en toda la columna sedimentaria. (Tomado de CNH, 2015).

ración y extracción de hidrocarburos y en consecuencia, para llevar a cabo la planeación y administración de los recursos de la Nación. Por lo tanto, la necesidad de actualizar e incrementar el conocimiento del subsuelo y de estos recursos, mediante procesos metodológicos basados en las mejores prácticas internacionales en la materia, las cuales, se fundamentan en el análisis e integración de información exploratoria disponible, para finalmente evaluar estructuras geológicas potencialmente almacenadoras de hidrocarburos y sus plays asociados.

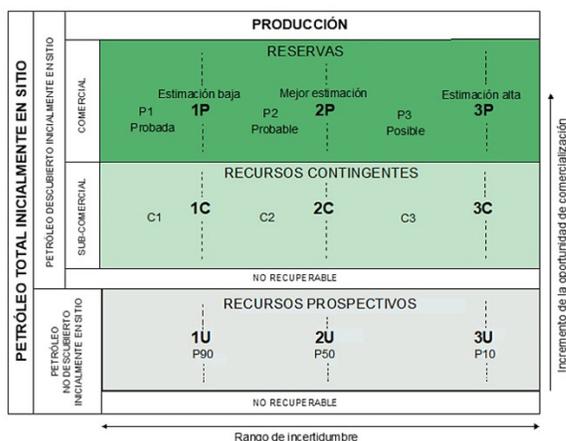
Los prospectos exploratorios fueron interpretados y evaluados utilizando criterios homologados y adoptando los principios fundamentales de evaluación y clasificación de recursos del “Sistema de Administración de Recursos Petrolíferos” o “*Petroleum Resources Management System*” (PRMS, por sus siglas en inglés), publicada de manera conjunta por la Sociedad de Ingenieros Petroleros (SPE, por sus siglas en inglés), el Consejo Mundial del Petróleo (WPC, por sus siglas en inglés), la Asociación Americana de Geólogos Petroleros (AAPG, por sus siglas en inglés), la Sociedad de Ingenieros Evaluadores del Petróleo (SPEE, por sus siglas en inglés), la Sociedad de Petrofísicos y Analistas de Registros de Pozo (SPWLA, por sus siglas en Inglés) y la Asociación Europea de Geocientíficos e Ingenieros (EAGE, por sus siglas en inglés).

#### 5. Metodología para la evaluación de recursos prospectivos

Los recursos prospectivos es el volumen de hidrocarburos, estimado a una fecha determinada, que se infiere puede ser potencialmente recuperable a partir de acumulaciones no descubiertas mediante la aplicación de proyectos futuros (SPE, 2018). Estos recursos potenciales se localizan en el subsuelo y no

pueden ser directamente contados o inspeccionados; sin embargo, pueden ser estimados con base en la evaluación de datos que indirectamente provean evidencia de la cantidad de hidrocarburos que puede ser potencialmente recuperable en el subsuelo.

Únicamente el petróleo remanente comercialmente recuperable de una acumulación conocida puede ser clasificado como reserva mediante su asociación con un proyecto de desarrollo (SPE, 2011), mientras que otras cantidades deben ser clasificadas como recursos contingentes o recursos prospectivos (Figura 8). Sin embargo, todos los tipos de acumulaciones representan un valor, ya sea para el activo de producción o para futuras oportunidades de desarrollo, ya que en cualquiera de los casos estos tienen que ser medidos y administrados (SPE, 2011).



**Figura 8.** Categorización y clasificación de los volúmenes de hidrocarburos de acuerdo con el nivel de incertidumbre técnica y la posibilidad de desarrollo de un proyecto comercial. (Modificado de SPE, 2018).

## 6. Variables para la estimación de recursos prospectivos convencionales

En la evaluación de recursos, generalmente se emplean diferentes métodos según la etapa de madurez del proyecto; es decir, si el proyecto de encuentra en etapa de exploración, evaluación o desarrollo y a menudo, se integran varios métodos para definir y manejar mejor la incertidumbre.

Mediante una selección apropiada de análogos y una estimación probabilística de recursos, se pretende determinar el rango de incertidumbre que existe en etapas tempranas de la exploración, cuando la información directa del subsuelo generalmente es limitada. De acuerdo con el PRMS, el uso de análogos en conjunto con un enfoque probabilístico mejora la

comprensión del rango de incertidumbre presente en parámetros clave en la estimación volumétrica de recursos, tales como:

- Propiedades petrofísicas (por ejemplo, espesores netos y brutos, porosidad, saturación, etc.).
- Condiciones del posible yacimiento (por ejemplo, presión y temperatura, geometría y heterogeneidad, tamaño de la acumulación de hidrocarburos, etc.).
- Propiedades de los fluidos (por ejemplo, tipo de hidrocarburo, composición, densidad, etc.).
- Combinaciones de calidad de roca almacén, características geológicas, tipo de fluidos y variaciones en los parámetros de saturación (vertical y horizontal).
- Entender y comunicar el nivel de incertidumbre de las estimaciones de recursos.

Las estimaciones del recurso recuperable deben entonces reflejar la incertidumbre combinada de los volúmenes en sitio y la eficiencia de recuperación, a partir de los parámetros volumétricos y rangos análogos aplicados al potencial yacimiento.

### 6.1 Aplicaciones sísmicas

En la actualidad, los estudios geofísicos asociados con la sísmica de reflexión son una de las principales herramientas empleadas para evaluar la cantidad de hidrocarburos que potencialmente pueden estar almacenados en un yacimiento. Las interpretaciones y conclusiones a las que se llega mediante el análisis de los estudios sísmicos, integrados con el análisis de registros geofísicos, pruebas de presión, descripciones y estudios de núcleos, modelos estratigráficos-sedimentarios y de evolución de las cuencas, entre muchos otros tipos de estudios, son fundamentales en la evaluación de los recursos prospectivos.

Los datos derivados de la perforación tanto de pozos exploratorios, como de pozos de desarrollo resultan clave en la exploración petrolera y en especial en la evaluación del potencial prospectivo de un área determinada. Cada que un nuevo pozo es perforado, la interpretación de los estudios sísmicos tiene que ser revisada y recalibrada, con el fin de tomar ventaja de la nueva información directa del subsuelo que se obtiene con la perforación; de tal manera que, con la integración de nueva información, las interpretaciones que originalmente se consideran ambiguas, se convierten paulatinamente en confiables, reduciendo la incertidumbre de las relaciones entre la respuesta

sísmica y las propiedades de las rocas en el subsuelo (SPE, 2011).

Sin embargo, en áreas frontera en las que no existe sísmica 3D, la sísmica 2D tiene un rol importante para realizar una estimación inicial de los recursos de hidrocarburos (SPE, 2011). Las interpretaciones de los datos sísmicos bidimensionales o tridimensionales que están encaminados directamente hacia la estimación de los volúmenes de recursos prospectivos de hidrocarburos pueden agruparse con dos principales objetivos:

- Definir la estructura y geometría de la trampa; y
- Caracterizar la roca y las propiedades de los fluidos (SPE, 2011).

## 6.2 Geometría de la trampa

La geometría de una trampa potencialmente almacenadora de hidrocarburos está determinada por la configuración geológica de los paquetes de rocas asociados a eventos estructurales en espacio y tiempo, a los rumbos y echados de las rocas almacén y sello, la ubicación y posición de las fallas, así como de otras barreras o discontinuidades geológicas que faciliten o impidan el paso de los fluidos, como pueden ser fracturas, sal, arcilla, rocas ígneas o características estratigráficas específicas (como acñamientos, cambios laterales de facies, etc.) (SPE, 2011).

Los estudios sísmicos se adquieren en el dominio del tiempo, midiendo el tiempo que tardan las ondas acústicas de la fuente al receptor a través de las rocas del subsuelo (sísmica de reflexión); estos datos de velocidades sísmicas en combinación con los datos acústicos a nivel de pozo se usan para crear modelos o funciones de velocidades para convertir del dominio de tiempo a profundidad. Asimismo, la interpretación de horizontes sísmicos realizados en tiempo, pueden realizarse en profundidad.

Actualmente, existen procesos de migración de ondas sísmicas directamente a profundidad (por ejemplo, migraciones RTM o *Reverse Time Migration*); sin embargo, es recomendable calibrar la información sísmica con datos de pozo. Dicha información en profundidad sentará la base para realizar las estimaciones de la geometría, espesor y volumen del potencial yacimiento, el cual será posteriormente integrado con una estimación de sus posibles propiedades, como son la porosidad, el espesor neto, la saturación de hidro-

carburos, etc., para realizar un cálculo del potencial volumen original en sitio de hidrocarburos.

Dado que la estimación de los elementos estructurales o geometría, espesor y profundidad resultan de la interpretación de datos sísmicos e información de pozos, es importante considerar la incertidumbre en las estimaciones de los potenciales volúmenes en sitio que puedan surgir a partir de los siguientes factores (SPE, 2011):

- Posicionamiento incorrecto de elementos estructurales durante el procesamiento de la sísmica.
- Interpretaciones incorrectas.
- Errores en la conversión de tiempo a profundidad.

## 6.3 Propiedades de las rocas y los fluidos

Otra aplicación importante del análisis de la información sísmica, especialmente de sísmica tridimensional, es la predicción de las propiedades físicas de las rocas y de los fluidos contenidos en su espacio poroso. Las propiedades del yacimiento que potencialmente puede predecir la sísmica 3D, cuando la calidad de la información así lo permite, son porosidad, litología, presencia y saturación de hidrocarburos.

Las predicciones que eventualmente se realicen, deben estar soportadas al menos por lo siguiente:

- Control de pozos; y
- Un modelo sedimentario representativo

Dependiendo de las condiciones particulares del estudio, así como de la cantidad y calidad de la información utilizada, las predicciones pueden ser cuantitativas o cualitativas. A continuación, se describen de manera breve algunos métodos considerados por el PRMS para predecir las propiedades de las rocas y los fluidos.

La litología o tipo de roca, incluyendo los espesores brutos y netos, así como la porosidad, pueden ser estimados con un cierto rango de incertidumbre, mediante un modelo sedimentario de la roca almacén, el cual deberá estar sustentado con datos disponibles de pozos (generalmente a distancias razonables del área de interés), análisis de facies sísmicas 3D y pozos o campos análogos. Con el conocimiento del sistema sedimentario asociado con la potencial roca almacén (por ejemplo, fluvial, deltaico, de aguas profundas, etc.), se puede tener un marco geológico general y predecir dichas propiedades dentro de rangos apro-

piados a partir de pozos o campos análogos (SPE, 2011).

Si la información disponible lo permite, es posible realizar predicciones con mayor certidumbre y resolución, con base en la aplicación de atributos sísmicos (p.e., Brown, 1996; Chopra y Marfurt, 2007). De acuerdo con el PRMS, el uso de atributos sísmicos está condicionado a lo siguiente:

- Exista una relación a escala de registro geofísico entre los atributos y las características específicas del potencial yacimiento;
- Esta relación se conserve a escala sísmica (la cual tiene menor resolución vertical);
- La calidad de la información sísmica sea adecuada; y
- Exista una correlación confiable entre la información sísmica y los registros geofísicos de pozos.

Es importante resaltar que los puntos antes mencionados, sean corroborados sistemáticamente antes de establecer predicciones sobre las posibles propiedades físicas de las rocas. Adicionalmente, es importante asegurarse que los modelos sísmicos calibrados con registros geofísicos de pozos que se generen (sismogramas sintéticos), se correlacionen adecuadamente con los datos sísmicos.

La presencia de hidrocarburos generalmente reduce la velocidad sísmica y la densidad total de las rocas que actúan como almacén y por lo tanto, modifica el contraste de impedancia respecto de las rocas circundantes del mismo tipo, pero saturadas con agua (generalmente salmuera). Este tipo de anomalías de amplitud relacionadas con la presencia de hidrocarburos pueden constituirse como indicadores directos de la presencia de hidrocarburos (IDH o DHI) y su definición como tal, debe de estar sustentada por el análisis de las propiedades de las rocas y su respuesta en la sísmica, para asegurar que la fuerza y la polaridad de las reflexiones sísmicas sean consistentes con la geometría de la trampa.

Una anomalía de amplitud que típicamente es considerada como un IDH, son los incrementos en la intensidad de reflexión sísmica que producen puntos brillantes o "*bright spots*". Sin embargo, no todos los puntos brillantes son causados por la presencia de hidrocarburos, ya que los aumentos en la impedancia acústica pueden ser causados también por aumentos en la porosidad, por lo que, de identificarse un punto

brillante, éste debe de ser congruente con la estructura; es decir, los cambios de amplitud deben de coincidir con el contorno estructural.

Cuando una estructura identificada como potencialmente almacenadora de hidrocarburos está siendo evaluada, los atributos sísmicos sirven como una herramienta para incrementar la confianza ante la posible presencia de hidrocarburos. Sin embargo, las predicciones a partir de datos sísmicos para definir la geometría de la trampa y las propiedades del sistema roca-fluidos tienen incertidumbre inherente, ya que la precisión de dichas predicciones dependerá principalmente de la calidad del dato sísmico (ancho de banda, contenido de frecuencia, relación señal/ruido, parámetros de adquisición y procesamiento, efectos de sobrecarga, etc.) y los datos de pozo usados para la calibración.

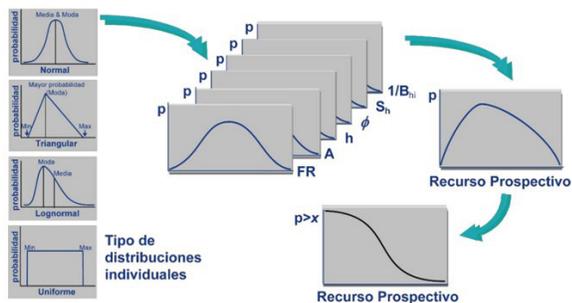
#### 6.4 Métodos geoestadísticos

De acuerdo con el PRMS (2018), los métodos geoestadísticos se constituyen como una variedad de técnicas y procesos para el análisis e interpretación de datos de geociencias y de ingeniería para describir la variabilidad e incertidumbre de los yacimientos.

Los métodos geoestadísticos se pueden usar para preservar la distribución espacial de la información a través de un modelo estático; por ejemplo, al incorporar la información sísmica a un modelo geoestadístico, se puede mejorar el entendimiento de la distribución de propiedades de interés de los potenciales yacimientos y realizar la estimación de recursos de una manera más confiable. El objetivo es generar un modelo geométrico que incorpore información sísmica y de pozos, que a partir de la geoestadística pueda ser cuantitativo (Figura 9).

La caracterización geoestadística requiere de la integración de datos que permita la correlación espacial de las heterogeneidades que pueda presentar un potencial yacimiento. La propagación espacial de propiedades de interés con un enfoque geoestadístico, puede realizarse siguiendo diferentes metodologías (p.e. Dubrule, 2003; Avseth et al., 2005; Bosch et al., 2010).

Generalmente la estimación de las propiedades de un yacimiento a partir de información sísmica y de pozos, utiliza métodos geoestadísticos mediante procesos de inversión sísmica o bien, a partir de su



**Figura 9.** Esquema que muestra el proceso general de generación de funciones de densidad de probabilidad de los parámetros volumétricos, que a su vez son la base para la generación de la función de densidad de probabilidad y el muestreo estocástico (simulación Monte Carlo) para la estimación de los recursos prospectivos (modificado de SPE, 2011).

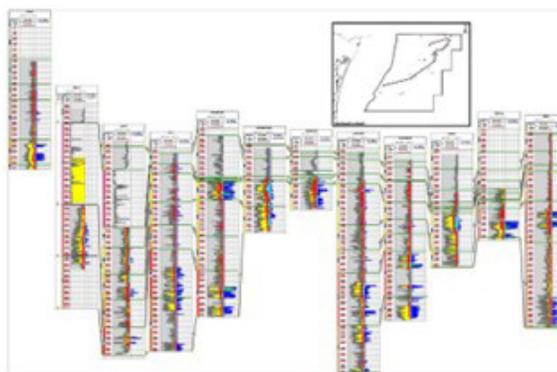
calibración con propiedades elásticas (impedancia acústica). Los métodos geoestadísticos generalmente utilizados para la estimación de propiedades partir de información sísmica y de pozos, son los métodos *kriging* o *cokriging*.

La calibración de la información puntual de un pozo con la información sísmica se realiza mediante la construcción de variogramas, que estiman estadísticamente las correlaciones espaciales de la impedancia acústica con una o varias propiedades de interés. El primer elemento para considerar en la construcción de un modelo de simulación es el marco estructural que consta de superficies, horizontes, fallas y demás elementos geológicos a partir de los cuales, se realizará la población de ciertas propiedades de interés.

El enlace entre el modelo estructural y el modelo de las propiedades es el marco estratigráfico, a partir del cual se definirá el tipo de modelado a realizar, ya sea modelo basado en celdas o modelo basado en objetos (Dubrule, 2003).

Cualquiera que sea el enfoque por utilizar, se debe adoptar un tamaño de celda adecuado (*stratigraphic grid*) en función de la resolución de los datos sísmicos y la información de pozos disponible. La integración de la información de pozos (p.e. registros geofísicos de pozos, núcleos, etc.) (ver Figura 10), con las propiedades derivadas de la sísmica deben de estar calibradas, de tal manera que las heterogeneidades a escala subsísmica sean correlacionables con la información geológica y con las variaciones espaciales entre pozos.

El modelo basado en objetos asume que las diferentes arquitecturas estratigráficas (como canales, abanicos, desbordes de canal, etc.) se pueden describir usando geometrías simples; mientras que un



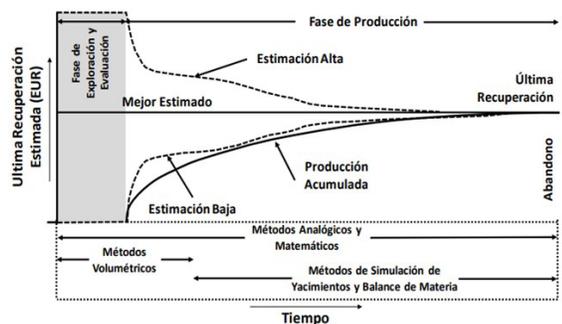
**Figura 10.** Ejemplo de las evaluaciones petrofísicas realizadas en los pozos del Área Perdido, a partir de los registros geofísicos de pozos y los análisis a muestras de núcleos (Modificado de CNH-PEMEX, 2019).

modelo basado en celdas asume sólo las relaciones estadísticas entre los diferentes tipos de facies sedimentarias que podrían estar presentes en cada celda individual del modelo.

La combinación de métodos geoestadísticos con sísmica e información de pozos, se basa en el principio de que existe de correlación de las características geológicas espacialmente, donde esta correlación espacial se cuantifica y se utiliza para asignar valores de propiedades de interés, hacia zonas no muestreadas a través de pozos.

### 6.5 Estimación volumétrica de prospectos exploratorios

Los cálculos para estimar volúmenes en sitio y los métodos análogos para estimar la eficiencia de recuperación o factores de recuperación, son procedimientos indirectos usados durante las etapas de exploración, descubrimiento, evaluación y desarrollo en la cadena de la exploración y producción de cualquier proyecto de exploración-producción de hidrocarburos (Figura 11).



**Figura 11.** Cambio en la incertidumbre y métodos de evaluación de la Recuperación Final Estimada EUR (SPE, 2011).

Estos procedimientos son llamados indirectos debido a que la recuperación final estimada (EUR, por sus siglas en inglés; *Estimated Ultimate Recovery*) no es calculada directamente con datos medidos en el subsuelo.

El cálculo de la EUR (comúnmente expresada en barriles estándar o *standard barrels* STB, por sus siglas en inglés; o bien, pies cúbicos estándar o *standard cubic feet* scf) requiere se estime de manera independiente al volumen de petróleo inicial en sitio (PIIP, por sus siglas en inglés; *Petroleum Initially In-Place*) y el factor de recuperación (FR), es generalmente expresado en términos de una simple relación volumétrica, definida por:

$$RFE_{(STB \text{ ó } scf)} = PIIP_{(STB \text{ ó } scf)} * F_R \text{ (Fracción de PIIP)}$$

(Ecuación 1)

Mientras que la ecuación volumétrica generalizada para obtener el volumen PIIP, que para el caso de hidrocarburos líquidos es OIIP por sus siglas en inglés (*Oil Initially In Place*) y para el caso de hidrocarburos gaseosos es GIIP por sus siglas en inglés (*Gas Initially In Place*), es:

$$PIIP_{(STB \text{ ó } scf)} = \frac{A * h * \varnothing * (Sh)}{B_{hi}}$$

(Ecuación 2)

Donde las variables expresadas corresponden a:

*A* = área

*h* = espesor neto

$\varnothing$  = porosidad efectiva promedio

*Sh* = Saturación de hidrocarburos

*B<sub>hi</sub>* = factor volumétrico de formación expresado en *Rm<sup>3</sup> / Sm<sup>3</sup>* para aceite y *Rcf / Scf* para gas. En donde (*R*) se refiere a condiciones de yacimiento de temperatura y presión, y (*S*) a condiciones superficiales (atmosféricas). Para los casos de aceite se expresa como *B<sub>oi</sub>*, mientras que, para los casos de gas, como *B<sub>gi</sub>*

Como se mencionó en apartados anteriores, debido al alto grado de incertidumbre de las variables que involucran la estimación volumétrica de los recursos de hidrocarburos en un proyecto que se encuentra en etapas de exploración, evaluación o desarrollo inicial; la evaluación determinística de los recursos prospectivos en prospectos exploratorios no es una

metodología que sea del todo aceptada por la industria. Sin embargo, sienta las bases para la evaluación probabilística de los recursos prospectivos.

## 6.6 Estimación probabilística y de riesgo de recursos prospectivos en prospectos exploratorios

La estimación probabilística de los recursos prospectivos en prospectos exploratorios se compone de dos fases. La primera es el cálculo volumétrico, el cual se basa en un método probabilístico donde aleatoriamente se seleccionan los valores que serán introducidos en la fórmula del cálculo de volumen de hidrocarburos para formar una distribución de posibles resultados.

Posteriormente, se realiza una evaluación y estimación de la probabilidad de la presencia y eficiencia geológica de los elementos y procesos del sistema petrolero, que incluye un análisis para determinar el grado de confiabilidad de las bases de datos empleadas para su estudio. Los elementos y procesos del sistema petrolero, a pesar de que se encuentran de alguna manera implícitos en cada uno de los parámetros geológico-petroleros empleados en el cálculo volumétrico, se evalúan por separado con el objetivo de estimar un valor independiente cuantitativo de riesgo, comúnmente denominado probabilidad de éxito geológico o riesgo geológico.

Una vez determinado el volumen de recursos prospectivos y un valor cuantitativo de riesgo geológico, es posible determinar volúmenes con riesgo geológico o “arriesgados”, mediante la multiplicación de la distribución de los volúmenes obtenidos a través del método probabilístico, por la probabilidad de éxito geológico (*P<sub>g</sub>*), representativa de la evaluación de cada elemento y procesos del sistema petrolero (Figura 12).

## 6.7 Evaluación de riesgo en prospectos exploratorios

En el contexto de la evaluación de prospectos, la probabilidad de éxito geológico (*P<sub>g</sub>*) es un valor numérico que da una medida cuantitativa de la probabilidad de descubrir hidrocarburos producibles. Esto, sin especificar productividad, tipo de hidrocarburo o factores asociados de mercado.

Por otro lado, en el mismo contexto, el riesgo significa la probabilidad de fracaso asociado a la esti-

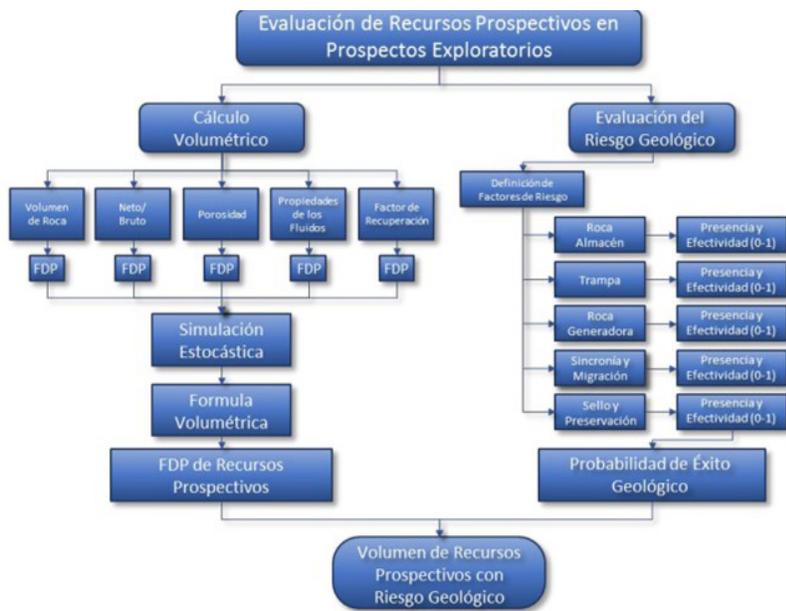


Figura 12. Diagrama de flujo para la evaluación de recursos prospectivos en prospectos exploratorios (modificado de SPE, 2011).

mación de probabilidad de éxito geológico (es decir, Riesgo =  $1 - P_g$ ) y la incertidumbre, se refiere al rango de posibles valores o dimensiones que puede tener el resultado esperado (Bailey et al., 2001).

El análisis de riesgo es entonces, un análisis sobre la confianza de la base de datos y de la probabilidad de ocurrencia de los modelos geológicos que sustentan un posible yacimiento y su evaluación volumétrica (Rose, 2001).

Como se mencionó anteriormente, todos y cada uno de estos elementos son requerimientos esenciales para la existencia de una acumulación de hidrocarburos, por tal motivo, con la falta de presencia o efectividad de alguno de estos, no existirá dicha acumulación. A efectos de evaluar los elementos del sistema petrolero que definen la probabilidad de éxito geológico y asumiendo que la evaluación individual de cada elemento y proceso es independiente, la estimación de la probabilidad de éxito geológico puede obtenerse mediante la multiplicación de la probabilidad individual de los siguientes factores (Murtha, 1995; Delfiner, 2000; Rose, 2001, Pemex, 2012):

- Roca Generadora ( $P_{RG}$ )
- Trampa ( $P_T$ )
- Roca Almacén ( $P_{RA}$ )
- Sello ( $P_s$ )
- Sincronía y Migración ( $P_{SM}$ )

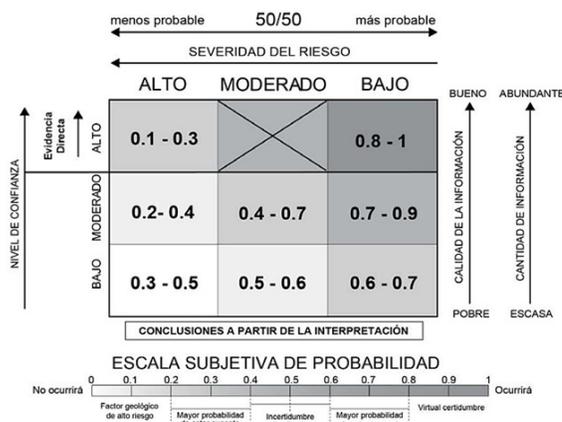
Rose (2001), sugiere que cada uno de los cinco factores asociados con la probabilidad geológica debe

evaluarse de forma independiente, aun cuando cada factor pueda estar compuesto por varios subcomponentes y exista dependencia entre ellos.

En ese sentido, existen diversos software comerciales, herramientas informáticas y autores que proponen sistemas y matrices analíticas para estimar la probabilidad de éxito de cada factor que compone la probabilidad de éxito geológico (p.e. Otis y Schneidermann, 1997; CCOP, 2000; Pemex, 2012; Rose, 2001; Milkov, 2015), las cuales invariablemente involucran juicios sobre la calidad y cantidad de información, sobre la confianza de las interpretaciones realizadas y sobre el análisis de la información disponible del contexto geológico, resultado de pozos perforados, campos análogos y demás información sobre la historia exploratoria dónde se encuentra el prospecto a evaluar.

Rose (2001) propone una matriz analítica general y una escala subjetiva de probabilidad, para estimar la certidumbre o incertidumbre relativa de los factores que integran la probabilidad de éxito geológico en un prospecto dado (Figura 13).

Adicionalmente, la evaluación por separado de los diversos factores que componen la probabilidad de éxito geológico permite analizarlos de manera más completa y objetiva, mejorando la comprensión geológica del prospecto a evaluar. Asimismo, el identificar el factor o los factores con la probabilidad más baja; es decir el identificar los “factores críticos”, ayuda a concentrar el análisis y la revisión en los elementos de



**Figura 13.** Matriz analítica generalizada y escala subjetiva de probabilidad (modificada de Rose, 2001) para estimar la certidumbre o incertidumbre relativa de los factores que integran la probabilidad de éxito geológico en un prospecto.

mayor incertidumbre. La probabilidad de éxito geológico de un prospecto puede obtenerse mediante la multiplicación de cinco factores críticos (Murtha, 1995; Delfiner, 2000; Rose, 2001; Pemex, 2012).

## 7. Resultados y discusión

Al 2018 los recursos prospectivos convencionales totales del país, ascienden a la media a 48,723 millones de barriles de petróleo crudo equivalente (MMbpce); es decir, el 49% aproximadamente de los recursos prospectivos totales del país.

En esta primera etapa de actualización de la cuantificación de recursos prospectivos realizada por la Comisión, en una superficie total de 126,830 km<sup>2</sup> en aguas profundas del Golfo de México y como complemento a la estimación realizada anteriormente,

los recursos prospectivos totales convencionales del país ascienden a 48,723 MMbpce, donde la región de aguas profundas del Golfo de México representa ahora el 49% del total de recursos convencionales del país. La Tabla 1 muestra el balance de los recursos prospectivos convencionales totales del país, en el contexto de las Provincias Petroleras de México.

Considerando el valor a la media como la mejor estimación y los recursos técnicamente recuperables para los plays no convencionales, la evaluación al 2018 se encontró distribuida en los plays del Jurásico Superior Titoniano y Cretácico Superior Turoniano, cuya estimación de recursos prospectivos sumaban un total de 60,204 MMbpce.

En las asignaciones de Petróleos Mexicanos, se ha realizado una actualización en la cuantificación de los recursos prospectivos no convencionales, derivado de las actividades petroleras desarrolladas, mediante la evaluación regional de un nuevo play no convencional correspondiente con el Jurásico Superior Oxfordiano en la Provincia de Tampico-Misantla.

De acuerdo con la información proporcionada a la Comisión respecto de la evaluación de este play y su estimación de recursos, el play es prospectivo principalmente por aceite con recursos prospectivos a la media de 4,020 MMbpce. Con base en esta actualización, los recursos prospectivos no convencionales del país están asociados ahora con los plays del Jurásico Superior Oxfordiano, el Jurásico Superior Titoniano y el Cretácico Superior Turoniano, los cuales suman un total a la media de 64,224 MMbpce.

**Tabla 1.** Actualización de la estimación de los recursos prospectivos convencionales totales de México (Modificado de CNH, 2019).

Provincia Petrolera	Recursos Prospectivos Totales P90 (MMbpce) <sup>a</sup>	Recursos Prospectivos Totales P50 (MMbpce) <sup>a</sup>	Recursos Prospectivos Totales Media (MMbpce) <sup>a</sup>	Recursos Prospectivos Totales P10 (MMbpce) <sup>a</sup>	Porcentaje respecto de la Media
Aguas profundas del golfo de México	8,430	20,686	23,929	45,596	49 %
Cuencas del Sureste	8,227	13,710	14,466	21,697	30 %
Cuenca de Burgos I	1,436	2,916	3,204	5,400	7 %
Tampico-Misantla	881	2,077	2,347	4,167	5 %
Plataforma de Yucatán	408	1,431	1,778	3,607	4 %
Veracruz	726	1,337	1,432	2,261	3 %
Cinturón Plegado de Chiapas	428	1,045	1,172	2,079	2 %
Sabina-Burro Picachos	130	344	395	733	1 %
<b>Recursos Prospectivos Convencional Totales</b>	<b>20,666</b>	<b>43,547</b>	<b>48,723</b>	<b>85,539</b>	<b>100 %</b>

<sup>a</sup> Datos publicados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) en el año 2019

La Tabla 2 muestra la estimación de recursos prospectivos convencional y no convencional de acuerdo con la Provincia Petrolera, considerando el valor a la media como la mejor estimación, mientras que la Figura 14 muestra su distribución por principal tipo de hidrocarburo esperado.

De acuerdo con la evaluación del potencial prospectivo del Golfo de México Profundo, al 1 de enero de 2019) y la Base de datos de Plays (BD-Plays 2014, al 1 de enero de 2019), las zonas en aguas profundas con mayor volumen de Recursos Prospectivos y pro con 8.9 MMMbpce, con Pg=0.26 y la Cuenca Salina

**Tabla 2.** Actualización de la estimación de los recursos prospectivos convencionales y no convencionales totales de México, considerando el valor de la Media como mejor estimación (Modificado de CNH, 2019).

Provincia Petrolera	Recursos Prospectivos Convencionales Totales, Media (MMbpce) <sup>a</sup>	Recursos Prospectivos Técnicamente Recuperables Totales No Convencionales, Media (MMbpce) <sup>a</sup>
Aguas profundas del golfo de México	23,929	-
Cuencas del Sureste	14,466	-
Cuenca de Burgos I	3,204	10,770
Tampico-Misantla	2,347	38,942
Plataforma de Yucatán	1,778	-
Veracruz	1,432	563
Cinturón Plegado de Chiapas	1,172	-
Sabina-Burro Picachos	395	13,950
<b>Recursos Prospectivo Totales</b>	<b>48,723</b>	<b>64,224</b>

<sup>a</sup> Datos publicados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) al año 2019.

con 10.5 MMMbpce y Pg=0.19; ambas prospectivas principalmente por aceite ligero (Tabla 3).

De acuerdo con los volúmenes de recurso prospectivo estimados a la fecha, la probabilidad de éxito geológico promedio y el tipo de hidrocarburo esperado en las Provincias Petroleras en aguas profundas del Golfo de México, las zonas prospectivas con mayor potencial exploratorio corresponden con la Cuenca Salina y el Área Perdido; respectivamente.

## 8. Conclusiones y Perspectivas

La evaluación y cuantificación de los recursos prospectivos; es decir, la estimación volumétrica de las cantidades de hidrocarburos no descubiertos y su análisis de riesgo e incertidumbre, requiere de conocimiento y comprensión de los sistemas petroleros en una cuenca sedimentaria, donde la implementación de un marco de referencia con base en el análisis de plays, permite evaluar, cuantificar y clasificar las áreas con potencial petrolero, así como la distribución de los volúmenes asociados, su nivel de riesgo e incertidumbre.

Derivado del proceso de Rondas, a Petróleos Mexicanos le fue otorgada una superficie total de 15,625 km<sup>2</sup> repartida en 34 asignaciones de exploración, concentradas principalmente en el Área Perdido y la zona de Aguas Profundas Sur, que abarca las Provincias del Cinturón Plegado de Catemaco y la Cuenca Salina principalmente (Figura 14).

Esta asignación de áreas de exploración representa un volumen de Recursos Prospectivos de 3,013 MMbpce en el Área Perdido y 1,824 MMbpce en la zona de Aguas Profundas Sur, para un total de 4,837 MMbpce;

**Tabla 3.** Detalle de la distribución del recurso prospectivo identificado (BDOE IV-2019), potencial adicional (BDPlays 2019), así como el número de prospectos documentados, la probabilidad de éxito geológico ponderado (Pg) y el principal tipo de hidrocarburo, para las Provincias en aguas profundas analizadas en este documento. (Modificado de CNH, 2019).

Provincia Petrolera	Totales (MMMbpce)	Identificados		Potencial adicional (MMMbpce) <sup>a</sup>	Probabilidad de éxito geológico promedio en la Provincia <sup>a</sup>	Principal tipo de hidrocarburo
		No. de prospectos documentados <sup>a</sup>	Recursos Prospectivos (MMMbpce) <sup>a</sup>			
Área Perdido (Cinturón Plegado Perdido + Salina del Bravo)	8.9	96	5.2	3.7	0.26	Aceite ligero
Cordilleras Mexicanas + Cinturón Plegado de Catemaco	8.4	157	5.9	2.5	0.14	Gas
Cuenca Salina Profundo	10.5	238	6.8	3.7	0.39	Aceite ligero
Golfo de México Profundo Total	27.8	491	17.9	9.9	0.2	Aceite y gas

<sup>a</sup> Datos publicados por la Comisión Nacional de Hidrocarburos (CNH) en el año 2019

es decir, el 17% del recurso prospectivo total estimado en aguas profundas (Figura 15).

Los exploradores seleccionan cuencas, áreas determinadas o ciertas tendencias geológicas para enfocar la exploración de hidrocarburos, donde el desarrollo de las actividades petroleras e inversión asociada se caracterizan por un alto riesgo e incertidumbre, que pueden reducirse, pero no eliminarse a través de diferentes tecnologías, estudios, modelos y análisis de naturaleza predictiva.

Considerando que los recursos prospectivos son cantidades de hidrocarburos potencialmente recuperables a una fecha determinada, a partir de acumulaciones no descubiertas, no hay certeza de que se descubran hidrocarburos cuando se decide por la perforación de pozos exploratorios y en caso de descubrirse alguna acumulación, no hay garantía que sea comercialmente viable su desarrollo y producción para cualquier momento en la estimación cuantitativa de estos recursos.

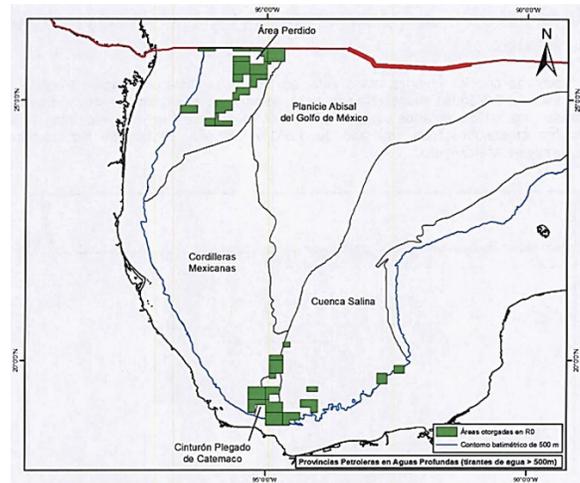


Figura 14. Asignaciones de exploración otorgadas a Pemex en Ronda Cero. (PEMEX, 2010).

En ese sentido, la actualización de la estimación de los recursos prospectivos realizada en esta primera etapa, en complemento con la estimación previa de los recursos prospectivos, es una estimación con

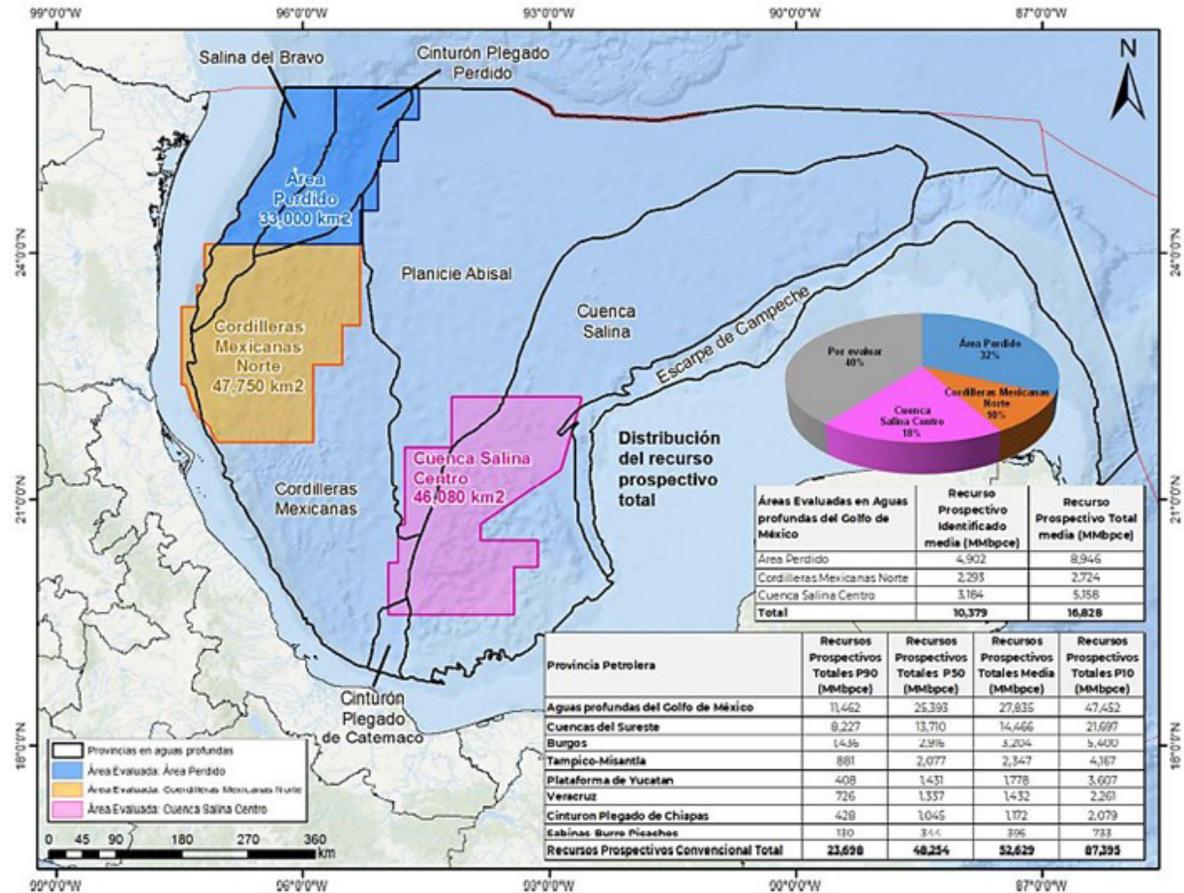


Figura 15. Mapa que muestra las áreas seleccionadas para de la evaluación y la actualización de la cuantificación de los recursos prospectivos, en el contexto de las provincias geológicas en aguas profundas del Golfo de México y la estimación al 2018 de los recursos prospectivos medios convencionales totales.

riesgo de las cantidades potenciales de hidrocarburos recuperables remanentes aún no descubiertos en las tres áreas evaluadas y que es altamente incierta, al igual que la estimación realizada anteriormente.

Cualquier estimación cuantitativa de recursos prospectivos presenta limitaciones y es necesaria su actualización conforme nueva información se genera, a partir del avance en las actividades de exploración y producción, por el surgimiento de nuevos plays o bien, por el revitalizamiento de plays maduros mediante el avance tecnológico y la aplicación de nuevos conceptos.

La información que hemos presentado en la primera parte de este texto permite afirmar que los avances de Pemex en aguas profundas son ya considerables. El número de localizaciones identificadas, el de equipos ya contratados, el período tan prolongado de los contratos, que aseguran la continuidad de las perforaciones profundas hasta 2015, parece suficiente. Pemex debería evitar nuevas contrataciones. Desde luego es sabido que desea acelerar aún más sus actividades en el Golfo profundo.

Otro objetivo importante de la actualización de la estimación de los recursos prospectivos realizada en esta primera etapa en aguas profundas, tiene que ver con la documentación de prospectos exploratorios

y su eventual perforación en el marco de los correspondientes planes de exploración y autorizaciones para la perforación de pozos. Considerando que la documentación de prospectos exploratorios constituye un sustento geológico-geofísico de los volúmenes estimados de recursos prospectivos, el seguimiento hasta su perforación y resultados permitirá calibrar las estimaciones volumétricas y de riesgo, lo que conducirá a realizar estimaciones de los recursos prospectivos con menor incertidumbre en el futuro.

Al 2018, el éxito geológico de la perforación exploratoria en aguas profundas en México es del 64% (Figura 16-A); es decir, el porcentaje de pozos respecto del total perforados, que han encontrado hidrocarburos móviles en alguno de sus objetivos geológicos e independientemente de su comercialidad. Además, considerando los volúmenes recuperables para aquellos descubrimientos con información disponible (24 de un total de 33), actualmente el volumen descubierto total es del 58% respecto del volumen total pronosticado a la media; donde al parecer, la exploración en aguas profundas ha estado dominada por prospectiva por aceite (Figura 16-B).

Gráficas que muestran el estado actual de la exploración en aguas profundas del Golfo de México, mostrando de forma comparativa el éxito de la perforación exploratoria

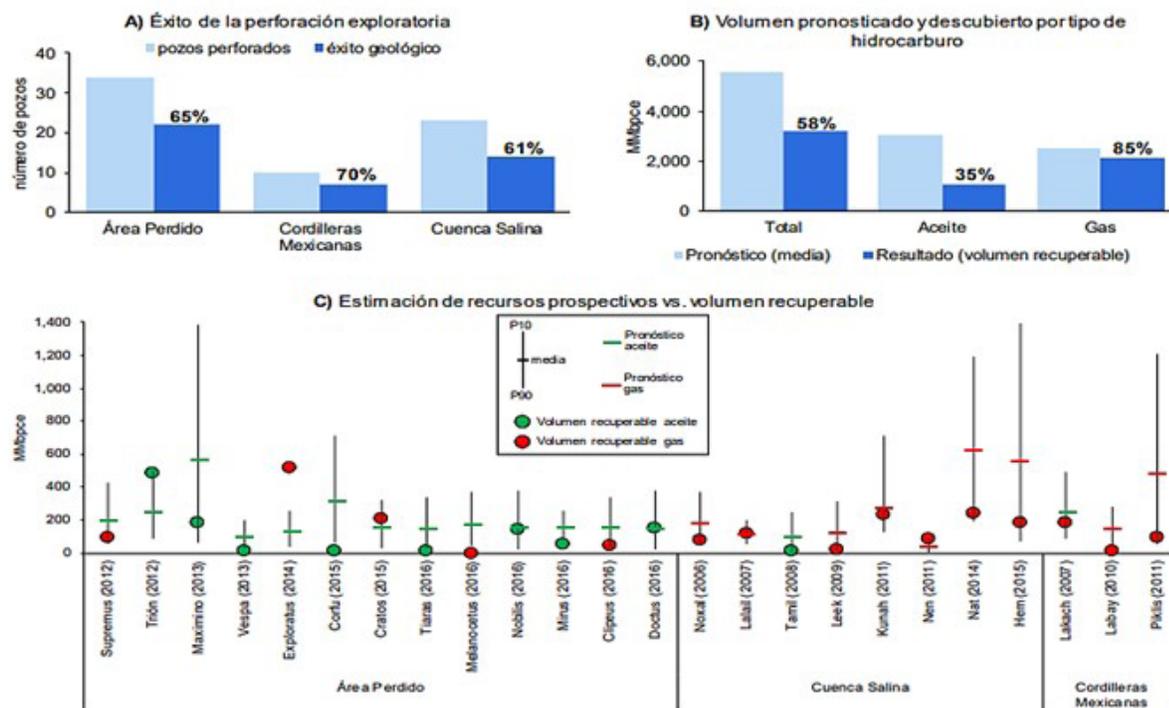


Figura 16. Gráficas que definen el éxito de la perforación exploratoria (A), los volúmenes pronosticados por tipo de hidrocarburo (B) y las estimaciones de recursos vs volumen recuperable (C) los cuales representan las condiciones actuales del Golfo Profundo.

o el porcentaje de pozos que han encontrado hidrocarburos móviles en alguno de sus objetivos geológicos respecto del total perforados (A), el volumen pronosticado a la media comparado con el volumen descubierto recuperable reportado por principal tipo de hidrocarburo (B) y un comparativo de la estimación probabilística de recursos prospectivos y volúmenes descubiertos por principal tipo de hidrocarburo en pozos (C). Para B) y C), se consideran los volúmenes recuperables de descubrimientos con los que se tiene información.

En general, considerando los volúmenes a la media como la mejor estimación e independiente del riesgo geológico, existe una tendencia de sobreestimar el volumen prospectivo especialmente para el caso aceite, donde se esperaba encontrar 65% más del volumen actualmente descubierto. Aquellos prospectos con volumen a la media mayor a 200 MMbpc, presentaron mayor incertidumbre en la estimación y salvo algunas excepciones, un volumen descubierto notablemente menor que el inicialmente pronosticado (Figura 16-C).

## Referencias

- Angeles-Aquino, F., Reyes-Núñez, Quezada-Muñeton y Menses Rocha, J.J., 1994, Tectonic Evolution, Structural Styles and Oil Habitat in Campeche Sound: Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, v. 44, p. 53-62.
- Bosch, M., Mukerji, T. y Gonzalez, E.F., 2010, Seismic inversion for reservoir properties combining statistical rock physics and geostatistics: A review: Geophysics, vol. 75, no. 5 p. 75A165–75A176.
- Brown, A., 1996, Seismic attributes and their classification: The Leading Edge, 15, 1090. Camargo Z.A. y Quezada J.M., 1991, Análisis geológico-económico de las áreas del Golfo de México con posibilidades petroleras: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, V. XLI, No. 2, p. 1-32.
- Chopra, S. y Marfurt, K., 2007. Seismic Attributes for Prospect Identification and Reservoir Characterization. SEG Geophysical Development Series N° 11. Tulsa, OK. USA.
- Clara-Valdés, M.d.L., Villanueva-Rodríguez, L. y Caballero-García, E., 2009, Geochemical integration and interpretation of source rocks, oils, and natural gases in southeastern Mexico, in C. Bartolini and J. R. Román-Ramos, eds., Petroleum systems in the southern Gulf of Mexico: AAPG Memoir 90, p. 337– 368.
- Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2015, Atlas Aguas Profundas Norte, disponible en [https://rondasmexico.gob.mx/media/1048/atlas\\_cpp.pdf](https://rondasmexico.gob.mx/media/1048/atlas_cpp.pdf)
- Comisión Nacional de Hidrocarburos, 2015b, Atlas Aguas Profundas Sur, disponible en [https://rondasmexico.gob.mx/media/1049/atlas\\_cs.pdf](https://rondasmexico.gob.mx/media/1049/atlas_cs.pdf)
- Cuevas-Leree, A., 2003, El potencial petrolero del occidente del Golfo de México: Una propuesta de estrategia exploratoria: Trabajo de ingreso a la Academia de Ingeniería, 35 pp.
- Escalera, J.A. y Hernández, U., 2010, Provincias petroleras de México: Well Evaluation Conference México 2010, Schlumberger Oilfield Services México y Centroamérica, p. 1.2- 1.33.
- Ferrari, L., Valencia-Moreno, M. y Bryan, S., 2005, Magmatismo y tectónica en la Sierra Madre Occidental y su relación con la evolución de la margen occidental de Norteamérica: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, vol. 57, núm. 3, p. 343-378.
- González, R. y Holguín, N., 1992, Las rocas generadoras de México: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. XLII, núm. 1 p. 16-30.
- Guzmán-Vega, M. A., Castro-Ortíz, L., Román-Ramos, J.R., Medrano-Morales, L., Valdéz, L.C., Vázquez-Covarrubias, E. y Ziga-Rodríguez, G., 2001, Classification and origin of petroleum in the Mexican Gulf Coast Basin: An overview, in C. Bartolini, R. T. Buffler, and A. Cantú-Chapa, eds., The western Gulf of Mexico Basin: Tectonics, sedimentary basins, and petroleum systems: AAPG Memoir 75, p. 127-142.
- McBride, B.C., 1998, The evolution of allochthonous salt along a megaregional profile across the northern Gulf of Mexico Basin: AAPG bulletin, v. 82, no. 5, p. 1037-1054.
- Magoon, L.B., 1995, The play that complements the petroleum system—a new exploration equation: Oil & Gas Journal, vol. 93, no. 40, p. 85–87.
- Magoon, L.B. y Beaumont, E.A., 1999, Petroleum Systems: in Beaumont, E.A. and Foster, N.H. eds., AAPG Treatise of Petroleum Geology: Exploring for Oil and Gas Traps, p. 3-3 - 3- 34. Magoon, L.B., y Dow, W.G., 1994, The petroleum system, in Magoon, L.B. and Dow, W.G., eds., The Petroleum System From Source to Trap: AAPG Memoir 60, p. 3-24.
- Pemex Exploración y Producción, 2010, Provincia Petrolera Sureste (Salina del Istmo, Reforma-Akal y Macuspana), 56 pp.
- Pemex Exploración y Producción, 2012, Manual técnico de procedimientos para la evaluación de recursos prospectivos y probabilidades de éxito de plays convencionales, 16 pp.

- Pew, E., 1982, Seismic structural analysis of deformation in the southern Mexican Ridges: Master Thesis, University of Texas at Austin, 102 pp.
- Pindell, J.L. y Kennan, L., 2009, Tectonic evolution of the Gulf of Mexico, Caribbean and northern South America in the mantle reference frame: an update: In: James, K.H., Lorente, M.A. and Pindell, J.L. eds., The origin and evolution of the Caribbean plate. Geological Society, London, Special Publications 328, p. 1-55.
- Román-Ramos, J.R., Cruz-Mercado, M.A., Salomon-Mora, L.E., Rosas Lara, C., Sanchez Ferrer, F., Biegert, E. y Bartsch, E., 2008, Continental-oceanic boundary deep structure in a shear margin: Western Main Transform, offshore Veracruz, Southern Gulf of Mexico: In Bartolini, C. and Román-Ramos, J.R., eds., Petroleum systems in the southern Gulf of Mexico: AAPG Memoir 90, p. 409-420.
- Rose, P.R., 2001, Risk Analysis and Management of Petroleum Exploration Ventures: AAPG Methods in Exploration No. 12, 178pp.
- Salomón-Mora, L.E., 2013, Structure and Tectonics of the Salt and Shale Provinces, Western Gulf of Mexico: Ph.D. Thesis Dissertation, University of Aberdeen, United Kingdom, 476 pp.
- Salvador, A., 1991, Triassic-Jurassic: in Salvador, A. ed., The Gulf of Mexico Basin: Geological Society of America, The Geology of North America, v. J, p. 131-180.
- Sánchez-Montes de Oca, R., 1979, Geología petrolera de la Sierra de Chiapas: Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros, v. 31, p. 67-97.
- Snedden, J.W., Tinker, L.D. y Virdell, J., 2018, Southern Gulf of Mexico Wilcox source to sink: Investigating and predicting Paleogene Wilcox reservoirs in eastern Mexico deep-water areas: AAPG Bulletin, v. 102, no. 10, p. 2045-2074.
- SPE/WPC/AAPG/SPEE, 2011, Guidelines for Application of the Petroleum Resources Management System, 222 pp.
- SPE/WPC/SEG/AAPG/EAGE/SPEE/SPWLA, 2018, Petroleum Resources Management System, 57 pp
- Witt, C., Rangin, C., Adreani, L., Olalez, N. y Martinez, J., 2012b, The transpressive left-lateral Sierra Madre de Chiapas and its buried front in the Tabasco plain (southern Mexico): Journal of the Geological Society, London, Vol. 16, p. 143-155.
- Yarbu, I. y Contreras, J., 2015, The interplay between deformation, erosion and sedimentation in the deep-water Mexican Ridges foldbelt, western Gulf of Mexico basin: Basin Research 29, Issue S1, p. 446-464.

# Acceso a la energía eléctrica ¿clave para la salvaguarda de derechos humanos?

Lorena Higareda Magaña\*

Licenciatura en Derecho  
Universidad del Istmo

Correspondencia:  
\*lorena@bianni.unistmo.edu.mx

## Palabras Clave:

Derechos humanos, suministro de energía eléctrica y servicio público.

## Keywords:

Human rights, electricity supply and public service.

## RESUMEN

Las sociedades contemporáneas requieren del suministro de electricidad para acceder a las cuestiones básicas de la vida cotidiana, tales como: la iluminación de espacios, la conservación de alimentos, la higiene personal, la climatización de los hogares, entre otras. Las cuales están vinculadas con el bienestar de las personas porque la concurrencia de la energía eléctrica les asegura aspectos elementales de comodidad.

Bajo este contexto, la configuración legal en México del derecho humano de acceso a la energía eléctrica se considera una prerrogativa llave para el disfrute de otros derechos fundamentales a partir de las interpretaciones que realizan dos tribunales del Poder Judicial de la Federación en 2016 y 2020. En este sentido, el Estado debe garantizar progresivamente la distribución adecuada de electricidad en virtud de ser una condición sine qua non y no un privilegio de aquellos que puedan pagar los costos para el goce de los derechos económicos, sociales y culturales.

## ABSTRACT

Contemporary societies require the supply of electricity to access the basic issues of daily life, such as: the lighting of spaces, food preservation, personal hygiene, the home air conditioning, among others. Which are linked to the well-being of people because the concurrence of electrical energy assures them elementary aspects of comfort.

In this context, the legal configuration in Mexico of the human right of access to electricity is considered a key prerogative for the enjoyment of other fundamental rights, based on the interpretations made by two Courts of the Judicial Power of the Federation in 2016 and 2020. Therefore, the State must progressively guarantee the adequate distribution of electricity by virtue of being a sine qua non and not a privilege of those who can afford the costs for the enjoyment of economic, social and cultural rights.

## 1. Introducción

El suministro de energía eléctrica es la fuente primordial para el funcionamiento de actividades domésticas, laborales, de diversión, etcétera, incluso facilita la materialización de algunos derechos humanos: salud, alimentación, educación, vivienda digna y decorosa, acceso a la cultura y otros. Por consiguiente, en la actualidad, para algunos puede resultar complejo imaginar la ejecución de sus tareas diarias sin electricidad.

En México el acceso a la electricidad es un servicio público universal, de interés social y de orden público, el cual se rige conforme las disposiciones que se establecen en la Ley de la Industria Eléctrica, reglamentaria de los artículos 25 párrafo cuarto, 27 párrafo sexto y 28 párrafo cuarto de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos; asimismo, contempla con

especial interés el objetivo de “promover el desarrollo sustentable de la industria eléctrica y garantizar su operación continua, eficiente y segura en beneficio de los usuarios” (art. 1).

Acorde a lo que se contempla en la ley citada “El Suministro Eléctrico es un servicio de interés público. La generación y comercialización de energía eléctrica son servicios que se prestan en un régimen de libre competencia [...]” (art. 4), como se desprende del contenido de este precepto es posible que además de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) participen otras empresas en este rubro; no obstante, en el presente trabajo solo se hace referencia a los servicios brindados por ésta, en virtud de la revisión que se realizará de las resoluciones judiciales de interés y en las que se menciona directa o indirectamente.

De hecho, el gobierno federal delega a la CFE<sup>1</sup> como empresa productiva del Estado, las siguientes clases de servicio de energía eléctrica: “alumbrado público, bombeo de agua, centro comercial, colonia o poblado, comercial, desarrollo turístico, doméstico, escuela, fraccionamiento habitacional, industrial, mercado, edificio-oficina-departamento, parque industrial, otro” (2022, s.p.). Este servicio público que brinda el Estado es considerado fundamental para el desarrollo de la nación, aunado a que el usuario final de este suministro básico es la sociedad.

Así, para tener una referencia de la cobertura del servicio, de acuerdo con el último registro de los datos del Sistema de Información Energética de la CFE, en el cuarto trimestre de 2018 el número de usuarios era de 43,365,753, lo cual representa una cobertura del 98.68% de población con servicio eléctrico (Secretaría de Energía, 2022), se vaticina que en la próxima actualización estos datos reflejaran un incremento, ello, con base en los datos generados por el Banco Mundial se muestra que en el 2020 el porcentaje de la población mexicana con acceso a la electricidad ascendía al 99.4 (2022).

Con base en lo anterior<sup>2</sup>, el presente trabajo tiene como objetivo analizar el reconocimiento del derecho humano de acceso a la energía eléctrica como una prerrogativa llave para el ejercicio de otros derechos económicos, sociales y culturales, cuya titularidad corresponde a toda persona, a partir de la interpretación de conexidad que realiza el Poder Judicial de la Federación en datos recientes con la emisión de resoluciones de juicios de amparo, en las cuales se estudió la acción de tutela sobre el acceso al suministro de electricidad.

Para lograr el objetivo se divide en tres partes, la primera identifica el bien jurídico que debe proteger

<sup>1</sup> Es preciso indicar que derivado de la reforma energética a los artículos 25, 27 y 28 constitucionales publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de diciembre de 2013, se crean las empresas productivas del Estado Petróleos Mexicanos (PEMEX) y la Comisión Federal de Electricidad (CFE) permitiendo la participación del sector privado nacional y extranjero en estas materias. Así, en el artículo 25 constitucional se estipula que el gobierno federal, en lo relativo a la CFE, mantiene la propiedad y el control, respecto a las actividades de planeación, control del sistema eléctrico nacional, servicio público de transmisión y distribución de energía eléctrica para lograr un mercado eléctrico sólido y consolidado, esto es, implementar la seguridad energética en México. Por lo que, con la idea de lograr lo plasmado resultaba prioritario que la entonces empresa paraestatal se convirtiera en empresa productiva del Estado. Para mayor referencia sobre el origen de este tipo de empresas véase: (Miranda Olivo, 2015).

<sup>2</sup> El juicio de amparo es un medio de protección a las garantías de los derechos humanos reconocidos en nuestra CPEUM y en los tratados internacionales en los que México es parte (Véase: Martínez Ramírez, 2011).

el derecho humano de acceso a la energía eléctrica, la segunda hace especial referencia a la configuración legal de esta prerrogativa y la tercera, a manera de conclusión, se destaca lo elemental que es tener acceso al suministro de energía eléctrica para los titulares de este derecho. La estrategia metodológica que se emplea es revisar las resoluciones que dimanen de los siguientes procedimientos constitucionales: a) del amparo indirecto número 127/2020 dictada el día 12 de noviembre de 2020 por el Juzgado Cuarto de Distrito del estado de Quintana Roo y b) del incidente en revisión número 74/2016 de fecha 12 de mayo de 2016 emitida por el Tercer Tribunal Colegiado en materia civil del Primer Circuito.

Asimismo, se utiliza el método descriptivo para identificar los parámetros que sirven de fundamento en las resoluciones mencionadas, en las cuales los jueces determinan configurar el derecho humano de acceso a la energía eléctrica en tanto un derecho derivado para proteger y garantizar los derechos básicos, pues el acceso a la energía eléctrica es elemental para mejorar la vida de las personas y satisfacer sus necesidades.

## 2. El derecho humano de acceso a la energía eléctrica

Los derechos humanos suelen entenderse como el “conjunto de derechos y libertades fundamentales para el disfrute de la vida humana en condiciones de plena dignidad y se definen como intrínsecos a toda persona por el mero hecho de pertenecer al género humano” (Color y Moreno, 2016, p. 7). Su importancia es tal, que en la Declaración Universal de Derechos Humanos de 1948 estas prerrogativas ya sean económicas, políticas, civiles, culturales o sociales tienen igual validez e importancia, porque uno de los principios de los derechos humanos es ser indivisibles e interdependientes, por ello, ninguno es menos que otro y en varios supuestos se vinculan para lograr su efectivo cumplimiento.

Para las autoras Color y Moreno los principios indivisibles e interdependientes de los derechos humanos “se relacionan entre sí de tal forma que para ejercer plenamente determinado derecho será necesaria la intervención de otro u otros” (Ibídem, p.8). Por ejemplo, para el goce de una vivienda digna es necesario acceder también al derecho de acceso a la energía

eléctrica. En esta misma tesitura, la transgresión de uno puede afectar directa o indirectamente el ejercicio de otro u otros pues dicha violación disminuiría la calidad de vida de las personas vulnerando su derecho de acceso a internet por falta de electricidad. Por ende, deben considerarse como inseparables.

Asimismo, requieren de acciones e incluso esfuerzos para que se hagan efectivos, además de contemplar el establecimiento de un margen de prioridades en caso necesario, de conformidad con los principios<sup>3</sup> de los derechos humanos (Ídem). Igualmente, en las disposiciones normativas del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales se precisa el deber del Estado para proteger, respetar y promover estos derechos sin desconocer el contexto específico de cada nación.

Ahora bien, el derecho de acceso a la energía eléctrica, desde la perspectiva que se plantea, además de formar parte los derechos económicos, sociales y culturales también contribuye a su salvaguarda, del mismo modo, se fundamenta en la dignidad humana, la autonomía, la igualdad material, al considerar que las personas para disfrutar plenamente de un nivel de vida adecuado, requieren de un mínimo de seguridad económica y de la satisfacción de sus necesidades básicas.

Por consiguiente, se colige a partir de la interpretación sistemática de los derechos humanos económicos, sociales y culturales consagrados en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) en los artículos 1o., 3o., 4o., 5o., 6o., 25, entre otros, que se garantizan los requerimientos esenciales indispensables para asegurar una subsistencia primordial de la persona y su familia, más allá de lo relativo a la alimentación nutritiva suficiente y de calidad, sino también en lo referente “a la educación [...]; el acceso a los servicios de protección de la salud; un medio ambiente sano [...]; la vivienda digna y decorosa; el acceso a la cultura; el acceso a la información y a sus tecnologías, así como a los servicios de radiodifusión y telecomunicaciones, incluido el Internet; la libertad de expresión e imprenta; la libertad

de profesión, industria, comercio y trabajo, [etcétera]” (SCJN, 2018a, Tesis: I.3o.C.100 K 10a.)

En este sentido, los derechos referidos “se encuentran estrechamente ligados a la energía eléctrica, la cual es usada en prácticamente todos los ámbitos de la actividad humana para generar energía lumínica, mecánica y térmica, así como para el procesamiento de la información y la realización de las telecomunicaciones” (Ídem). Por esta razón, es necesario reconocer el acceso a la energía eléctrica como un derecho humano al constituir una condición indispensable para el disfrute de otros derechos humanos.

En consecuencia, conviene indicar la complejidad que se puede identificar al momento de abordar el contenido del derecho humano de acceso a la energía eléctrica por la falta expresa de disposición constitucional. El constituyente mexicano, al reconocer los derechos económicos, sociales y culturales prevé la vinculación con otros derechos para poder ejercerlos. Por este motivo, al momento, corresponde al Poder Judicial de la Federación a través de sus tribunales definir tal contenido con base en las disposiciones normativas y de derecho aplicables, por supuesto la concreta regulación de este derecho debe establecerse en ley.

En este particular, la CPEUM concibe de manera implícita el derecho de acceso a la energía eléctrica como conexo a los derechos económicos, sociales y culturales; mientras que el legislador da forma, al describir las facultades primordiales del mismo, esto es, para la plena eficacia de una prerrogativa es necesaria la intervención del legislador. Sin embargo, la inexistencia de desarrollo legislativo para el derecho de acceso a la energía eléctrica conlleva que su contenido sea respetado por el poder judicial y tutelado a través del juicio de amparo, porque el respeto a los derechos humanos vincula directamente a todos los poderes públicos en el ámbito de sus competencias.

Para comprender su alcance es oportuno describir su contenido, es decir, los aspectos trascendentes: el fundamento, el objeto, los sujetos, límites y garantías conforme a lo siguiente:

a) Fundamento del derecho. Forma parte de los derechos económicos, sociales y culturales relacionados directamente con la dignidad de la persona y que se consideran prerrogativas esenciales e inviolables, puesto que se basan en elementos básicos para un

<sup>3</sup> Dichos principios se reconocen en el artículo 1 la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos: “todas las autoridades tienen la obligación de promover, respetar, proteger y garantizar los derechos humanos de conformidad con los principios de universalidad, interdependencia, indivisibilidad y progresividad. En consecuencia, el Estado deberá prevenir, investigar, sancionar y reparar las violaciones a los derechos humanos en los términos que establezca la ley” (Reforma 10 de junio de 2011).

nivel de vida adecuado de la persona y su familia, con la posibilidad de la mejora continua de su existencia digna. De esta manera, se puede indicar que garantizando el derecho acceso a la electricidad se contribuye al desarrollo del ser humano para vivir en condiciones favorables que le permitan disfrutar de sus derechos y libertades (Sandoval, A. y De la Torre, C., 2010).

b) El objeto que se pretende tutelar es el acceso al suministro de energía eléctrica, un presupuesto indispensable que constituye una condición sine qua non para el ejercicio de los derechos económicos, sociales y culturales, los cuales demandan cada vez más y en mayor medida de electricidad por el estado actual del desarrollo científico y tecnológico de la sociedad (Op. cit. 2018a).

c) Sujetos: titulares y obligados. Las cuestiones que pueden surgir al momento de establecer quién o quiénes son los titulares del derecho de acceso a la energía eléctrica son los mismos que se trazan respecto con cualquier otro derecho. De inicio se reconoce a todas las personas físicas, nacional o extranjero, mayor o menor de edad<sup>4</sup>. Así, el titular es el sujeto universal que tiene la potestad de acceder al suministro de energía eléctrica que brinda el Estado o el particular concesionario a través de la modalidad de servicio público.

La cuestión relativa a los sujetos obligados de este derecho en el caso concreto de México, el suministro de acceso a la energía eléctrica en cuanto a la generación y comercialización se basa en un esquema de libre competencia en el cual es posible la participación de la CFE o bien, de empresas privadas, por ello, hay que comprender que el derecho de acceso a la energía eléctrica tiene eficacia frente al poder público y frente a los particulares.

En relación al poder público, es preciso mencionar, que éste se encuentra obligado no sólo a lo que se derive de las facultades de los titulares del derecho en el ejercicio del mismo, sino también y especialmente, a establecer las medidas, garantías y límites necesarios para contrarrestar las posibles transgresiones, incluso frente a las relaciones con terceros.

<sup>4</sup> En relación a la titularidad de los derechos humanos por parte de las personas jurídicas existen diversas opiniones doctrinales para mayor referencia: (Gómez Montoro, 2002, p. 387-439). La postura de la Suprema Corte de Justicia de la Nación afirma que “las personas jurídicas son titulares de derechos humanos en la medida en que, por su naturaleza y fines, resulten aplicables a ellas” (2017b, Tesis: (I Región) 8o.2 CS 10a.).

d) Límites. El derecho de acceso a la energía eléctrica está sujeto, como el resto de derechos humanos, a excepciones. De acuerdo con lo establecido en la CPEUM, los derechos económicos, sociales y culturales no admiten otros límites que los previstos legalmente, que respeten el contenido esencial, estén justificados por su finalidad y sean proporcionados. Al respecto, la Suprema Corte de Justicia de la Nación refiere: “las restricciones a los derechos fundamentales no deben ser arbitrarias, sino que deben perseguir finalidades constitucionalmente válidas, ser necesarias para su consecución y proporcionales, esto es, la persecución de ese objetivo no puede hacerse a costa de una afectación innecesaria o desmedida de los otros derechos fundamentales” (2014c, Tesis: 1a. L/2014 10a.). Es decir:

[...] de la interpretación armónica y sistemática [...] se concluye que los requisitos para considerar válidas las restricciones o la suspensión de derechos, son: a) que se establezcan en una ley formal y material (principio de reserva de ley) dictada en razón del interés general o público, en aras de garantizar los diversos derechos de igualdad y seguridad jurídica (requisitos formales); y, b) que superen un test de proporcionalidad, esto es, que sean necesarias; que persigan un interés o una finalidad constitucionalmente legítima y que sean razonables y ponderables en una sociedad democrática (requisitos materiales)” (2013d, Tesis: 1a. CCXV/2013 10a.).

e) Garantías. Aquí, se hace referencia a las garantías genéricas que se plasman en el artículo 1 de la CPEUM, las cuales deben ser comprendidas como instrumentos o herramientas de protección y tutela, reforzando su vigencia y salvaguardando su eficacia dentro del sistema normativo para que las personas gocen de los derechos humanos reconocidos en la ley suprema y en los tratados internacionales de los que el Estado Mexicano sea parte. Por consiguiente, para el derecho de acceso a la energía eléctrica es factible interpretar que “las garantías operan como medidas jurídicas que tienen como finalidad lograr la consecución, vigencia y efectividad de los derechos humanos al tiempo que aseguran la conservación de su carácter ontológico como límites jurídicos infranqueables para la potestad de la autoridad como lo ordena el primer párrafo del artículo 1o. constitucional” (2018e, Tesis: 2a. LXXXVIII/2018 10a.).

Una vez descrito el contenido, se concluye que el bien jurídico que se tutela con el derecho de acceso a la energía eléctrica es un bien público cuyo alcance de protección no implica que el Estado brinde de forma gratuita los servicios vinculados al disfrute de los derechos económicos, sociales y culturales; tampoco su reconocimiento conlleva que su cumplimiento se otorgue en términos absolutos sino que admite matices en atención al principio de progresividad<sup>5</sup>. Es decir, “los Estados cumplen la obligación de garantizar el núcleo esencial de los derechos económicos, sociales y culturales al establecer y fomentar las condiciones necesarias que permitan su ejercicio, sin que estén obligados a proporcionarlos de forma directa o gratuita. Lo anterior es así, pues se espera que las personas puedan satisfacer sus propias necesidades a través de su esfuerzo y trabajo” (SCJN, 2016f, Tesis: 2a. XCIII/2016 10a.).

En tanto, el núcleo esencial de los derechos es justo aquella parte del contenido de la prerrogativa que resulta indispensable para efecto de que los intereses jurídicos tutelados que le dan vida sean real, concreta y efectivamente protegidos. De modo que, cuando por una determinada causa la autoridad ignora la protección a un derecho humano y le impone limitaciones que dificultan su ejercicio, o bien, lo despoja de una necesaria protección impide su ejercicio (SCJN, 2016g, Tesis: 2a. XCII/2016 10a.).

Así, el Estado mexicano tiene la obligación incondicional de proteger el núcleo esencial de los derechos económicos, sociales y culturales porque se impone un deber de resultado para garantizarlos. “Es por ello que, en muchas ocasiones, la actividad jurisdiccional tiene la función de determinar el contenido, alcances, así como los límites de estos derechos fundamentales, constituyendo una función esencial para el desarrollo y el progreso de un verdadero Estado democrático” (Ídem) en el apartado subsecuente se abordan dos casos específicos que dan cuenta

<sup>5</sup> El principio de progresividad ligado a los derechos humanos además de comprender para los “Estados obligaciones positivas de actuación que implican el suministro de recursos económicos y que su plena realización está condicionada por las circunstancias económicas, políticas y jurídicas de cada país. Así, se incluyó este principio con la finalidad de hacer patente que esos derechos no constituyen meros ‘objetivos programáticos’, sino genuinos derechos humanos que imponen obligaciones de cumplimiento inmediato a los Estados, como la de garantizar niveles mínimos en el disfrute de esos derechos, garantizar su ejercicio sin discriminación, y la obligación de tomar medidas deliberadas, concretas y orientadas a su satisfacción; así como obligaciones de cumplimiento mediato que deben ser acometidas progresivamente en función de las circunstancias específicas de cada país” (SCJN, 2017c, Tesis: 1a./J. 86/2017 10a.).

de la protección al derecho humano de acceso a la energía eléctrica.

### 3. La configuración legal del derecho humano de acceso a la energía eléctrica y su interrelación con los derechos económicos, sociales y culturales

El Poder Judicial de la Federación por medio de sus tribunales competentes tiene como objetivo principal la impartición de justicia al momento de resolver las controversias que plantean las personas que demandan el respeto a sus derechos. En este epígrafe la idea central es hacer referencia a los criterios de interpretación emitidos en: las resoluciones derivadas del juicio de amparo indirecto número 127/2020 y del Incidente en Revisión número 74/2016 relativo al juicio de amparo indirecto número 1106/2015-III; en las cuales se contiene la configuración legal y se ordena garantizar el derecho humano de acceso a la energía eléctrica por ser un presupuesto indispensable para el disfrute de múltiples derechos económicos, sociales y culturales.

La interrelación entre estos derechos conlleva considerar que el acceso a la electricidad no constituye un derecho autónomo per se, empero de forma excepcional y conforme a los hechos de cada asunto, es posible protegerlo a través del juicio de amparo, cuando se presente el fenómeno de la concatenación con otros derechos humanos. Bajo dicha perspectiva resulta factible que el juez constitucional determine ordenar se restituya o se permita el acceso al suministro de energía eléctrica cuando la suspensión o falta del servicio implique una amenaza de una garantía fundamental.

#### Juicio de Amparo Indirecto número 127/2020

En este punto se estudia el juicio de amparo indirecto número 127/2020 tramitado en el Juzgado Cuarto de Distrito en el estado de Quintana Roo, con residencia en Cancún, en el particular la parte quejosa solicita la protección de la justicia federal frente a diversas omisiones vinculadas con la prestación del servicio de energía eléctrica perpetradas por el Gobernador del estado de Quintana Roo y otras autoridades, la demanda de garantías tiene el siguiente antecedente:

Los actos que se reclaman son: “la omisión de aplicar el plan nacional para el desarrollo de la industria eléctrica; la omisión de operar con eficacia la industria eléctrica; la negativa de celebrar el contrato de suministro con los quejosos; la omisión de regular la ocupación irregular de los predios, mediante la oferta de tierra a los grupos de bajos ingresos” (Sentencia 127/2020, pp. 5 y 6). Una vez limitada la materia del amparo el juez procede a analizar la inexistencia o certeza de los actos.

Después de esa revisión se sobreseen las supuestas omisiones del titular del ejecutivo del estado de Quintana Roo y otras autoridades, por tanto, en el juicio solo se revisan los actos cometidos por la Comisión Federal de Electricidad y Jefe de Oficina de la Superintendencia de la Zona de Distribución Cancún, Empresa Productiva Subsidiaria CFE Distribución, con residencia en Cancún.

Durante la tramitación del proceso la CFE manifiesta en su informe que a partir del 14 de octubre de 2014 cuando entra en vigor la Ley de la Comisión Federal de Electricidad “deja de formar parte de la administración pública federal descentralizada y se convierte en una empresa productiva del Estado” (Ibídem, p. 10). Por consiguiente, las inconformidades que emanen de los contratos de suministro de energía eléctrica celebrados entre la Comisión y los usuarios son de competencia de los tribunales de la Federación, en materia civil o mercantil, según proceda. Ante tal escenario, remarca:

los actos desplegados por la Comisión al tenor de un contrato de suministro de energía eléctrica, tales como el cobro por dicho servicio y accesorios, así como el probable corte de suministro de energía eléctrica, en caso de no pago o bien la negativa de la celebración de un contrato para suministrar el mencionado servicio; no pueden considerarse como actos desplegados por una autoridad —por cuanto ahora se regulan por el derecho privado—, ni considerarse equivalentes a los de autoridad —pues no derivan de una relación de supra a subordinación (Ibídem, p. 11).

Frente a este panorama el juez de distrito declara infundada la perspectiva de la CFE y establece que aún cuando hubo una modificación en su naturaleza, eventualmente, “la omisión de celebrar el contrato para suministrar el servicio de energía eléctrica sí

constituye un acto de autoridad para efectos del juicio de amparo” (Ídem). En razón de que se cumplen las dos condiciones que se disponen en el artículo 5 fracción II segundo párrafo de la Ley de Amparo: “1) Que realicen actos equivalentes a los de autoridad, que afecten derechos; y, 2) Que sus funciones estén determinadas por una norma general” (Ídem). Del mismo modo, es necesario contemplar que la materialidad de la acción se relaciona con obligaciones correlativas a prestaciones esenciales para los derechos económicos, sociales y culturales cuya responsabilidad de garantizarlos corresponde al Estado Mexicano.

Así, para determinar que la CFE pueda equipararse a una autoridad en un juicio de amparo es imprescindible dilucidar cada caso concreto a fin de contar los elementos pertinentes para determinar si los actos no pactados o que excedan el contrato de suministro básico con el usuario final constituyen la violación a un derecho humano, por ejemplo: la falta de justificación para celebrar un contrato de suministro de energía eléctrica o bien, la suspensión o el corte del servicio comprometan el derecho a la salud de una persona enferma dependiente de instrumentos conectados a la electricidad, entre otros supuestos (Ibídem, p. 24).

Por lo anterior, el juez determina que para el caso concreto la CFE al omitir la celebración del contrato de suministro de energía eléctrica con la quejosa actúa como autoridad responsable porque:

[...] al negarse u omitir celebrar un contrato de suministro crea, modifica o extingue por sí o ante sí, situaciones jurídicas que afectan la esfera legal del particular, pues ese acto puede llegar a conculcar el derecho humano contenido en el artículo 4 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, consistente en que todas las personas cuenten con una vivienda que tenga los elementos mínimos necesarios para ser considerada digna y decorosa; es decir, los que garanticen un nivel mínimo de bienestar a quien la habite, entre los que se encuentran la electricidad, iluminación y ventilación adecuadas, pues la comisión mencionada es la única que puede prestar ese servicio (Ibídem, p. 25).

Luego, el juez procede a revisar la constitucionalidad del acto reclamado en contra de la CFE, de acuerdo con la actora del juicio “los empleados de la empresa eléctrica les han negado el suministro a pesar de que existe la infraestructura necesaria para

prestar el servicio. Lo cual vulnera su derecho humano a una vida digna, ya que sin el servicio de energía eléctrica no están en posibilidad de disfrutar de otros derechos fundamentales como el de salud, alimentación, la educación, vivienda digna y decorosa, acceso a la cultura entre otros” (Ibídem, p. 28).

Además, este hecho expresa la promovente que: “ha colocado en situación de riesgo a los menores afectando su salud y las posibilidades de desarrollar una vida digna. Máxime que la falta de suministro de energía eléctrica realizado por las autoridades responsables tiene como consecuencia directa el riesgo al contagio del virus SARS-CoV2 (COVID19), pues le impide obtener agua potable, necesaria para cumplir los requerimientos de higiene y evitar el contagio del virus” (Ibídem, p. 29).

El concepto de violación de la promovente se declara fundado al deliberar el juez de distrito que “el acceso al suministro de energía eléctrica es un servicio que constituye un presupuesto indispensable para la satisfacción de los derechos fundamentales reconocidos en nuestra Carta Magna, por lo que su obstrucción constituye un acto contrario a la Ley Fundamental” (Ídem).

También, es conveniente tener en cuenta la interpretación del Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de la Organización de las Naciones Unidas en la Observación General No. 4 (1991) (E/1992/23) al artículo 11 numeral 1 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales, así como los Lineamientos en Aspectos Prácticos respecto del Derecho Humano a la Vivienda Adecuada, elaborados por el Comité de Asentamientos Humanos de la Organización de las Naciones Unidas, y los Principios de Higiene de la Vivienda, emitidos por la Organización Mundial de la Salud, en Ginebra en 1990 mediante estos instrumentos se describen las condiciones mínimas de una vivienda digna y decorosa:

- (a) Debe garantizarse a todas las personas;
- (b) No debe interpretarse en un sentido restrictivo;
- (c) Para que una vivienda se considere adecuada requiere contar con los elementos que garanticen un nivel mínimo de bienestar a quien la habite, esencialmente, una infraestructura básica adecuada, que proteja de la humedad, la lluvia, el viento, así como riesgos estructurales, con instalaciones sanitarias y de aseo, un espacio especial para pre-

parar e ingerir los alimentos, espacio adecuado para el descanso, iluminación y ventilación adecuadas, acceso al agua potable, electricidad, y drenaje; y,

(d) Los Estados deben adoptar una estrategia nacional de vivienda para alcanzar el objetivo establecido en el pacto internacional de referencia, así como tomar e implementar las medidas legislativas, administrativas, presupuestarias y judiciales adecuadas para la realización plena de dicho derecho, dentro de las cuales está asegurar a la población recursos jurídicos y mecanismos judiciales para que los gobernados puedan reclamar su incumplimiento, cuando las condiciones de las viviendas no sean adecuadas o sean insalubres (Ibídem, p. 30).

La interpretación clarifica que el servicio público universal del suministro de electricidad es un aspecto básico para contar con una vivienda digna y decorosa a fin de proporcionar un nivel mínimo de bienestar a quienes la habitan. En este sentido, el juzgador relaciona el acceso al servicio de energía eléctrica como un medio para “el desarrollo de las personas (físicas y morales), en tanto constituye la fuente de energía primordial para el funcionamiento de las actividades cotidianas y para la materialización, incluso, de algunos derechos humanos y fundamentales de las mismas” (Ibídem, p. 31). Tal circunstancia sitúa la prestación del suministro de electricidad interdependiente para el disfrute de los derechos humanos a la salud, a la vivienda digna, a la cultura, a la información, a internet, etcétera.

La falta de electricidad en un hogar genera la imposibilidad de disfrutar de esas prerrogativas, por ello la comunidad internacional a través de los instrumentos internacionales reconoce que la energía es una condición necesaria para garantizar los mismos e insta a los Estados a su cumplimiento.

Además, este juicio de amparo adquiere mayor relevancia al encontrarse entre los quejosos cuatro menores que están siendo afectados en el ejercicio de sus derechos humanos reconocidos en el artículo 4o de la CPEUM y el 3o de la Convención sobre los Derechos del Niño, ratificada por México; por tanto, los tribunales al momento de emitir sus decisiones en asuntos que involucren infantes deben analizar “la expresión ‘interés superior del niño’ [...] implica que el desarrollo de éste y el ejercicio pleno de sus derechos deben ser considerados como criterios rec-

tores para la elaboración de normas y la aplicación de éstas en todos los órdenes relativos a la vida del niño” (Ibídem, p. 35).

El juez concluye: una vez que se declare firme la sentencia tiene como efecto la celebración del contrato de suministro de energía eléctrica y con ello proporcionar el servicio en el domicilio de la parte quejosa, así la justicia de la unión ampara y protege a los promoventes frente a las omisiones de la autoridad responsable.

En la sentencia del amparo comentada se plasma que la CFE al omitir celebrar el contrato de suministro eléctrico perjudica el interés superior de los menores quejosos, al privarlos de la posibilidad de llevar una vida digna en condiciones de igualdad pues han visto limitado su ejercicio a la educación, salud, vivienda digna y decorosa, ambiente adecuado para el desarrollo y bienestar de las personas; el acceso a la cultura, el acceso a la información, por ejemplificar, lo cual conlleva a declarar fundada la protección constitucional para los menores contra los actos de la CFE.

### Incidente en Revisión número 74/2016 relativo al juicio de amparo indirecto número 1106/2015-III

En el caso específico, los hechos que le dan origen al incidente en revisión número 74/2016 se desprenden de la inconformidad con la resolución interlocutoria dictada en el incidente de suspensión relacionado con la demanda de garantías número 1106/2015-III tramitada en el Juzgado Sexto de Distrito en Materia Civil en el Distrito Federal (hoy ciudad de México), por razones de competencia le corresponde resolver al Tercer Tribunal Colegiado en materia civil del Primer Circuito.

A continuación, se hace una breve referencia de los antecedentes que dan origen a la litis del incidente en revisión:

a) Emanada del juicio ordinario mercantil número 819/2015, seguido ante el Juez Décimo Cuarto de Distrito en Materia Civil en el Distrito Federal que versa sobre las modificaciones al contrato de arrendamiento de un local comercial que promueve la parte recurrente y entre las prestaciones que reclama se encuentra la siguiente: “La modificación de la cláusula quinta, en la parte en que permite a la arrendadora cortar el suministro de energía eléctrica al local comercial arrendado, en caso de que el arrendatario presente adeudos vencidos por más de dos mensuali-

dades o incumpla alguna otra obligación” (Resolución 76/2014, p. 9).

Aunado a las prestaciones la parte actora solicita como “medida urgente” (providencia precautoria) que la demandada restablezca el servicio de energía eléctrica en el local, pues, la dueña del local comercial interrumpió el suministro de electricidad en alcance a la relación contractual pese a que la promovente pagó oportunamente los importes de los recibos de luz a la Comisión Federal de Electricidad (Ibídem, pp. 10 y 11).

El juicio ordinario mercantil sigue su curso y el Juez determina en el auto que admite el incidente de “la medida urgente” conceder la providencia cautelar, siempre y cuando la promovente otorgara en el plazo de tres días contados a partir de que surte efectos la notificación del acuerdo de liquidación de garantía la cantidad de \$1,174,847.49, misma que se calculó con base en la renta mensual adeudada y la Tasa de Interés Interbancaria de Equilibrio aplicada durante el tiempo que se estimó duraría el litigio.

b) Ante ello, la actora recurre la determinación del Juez a través del recurso de apelación, pero el juzgador lo desecha al deliberar que no es el medio de impugnación idóneo en virtud de tratarse de un auto de admisión de la medida precautoria y no la resolución del incidente; por lo tanto, la promovente presenta la revocación contra el auto desechatorio la cual es admitida aunque la resolución no le favorece porque se concluyó que el acuerdo impugnado se quedó sin materia al no otorgarse en tiempo la garantía de la provincia precautoria, por ende deja de surtir efectos (Ídem).

c) Así las cosas, la actora presenta el juicio de amparo indirecto número 1106/2015-III ya citado en líneas precedentes, en contra de la resolución del recurso de revocación y solicita la suspensión del acto reclamado. Sin embargo, de inicio el juez de distrito le niega la suspensión del cuaderno incidental, en razón de que el auto es meramente declarativo dejando sin materia el recurso de revocación y la única consecuencia de dicha declaración es dejar firme el acuerdo apelado; por lo que suspender esa declaración carece de relevancia para las cuestiones de hecho o de derecho mismas que se resolverían en la sentencia de amparo (Ibídem, p. 16).

Establecido lo anterior, el tribunal colegiado en primer término, enfoca su análisis del asunto en la revisión de los agravios descritos por la actora, quien considera excesiva la garantía de la providencia precautoria para que la demandada restablezca el suministro de energía eléctrica en el local arrendado y contrario a lo que determinó el juez de distrito, “el acto reclamado no es puramente declarativo, ya que se puede decretar la suspensión para que siga surtiendo efectos la medida cautelar decretada por el juez responsable, la cual tiene por objeto preservar el objeto del juicio natural” (Ibídem, p. 17).

Al respecto el tribunal declara sustancialmente fundado el concepto de violación e indica que: “cuando se impugna como excesiva la garantía de una medida cautelar dictada en un juicio ordinario, la resolución que deja firme su monto no es un acto puramente declarativo. En realidad, se trata de un acto que tiene un efecto positivo susceptible de ser paralizado, consistente en permitir la actualización o reanudación de la conducta que pretendía evitarse con providencia precautoria” (Ibídem, p. 18).

Lo cual significa, por un lado, que el alcance de la garantía de una medida cautelar es evitar los posibles daños y perjuicios que se pueden originar a terceros si la parte solicitante no obtiene una sentencia favorable, es decir, “de no justificarse la fijación de una garantía o de resultar excesiva, la eficacia de la medida cautelar podría resultar inasequible” (Ibídem, p. 19) por tanto, pierde su utilidad y posibilita perdure la acción que pretendía evitarse, lo cual pone en riesgo la materia del juicio y la eficacia de una sentencia a favor que pudiese obtener el solicitante.

Así, “cuando se impugna como excesiva o injustificada la garantía de una medida cautelar, la resolución que deja firme su monto —tildado de inaccesible— no es un acto meramente declarativo, sino que tiene un efecto positivo susceptible de paralizarse, consistente en permitir la verificación o reanudación de los actos que se intentaban impedir provisoriamente en aras de la eficacia de un fallo estimatorio” (Ibídem, p. 20).

Por otro lado, se modifica la perspectiva del juez de distrito que plantea no conceder la suspensión del acto reclamado porque la restitución de la medida es propia de la sentencia de amparo y no del proceso incidental; a lo cual el tribunal da el revés, debido a que la providencia precautoria representa la sustitución

del derecho presuntamente violado, esto es, el suministro de energía eléctrica en el local arrendado, para ello se precisa mantenerla vigente en el juicio natural (ordinario mercantil) además, la petición cumple con los requisitos legales.

En segundo término, al estudiar el tribunal los requisitos de procedencia de la suspensión definitiva, identifica que la parte actora además “cuenta a su favor con la apariencia del buen derecho, elemento que debe ponderarse al analizar el interés social, como se colige del artículo 138 de la Ley de Amparo” (Ibídem, p. 31). Esto es, restablecer la energía eléctrica se traduce en un tema de interés social porque la colectividad encuentra un beneficio en el funcionamiento de las empresas y las fuentes de empleo que se generan. Por ende, el solicitante de la medida cautelar debe acreditar el derecho a preservar y las consecuencias de perderlo. En el caso específico, al no contar con el suministro de electricidad derivado del conflicto de arrendamiento, se impide puedan brindarse los servicios y a la postre generarse desempleo.

Entonces, la apariencia del buen derecho se basa, en un conocimiento superficial dirigido a lograr una decisión de mera probabilidad respecto de la existencia del derecho discutido en el proceso. La aplicación de este principio en materia de la suspensión de los actos reclamados implica que para obtener esa medida cautelar basta con comprobar la verosimilitud del derecho invocado por el quejoso y observar sus requisitos legales de procedencia. (Ibídem, p. 32).

Por ende, aquí la relevancia de la valoración del tribunal colegiado consiste en volver al punto clave que da origen al procedimiento principal: la petición de nulidad de la cláusula contractual que faculta a la arrendadora a cortar el suministro de energía eléctrica cuando la arrendataria incumpla con el pago de las rentas. Así como, la aprobación de la medida cautelar para mantener el servicio de electricidad en tanto se substanciará el juicio sobre la validez de dicha cláusula.

La acción de suspender la electricidad, sin perjudicar dice el tribunal colegiado, implica una perturbación sobre el uso y disfrute del inmueble arrendado en contravención con la naturaleza misma del arrendamiento. El derecho mandata al arrendador a garantizar el uso del local comercial sin intervenirlos salvo reparaciones urgentes e indispensables conforme a

lo que se establece en los artículos 2412 fracción IV y 2418 del Código Civil Federal de aplicación supletoria al Código de Comercio, para la litis en comento estas disposiciones representan una cláusula natural en el contrato citado al pertenecer al género de normas taxativas, las cuales deben interpretarse como independientes de la voluntad de las partes por lo que no es lícito derogarlas ni de forma absoluta ni relativa porque es un contrato traslativo y el uso constituye la esencia del arrendamiento (Ibídem, pp. 34 y 35).

La apreciación precedente de ninguna forma deja indefenso al arrendador del inmueble quien dispone de procedimientos judiciales para exigir el pago de las rentas no cubiertas, hacer valer el cumplimiento del contrato o interponer acciones para la sanción de cláusulas contrarias a la naturaleza contractual, en los términos de las leyes civiles y mercantiles. Sin embargo, en este caso se estima que la parte actora goza de la apariencia del buen derecho, también se destaca que “el acceso al suministro de energía eléctrica es un derecho humano, en la medida en la que constituye un presupuesto indispensable para la satisfacción de otros derechos fundamentales reconocidos en nuestra Carta Magna” (Ibídem, p. 36).

El análisis de los hechos del juicio principal permite al tribunal colegiado desarrollar la interpretación de la configuración legal del derecho humano de acceso a la energía eléctrica como indispensable para el disfrute de otros derechos económicos, sociales y culturales, entre los que se encuentra la libertad de comercio, el derecho al trabajo de la arrendataria, por ejemplo. Así, la reactivación de la medida cautelar consiste en la reconexión del servicio, pues “sin el restablecimiento provisional de acceso al flujo eléctrico, sería prácticamente imposible que la peticionaria de amparo pueda seguir prestando el servicio de centro cambiario, al que está destinada la localidad” (Ibídem, p. 37).

Finalmente, en la resolución del incidente de revisión “no se advierte la necesidad de fijar una garantía discrecional para resarcir al tercero interesado por la postergación de ese supuesto derecho contractual” (Ibídem, p. 43). Máxime que el corte del servicio no lo realiza la empresa que lo brinda, la CFE, dado que de manera puntual la arrendataria se encuentra al corriente de los pagos de los kilowatts hora consumidos en el local comercial. Por consiguiente, se revoca

“la interlocutoria suspensiva recurrida y concede la suspensión definitiva” (Ídem).

Si bien los asuntos constitucionales descritos en estos apartados ilustran dos escenarios disímiles, están unidos por la necesidad imperiosa de los quejosos de disponer del servicio de electricidad de manera constante y oportuna para llevar a cabo sus actividades, las cuales son nada más y nada menos que el ejercicio de sus derechos económicos, sociales y culturales irrenunciables para desarrollarse dignamente.

Por último, en este trabajo la vinculación de todos los apartados permite comprender la relevancia de ampliar el panorama del Derecho más allá de la mera aplicación de las leyes elaboradas por el legislador, en virtud de que para decretar justicia en un hecho concreto el juzgador debe analizar el Derecho en un sentido amplio y no restringido a la expresión literal de las normas, pues las mismas marcan pautas, aunque también permiten, como se aprecia en la determinaciones judiciales mencionadas, la posibilidad del poder judicial de establecer la configuración legal del derecho humano de acceso a la energía eléctrica correlativo para la salvaguarda de otros derechos humanos.

## 4. Conclusiones

La energía eléctrica al convertirse en uno de los principales servicios que requiere la población para llevar a cabo sus rutinas o tareas cotidianas es tal, que se encuentra en constante crecimiento la demanda de electricidad, lo cual conlleva un gran desafío para los Estados pues implica ser la llave para que las personas tengan la posibilidad de participar en la sociedad de la información y el conocimiento, desarrollar su propia cultura y ejercer sus derechos humanos aprovechando los avances tecnológicos que solo funcionan con este servicio público universal.

Ahora, también parece ser un imperativo el deber de diversificar e invertir en fuentes renovables para la generación de energía eléctrica, al tener evidencia científica que el agotamiento de las fuentes no renovables puede estar próximo; en el caso de México en los últimos ocho años el tema del suministro de energía eléctrica se ha discutido en todos los sectores, además de empezar a dar los primeros pasos para la obtención de energía eléctrica de manera cada vez más sustentable.

Bajo este escenario, se ejercen los derechos económicos, sociales y culturales cuyo goce se relaciona con el acceso a la energía eléctrica; ahora bien, siguiendo lo que se plantea en la Recomendación número 51/2012 de la Comisión Nacional de los Derechos Humanos, se puede inferir que los retos más próximos para México son:

[...] el servicio público de energía eléctrica, para prestarse de manera adecuada debe registrarse bajo los siguientes principios:

- 1) principio de respeto a la dignidad humana, esto es, el otorgamiento del servicio deberá garantizar al ciudadano un nivel mínimo de derechos exigibles a fin de desarrollar una vida digna y no podrá tratar, bajo ninguna circunstancia, a las personas como objetos;
- 2) principio de eficiencia en la prestación, lo que implica que el servicio debe otorgarse de manera eficiente para dar respuesta a las necesidades sociales;
- 3) principio de regularidad en la prestación del servicio público, esto es, que se preste el servicio de manera ininterrumpida y que su otorgamiento no se condicione suspenda, bajo ninguna situación, si ésta limita, vulnera, o potencialmente pone en riesgo un derecho humano (pp. 31 y 32).

Si bien es cierto, el servicio de energía eléctrica que brinda la Comisión Federal de Electricidad a la fecha tiene una cobertura del 99.4% de la población en México, la misma debe mantenerse con calidad y con los parámetros que precisa la Comisión Nacional de Derechos Humanos, además de cubrir la demanda del 0.6% restante porque aun y cuando pueda parecer ínfima la cantidad, representa a cientos de mexicanos sin servicio de energía eléctrica, circunstancia que violenta sus derechos humanos, al negárseles el acceso a un servicio básico para desarrollar sus vidas de manera digna.

A nivel internacional la Organización de las Naciones Unidas y la Comisión Económica para América Latina y el Caribe manejan el concepto de pobreza energética con el objetivo de visibilizar que a millones de personas en el mundo no se les puede garantizar el mínimo de electricidad para cuestiones tan simples, la refrigeración de alimentos o protegerse de las inclemencias del clima. Por tanto, la comunidad internacional necesita mantener un alto compromiso

para situar como elemental este servicio para la superación de la miseria.

Por ende, el Estado debe garantizar el acceso al suministro de energía eléctrica a todo aquel que lo solicite, así, la electricidad es un servicio básico imprescindible para cualquier persona como se constata con la interpretación de la configuración legal que ha realizado el Poder Judicial de la Federación en México a través de sus juzgadores, los cuales en casos particulares y con alcance solo para éstos, el acceso a la energía eléctrica es un derecho humano vinculado con otros derechos humanos.

## Referencias

- Banco Mundial. (2022). Acceso a la electricidad (% de población) México. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCS.ZS?locations=MX>
- Color, M. y Moreno, C. (2016). 20 claves para conocer y comprender mejor los derechos humanos, México, ONU-DH, 3ra. Edición.
- Comisión Federal de Electricidad. (2022). Servicios de Energía Eléctrica. <https://app.cfe.mx/aplicaciones/CCFE/SolicitudesCFE/Solicitudes/SolicitudDeEnergiaGmx.aspx>. (2022a). ¿Qué es la CFE? <https://www.cfe.mx/nuestraempresa/Pages/queeslacfe.aspx>
- Congreso Constituyente de los Estados Unidos Mexicanos. (1917, 5 de febrero). Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Diario Oficial de la Federación. <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/CPEUM.pdf>
- Gómez Montoro, J. A. (2002). “La titularidad de derechos fundamentales por personas jurídicas. Un intento de fundamentación”, La democracia constitucional. Homenaje al Profesor Francisco Rubio Llorente. Vol. I, Madrid, CEC.
- Juzgado Cuarto de Distrito en el estado de Quintana Roo. (2020, 12 de noviembre). Amparo Indirecto número 127/2020. <https://www.dgej.cjf.gob.mx/internet/expedientes/ExpedienteyTipo.asp>
- Martínez Ramírez, F. (2011). “El juicio de amparo, su naturaleza jurídica y relación con los tribunales constitucionales” en: González Oropeza, M. y Ferrer Macgregor, E. (Coords.) El juicio de amparo. A 160 años de la primera sentencia, tomo II, IJ-UNAM, México, <https://biblio.juridicas.unam.mx/bjv/detalle-libro/3066-el-juicio-de-amparo-a-160-anos-de-la-primera-sentencia-tomo-ii>
- Miranda Olivo, M. (2015). “LAS EMPRESAS PRODUCTIVAS DEL ESTADO, ANÁLISIS DE SU RÉGIMEN JURÍDICO Y COMPARATIVO CON LAS SOCIEDADES ANÓNIMAS”, Revista Electrónica de la Facultad de Derecho, AMICUS CURIAE Vol. 1, Número 3, enero-abril 2015, UNAM, Fa-

- cultad de Derecho, División de Universidad a Distancia, pp.69-99. <http://revistas.unam.mx/index.php/amicus/article/view/49629/44653>
- ONU. (2021). Informe del Relator Especial sobre una vivienda adecuada como elemento integrante del derecho a un nivel de vida adecuado y sobre el derecho de no discriminación. <https://documents-dds-ny.un.org/doc/UNDOC/GEN/N21/289/78/PDF/N2128978.pdf?OpenElement>
- Sandoval, A. y De la Torre, C. (Coords.). (2010). Los Derechos Económicos, Sociales y Culturales: EXIGIBLES y JUSTICIABLES. Preguntas y respuestas sobre los DESC y el Protocolo Facultativo del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales. Espacio DESC-PIDHDD-ONUDH México. <http://www.cotidianomujer.org.uy/sitio/pdf/Protocolo-interiores.pdf>
- Secretaría de Energía. (2022). Sistema de Información Energética de CFE, Estadísticas Energéticas Nacionales. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cua dro&subAction=applyOptions>
- \_\_\_\_\_. (2021). Glosario. [https://sie.energia.gob.mx/docs/glosario\\_elec\\_es.pdf](https://sie.energia.gob.mx/docs/glosario_elec_es.pdf)
- Sindicato de Luz y Fuerza de Mar de Plata. (2018). Declaración de Mar del Plata por el Derecho a la Energía y la solidaridad internacional de las trabajadoras y los trabajadores, Mar del Plata, 12 y 13 de octubre de 2018. <http://www.fsls.org.uy/assets/declaracion-encuentro.pdf>
- Suprema Corte de Justicia de la Nación. (2018a). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis: I.3o.C.100 K (10a.), México, Décima Época, Libro 61, diciembre de 2018, Tomo II.
- \_\_\_\_\_. (2017b). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis:(I Región)8o.2 CS (10a.), México, Décima Época, Libro 41, Abril de 2017, Tomo II.
- \_\_\_\_\_. (2017c). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis: 1a./J. 86/2017 (10a.), México, Décima Época, Libro 47, octubre de 2017, Tomo I.
- \_\_\_\_\_. (2013d). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis: 1a. CCXV/2013 (10a.), México, Décima Época, Libro XXII, julio de 2013, Tomo I.
- \_\_\_\_\_. (2018e). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis: 2a. LXXXVIII/2018 (10a.), México, Décima Época, Libro 58, septiembre de 2018, Tomo I.
- \_\_\_\_\_. (2016f). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis: 2a. XCIII/2016 (10a.), México, Décima Época, Libro 34, septiembre de 2016, Tomo I.
- \_\_\_\_\_. (2016g). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis: 2a. XCII/2016 (10a.), México, Décima Época, Libro 34, septiembre de 2016, Tomo I.
- \_\_\_\_\_. (2009). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis [A.]: I.7o.A.666 A, T.C.C., México, Novena Época, tomo XXX, diciembre de 2009.
- \_\_\_\_\_. (2014). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis: 1a. L/2014 (10a.), México, Décima Época, Libro 3, febrero de 2014, Tomo I.
- \_\_\_\_\_. (2018). Gaceta del Semanario Judicial de la Federación, Tesis 1a. CLI/2011, México, Novena Época, t. XXXIV, agosto de 2011.
- Tercer Tribunal Colegiado en materia civil del Primer Circuito. (2016, 12 de mayo). Resolución del Incidente en Revisión número 74/2016 relativo al Juicio de amparo indirecto número 1106/2015-III. <https://www.dgej.cjf.gob.mx/internet/expedientes/ExpedienteyTipo.asp>
- Yanome Yesaki, M. (2016). El Concepto de Servicio Público y su Régimen Jurídico en México. <https://archivos.juridicas.unam.mx/www/bjv/libros/6/2544/31.pdf>

# Universidad del Istmo

## OFERTA EDUCATIVA



CAMPUS TEHUANTEPEC



CAMPUS IXTEPEC



CAMPUS JUCHITÁN

- Ingeniería Química
- Ingeniería de Petróleos
- Ingeniería en Diseño
- Ingeniería en Computación
- Ingeniería Industrial
- Licenciatura en Matemáticas Aplicadas
- Ingeniería en Energías Renovables
- Maestría en Ciencias en Energía Eólica
- Maestría en Ciencias en Energía Solar
- Licenciatura en Administración Pública
- Licenciatura en Ciencias Empresariales
- Licenciatura en Informática
- Licenciatura en Derecho
- Maestría en Derecho de la Energía
- Licenciatura en Nutrición
- Licenciatura en Enfermería



Instituto de Energía



Laboratorios de Estudios de la Energía



Instituto de Estudios Constitucionales y Administrativos



Centro de Investigación en Nutrición y Alimentación



Clínica Robotizada de Enfermería



Laboratorios



REVISTA DE LA UNIVERSIDAD DEL ISTMO