



- » Efecto estela en parques eólicos
- » Fotocatálisis heterogénea: una alternativa ante la contaminación de aguas residuales
- » Kesteritas como capa transportadora de huecos en celdas solares de perovskita
- » Influencia de polímeros orgánicos en celdas solares
- » Cálculo de primeros principios (DFT) aplicadas a celdas solares
- » Los fulerenos como MTE en las celdas solares
- » Deshidratación solar: una alternativa sostenible para preservar alimentos
- » Impacto de los vientos extremos en el Istmo de Tehuantepec: causa y efecto
- » Diseño y construcción del sistema electrónico de potencia para un aerogenerador



REPRESENTANTES INSTITUCIONALES

Rectora
María de los Ángeles Peralta Arias

Vice-rector Académico
Edwin Román Hernández

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 Transísmica Juchitán-La Ventosa, Km. 14, La Ventosa, Oaxaca. C.P. 70102, Tel. 971 712 70 50. www.unistmo.edu.mx, contacto_revista@sandunga.unistmo.edu.mx. 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

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

Eduardo Campos Mercado

Secihti-Universidad del Istmo

Daniel Pacheco Bautista

Universidad del Istmo

Jaime Torres Fragoso

Universidad del Istmo

COMITÉ EDITORIAL

Juquila Araceli González Nolasco

Universidad del Istmo

Antonio Salazar Campos

Universidad del Istmo

Edwin Román Hernández

Universidad del Istmo

Edgar López Martínez

Universidad del Istmo

Edú Ortega Ibarra

Universidad del Istmo

DISEÑO EDITORIAL

Yuliana García Amaya

Universidad del Istmo

CONTENIDO

ARTÍCULOS

- | | | | |
|----|---|----|--|
| 5 | Efecto estela en parques eólicos Brenda Mendoza Cabrera, José Rafael Dorrego Portela, Quetzalcóatl Cruz Hernández-Escobedo, Reynaldo Iracheta Cortez, Liliana Hechavarría Difur, Víctor Iván Moreno Oliva | 33 | Cálculo de primeros principios (DFT) aplicadas a celdas solares Dunia Ruiz Villalobos, Isaac Montoya De Los Santos, Miguel Ojeda Martínez |
| 11 | Fotocatálisis heterogénea: una alternativa ante la contaminación de aguas residuales Jesús Ignacio Toledo Díaz, Fernando Morales Anzures, Pastora Salinas Hernández | 41 | Los fulerenos como MTE en las celdas solares Brandon L. Lazo Cervantes, Liliana Hechavarría Difur, Hugo J. Cortina Marrero, I. Montoya De Los Santos |
| 19 | Kesteritas como capa transportadora de huecos en celdas solares de perovskita Mildred Camacho Carlock, Isaac Montoya De Los Santos, Maykel Courel, Liliana Hechavarría Difur, Hugo J. Cortina-Marrero | 47 | Deshidratación solar: una alternativa sostenible para preservar alimentos Claudia Martínez Alonso, Juan Pereyda Hernández, Ulises Martínez Alonso, Evelyn B. Díaz-Cruz |
| 25 | Influencia de polímeros orgánicos en celdas solares G. Alameda Alonso, Hugo J. Cortina-Marrero, L. Hechavarría Difur, Isaac Montoya De Los Santos | 53 | Impacto de los vientos extremos en el Istmo de Tehuantepec: causa y efecto J.A. Rojas Escobar, E. Dueñas Reyes, E. Campos Mercado |
| | | 61 | Diseño y construcción del sistema electrónico de potencia para un aerogenerador J. Benítez Ovando, J. A. Enríquez Santiago, E. Campos Mercado |

Carta Editorial

Estimados lectores y colaboradores,

Es un honor presentar el Volumen 4 de la Revista General Unistmo, una publicación comprometida con la difusión del conocimiento en diversas áreas del saber. En esta edición, continuamos fortaleciendo nuestro compromiso con la investigación, la innovación y el análisis crítico, elementos esenciales para el desarrollo académico y social.

A lo largo de sus volúmenes, Revista General Unistmo ha consolidado un espacio de reflexión y diálogo en el que convergen disciplinas científicas, tecnológicas, humanísticas y sociales. En esta cuarta entrega, nuestros autores presentan investigaciones que abordan problemáticas contemporáneas desde enfoques multidisciplinarios, enriqueciendo así el panorama del conocimiento.

En este número, destacan artículos que analizan temas de impacto en la educación, la tecnología y el desarrollo sostenible, elementos fundamentales para la transformación social y el bienestar de nuestras comunidades. Cada contribución ha pasado por un riguroso proceso de evaluación por pares, garantizando la calidad y relevancia de los contenidos presentados.

Agradecemos profundamente a los investigadores, académicos y profesionales que han confiado en nuestra revista para la divulgación de sus trabajos, así como al equipo editorial y revisores que han dedicado su tiempo y esfuerzo para hacer posible esta publicación. Su colaboración es invaluable para la continuidad y crecimiento de este proyecto editorial.

Invitamos a la comunidad académica a seguir participando activamente en este espacio, enviando sus contribuciones y promoviendo el acceso al conocimiento como herramienta para el desarrollo y la innovación. Estamos convencidos de que el intercambio de ideas y la difusión científica son pilares fundamentales para el avance de la sociedad.

Con la certeza de que este volumen será de gran interés y utilidad para nuestros lectores, les agradecemos por su confianza y apoyo continuo.

Atentamente

Dr. Isaac Montoya De Los Santos
Director de la Revista General UNISTMO

Contacto:

contacto.revista.unistmo@gmail.com

contacto_revista@sandunga.unistmo.edu.mx

Efecto estela en parques eólicos

Brenda Mendoza Cabrera¹
José Rafael Dorrego Portela^{2*}
Quetzalcóatl Cruz Hernández-
Escobedo³
Reynaldo Iracheta Cortez²
Liliana Hechavarría Difur²
Víctor Iván Moreno Oliva²

¹ Maestría en Ciencias en Energía Eólica

² División de Estudios de Posgrado
Universidad del Istmo

³ Escuela Nacional de Estudios
Superiores Unidad Juriquilla, UNAM

Correspondencia:

*r.dorrego@sandunga.unistmo.edu.mx

Palabras Clave:

Efecto estela, Turbulencia, Parque eólico, aerogenerador

RESUMEN

Los aerogeneradores extraen energía del viento, como resultado el viento que sale de ellos posee menos velocidad y tiene un flujo turbulento. Este viento resultante se le llama estela, por lo tanto, podemos definir que el efecto estela es la turbulencia que se genera aguas abajo del aerogenerador provocando diversas afectaciones a los componentes del aerogenerador, disminuyendo su vida útil y a la producción de energía. Las regiones fundamentales del efecto estela se encuentran el flujo cercano al rotor del aerogenerador y la región lejana del aerogenerador. Para poder realizar el estudio del efecto estela se han presentado diferentes modelos numéricos que permitan simular el movimiento turbulento de los fluidos.

ABSTRACT

Wind turbines extract energy from the wind, as a result the wind that comes out of them has less speed and has a turbulent flow. This resulting wind is called wake; therefore, we can define that the wake effect is the turbulence that is generated downstream of the wind turbine causing various effects on the components of the wind turbine, reducing its useful life and energy production. The fundamental regions of the wake effect are the flow close to the rotor of the wind turbine and the region far from the wind turbine. To carry out the study of the wake effect, different numerical models have been presented that allow simulating the turbulent movement of fluids.

1. Introducción

Las emisiones de dióxido de carbono, que se producen principalmente por la quema de combustibles fósiles, suponen una gran amenaza para el medio ambiente y la salud pública (Heal, 2009). Por ello se han buscado diferentes soluciones para poder contrarrestar el daño ambiente sin poner en riesgo el cumplimiento de las necesidades eléctricas, por lo que se han implementado el uso de energías renovables como la energía solar, mareomotriz, geotérmica, eólica, por mencionar algunos ejemplos.

Los parques eólicos se han convertido en uno de los modelos de producción energética renovable con mayor impulso en el mundo durante las últimas dos décadas, por lo que, en México, al igual que otros países, se han establecido marcos normativos que promueven la adopción de estos y faciliten su desarrollo (Alonso y Beltrán, 2021).

La electricidad generada por los aerogeneradores es muy similar a un generador de plantas hidroeléctricas y que queman carbón con excepción que la fuente de energía primaria es el viento (en vez de agua o vapor) que hace mover los alabes de los aerogeneradores y forzar el eje del generador a rotor (Méndez et al., 2010).

Un aerogenerador actúa como un obstáculo para la velocidad del viento en la corriente libre con un flujo laminar, lo que resulta en el desarrollo de un efecto de estela que se caracteriza por una velocidad del viento reducida y un flujo turbulento en la dirección aguas abajo (Jain et al., 2023).

En un parque eólico la estela se amplifica esto se debe al posicionamiento y el número de aerogeneradores instalados provocando que se investigue la manera de optimizar el diseño de los parques para

aumentar la producción de energía anual y mantener la vida útil estimada de los aerogeneradores

Al estimar la pérdida de estela para evitar una sobreestimación de la producción de energía eólica, se tiene en cuenta la influencia de la velocidad y dirección del viento, por lo tanto, existen diferentes modelos que permiten conocer el impacto del efecto estela.

El objetivo de este artículo es dar a conocer la definición del efecto estela en un aerogenerador y los modelos para estudiar la estela. Como punto de partida se explicará el concepto de una estela, las partes donde se presenta la estela, así como la diferencia entre cada una de ellas. Finalmente se habla de algunos modelos que se han utilizado para poder desarrollar más el estudio del efecto estela.

2. Efecto estela

La energía eólica ha evolucionado en los últimos tiempos, pero conforme avanza el tiempo también aumenta el número de problemáticas por lo que la influencia del efecto estela y las cargas generadas por la estela tienden a tomar un papel muy importante al momento de realizar emplazamientos eólicos.

El efecto estela o también conocido como efecto sombra es la reducción de la velocidad del viento y el aumento de la turbulencia que se produce aguas abajo del aerogenerador (Brower, 2012).

En la Fig. 1 se observa la turbulencia que se genera al momento que el viento pasa por las aspas del aerogenerador, además se identifica donde se encuentra ubicado aguas arriba y aguas abajo de los aerogeneradores.

Por lo tanto, se puede definir que, aguas arriba es la parte donde el viento interactúa con el rotor y aguas abajo es la salida del viento.

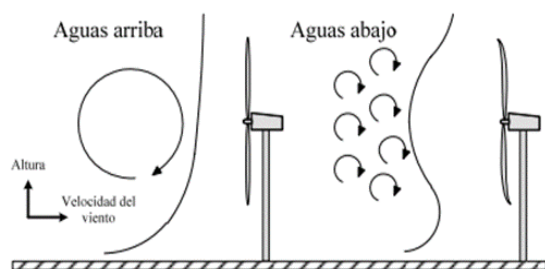


Fig. 1 Interacción del viento con los aerogeneradores.
Fuente: Méndez, C., Gonzáles-Longatt, F., Gavorskis, E., y Ravelo, O. (2010).

En la distribución de los aerogeneradores en un parque eólico la primera fila se coloca perpendicular a la dirección predominante del viento, en este caso estos aerogeneradores no se ven afectados por el efecto estela. Ya en la segunda fila si existe un efecto estela el cual provoca una disminución de la producción anual de energía y cuyo valor recomendado por la Asociación Danesa de Industria Eólica es por debajo del 5%.

3. Regiones del efecto estela

Las estelas de los aerogeneradores se clasifican en dos tipos según las pérdidas de potencia y carga, que son la estela cercana y estela lejana.

3.1 Estela Cercana

Cuando el viento se aproxima al aerogenerador, su velocidad decrece y la presión aumenta. Al cruzar el rotor se produce un descenso brusco de la presión. En la región inmediatamente posterior del rotor aparecen defectos de presión y velocidad no uniformes espacialmente, así como una componente azimuthal de velocidad, en ese momento se presenta la estela cercana (Álvaro, 2007).

La Estela cercana será influenciada por la carga aerodinámica y las características del perfil, provocando que afecte también a la estela lejana (Colman et al., 2013)

El estudio de la estela turbulenta cercana a un perfil nos muestra la configuración del flujo en esas condiciones y los mecanismos de inicio de generación de vórtices y desprendimientos (Marañón Di Leo et al., 2014).

La turbulencia que se genera es provocada por los efectos de cortadura que se generan de las aspas al interactuar con el viento.

En la Fig. 2 se muestra el viento incidente antes del rotor (U_o) y la expansión del área después del rotor (A_{sombra}) que se genera después del efecto de corte por las aspas hacia el viento.

La región de la estela cercana se extiende hasta un diámetro aguas abajo del rotor, como se muestra en la Fig. 2.

La región de la estela cercana se caracteriza por el déficit de velocidad máxima y una fuerte cizalladura en los límites exteriores de la estela (Uchida y Gagnon, 2022)

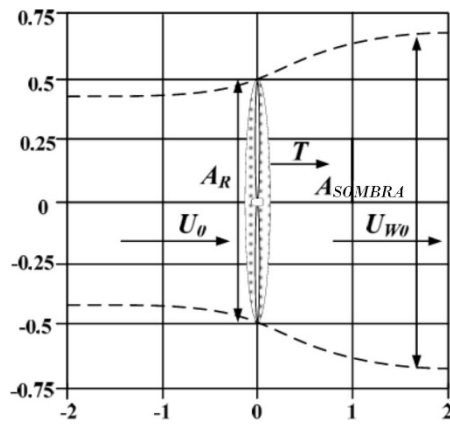


Fig. 2 Efecto Estela alrededor del rotor de un aerogenerador. Región de Estela Cercano. Fuente: Méndez et al. (2010).

3.2 Estela Lejana

La estela lejana se da a una distancia entre dos y cinco diámetros, cuando la capa de cortadura ha alcanzado el eje de la estela, dando comienzo a la región de la estela lejana y se extiende hasta que el déficit de velocidad es mínimo (García, 2017).

En la Fig. 3 se muestra las regiones de la estela y como se comporta el viento en cada región.

La estela lejana se caracteriza por el déficit mínimo de velocidad y una cizalladura en forma gaussiana de la distribución de la estela.

En el caso de la estela lejana se aplica un volumen de control en forma de cilindro alineado con la dirección del viento (U_0), ver Fig. 4, dicho cilindro tiene todos los aerogeneradores en estudio y debe ser lo suficientemente amplio para que el déficit de velocidad en la dirección del viento sea muy pequeño en la superficie cilíndrica (Méndez et al., 2010).

En la Fig. 4 se muestra la suma total del viento que deja cada estela y se representa con $U_w(y, z)$.

4. Clasificación de los modelos del efecto estela

Debido a la importancia que representa el efecto estela en los parques eólicos se han realizado varios estudios, y se han desarrollado varios modelos. Los modelos de estela se utilizan para determinar el perfil vertical del viento a sotavento del aerogenerador.

Según Shakoor (2016) se establecen que los modelos de estela se pueden dividir en dos clasificaciones las cuales corresponden al modelo analítico y al modelo computacional de campo bidimensional.

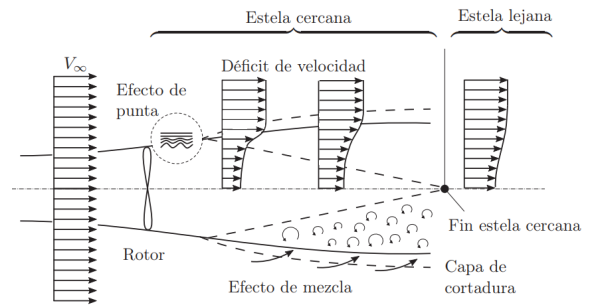


Fig. 3 Déficit de velocidad en la estela de un aerogenerador. Fuente: García Regodeseves, P. (2017).

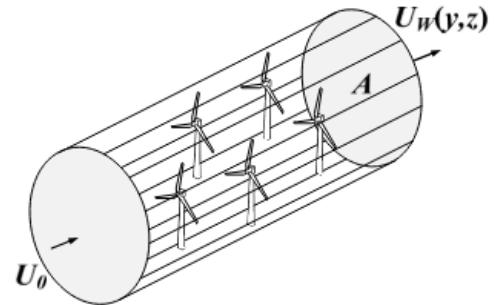


Fig. 4 Volumen de control cilíndrico alrededor de un conjunto de aerogeneradores. Fuente: Méndez et al. (2010).

4.1 Modelo Analítico

Los modelos analíticos están fundamentados en perfiles de déficit de velocidad que presentan autosimilitud en su comportamiento, estos modelos no consideran la expansión inicial de la estela y únicamente utilizan la ecuación de conservación de momento o masa para modelar de esta manera el déficit de velocidad en la parte posterior de la turbina (Gallo Campos, 2022) la necesidad de resolver las ecuaciones diferenciales del fluido-dinámica.

Se han planteado diferentes modelos de este tipo, que se diferencian en las hipótesis planteadas para la representación del rotor. Estos modelos en general tienen validez en la estela del aerogenerador que la produce y se pueden utilizar para generar las condiciones de entrada aerogeneradores aguas abajo (Lazzari y Otero, 2018).

Algunos modelos analíticos propuestos son: el modelo de Jensen (Jensen, 1983) y el modelo Frandsen (Frandsen et al, 2006). En teoría lo que han realizado los distintos modelos es describir el déficit del viento generado por el aerogenerador. El déficit normalizado viene dado por la diferencia entre el viento aguas arriba u y el viento en la estela U_w dividido por el viento aguas arriba (Lazzari y Otero, 2018).

$$\frac{\Delta u}{u_{\infty}} = \frac{u_{\infty} - u_w}{u_{\infty}} \quad (1)$$

4.2 Modelo Computacional de campo bidimensional

Este tipo de modelo se basa en asumir que la estela posee una simetría axial, lo que como resultado permite reducir el costo computacional ya que se reduce el número de ecuaciones a solucionar simultáneamente. Según Ainslie (1988) propuso este tipo de modelo inicialmente.

Los modelos computacionales calculan el comportamiento por medio de las ecuaciones de Navier Stokes promediados en el tiempo para flujo incompresible con cierre de viscosidad de remolino o Eddy Viscosity en inglés (Gallo Campos, 2022).

5. Estudio del efecto estela en un parque eólico

En la Universidad del Istmo campus Juchitán ubicada en la carretera Juchitán, La Ventosa, Oaxaca, México se realizó un emplazamiento eólico considerando las pérdidas del efecto estela con un rango menor que el 5 %.

Se realizó un proceso de distribución iterativa en el sitio de estudio para conocer la producción energética neta del sistema; dando como resultado que entre mayor distancia de separación entre filas y columnas de aerogeneradores menor era el número de aerogeneradores emplazados, afectando a la producción de energía del sistema, pero disminuyendo el porcentaje de efecto estela.

La configuración donde la separación entre columnas es de tres veces el diámetro del rotor y 7 veces el diámetro del rotor entre filas (3D-7D) fue la configuración con un porcentaje de efecto estela del 3.7 %, la producción de energía bruta del parque eólico se encontraba en el orden de los 57.8 GWh, obteniéndose una producción de energía anual neta de 53.7 GWh.

Conclusiones

Este artículo tuvo como objetivo definir el efecto estela en los aerogeneradores, así como las regiones en las que se produce y presentar la clasificación de los modelos para estudiar el efecto estela, el cual se logró

empleando algunas definiciones, imágenes de apoyo y literatura de complemento. Dando como resultado los siguientes puntos.

El efecto estela es la turbulencia que se presenta cuando el flujo natural viento interactúa con las aspas del aerogenerador, por ello se el efecto estela se divide en dos regiones; la primera región (estela cercana) se encuentra casi inmediato detrás del rotor, el estudio del efecto estela permite mejorar los diseños de las aspas; la segunda región llamada estela lejana se encuentra a una distancia de dos veces el diámetro (2D) del rotor y como siempre afecta negativamente en la producción de energía, por ello se han desarrollado modelos para estudiar el comportamiento del efecto estela.

La clasificación de modelos se divide en modelos analíticos los cuales se basan en caracterizar la estela a través de conservación de la masa y modelos computacionales en el que se obtiene el campo de velocidad de la estela mediante ecuaciones de flujo.

Con la ayuda de estos modelos nos permiten conocer el comportamiento del efecto estela y con ello lograr emplazar los aerogeneradores para que estos no se vean afectados en la producción de energía y en daños estructurales en los componentes de los aerogeneradores.

Referencias

- Heal, G. (2009). The economics of renewable energy.
- Alonso, A. A., & Beltrán, Y. M. G. (2021). Diagnóstico y riesgos de la energía eólica en México. *Revista de Geografía Agrícola*, (67), 27-45.
- Méndez, C., González-Longatt, F., Gavorskis, E., & Ravelo, O. (2010). Evaluación del efecto de la estela en el desempeño de un parque eólico. UNEFA, Bolivia.
- Jain, P., Shashaani, S., & Byon, E. (2023). Wake effect parameter calibration with large-scale field operational data using stochastic optimization. *Applied Energy*, 347, 121426.
- Brower, M. C. (2012) Wind Resource Assessment: A Practical Guide to Developing a Wind Project. En John Wiley & Sons.
- Méndez, C., González-Longatt, F., Gavorskis, E., & Ravelo, O. (2010). Evaluación del efecto de la estela en el desempeño de un parque eólico. UNEFA, Bolivia.
- Álvaro, Á. J. (2007). Caracterización numérica de la turbulencia en la estela de una aeroturbina mediante un modelo

- de simulación de grandes escalas (Doctoral dissertation, Universidad Politécnica de Madrid).
- Colman Lerner, J. L., Delnero, J. S., Marañón Di Leo, J., García Saíenz, M. O., Alasia, G., Ortiz, P. M., & Garnica, A. (2013). Análisis del patrón de flujo en la estela de un perfil aerodinámico con sistema activo de control de flujo. In II Jornadas de Investigación y Transferencia de la Facultad de Ingeniería Universidad Nacional de La Plata.
- Marañón Di Leo, J., Delnero, J. S., García Saíenz, M. O., & Capittini, G. (2014). Análisis de la estela turbulenta de un perfil aerodinámico con sistema activo de control de flujo. In III Congreso Argentino de Ingeniería Aeronáutica (CAIA 3)(La Plata 2014).
- Uchida, T., & Gagnon, Y. (2022). Effects of continuously changing inlet wind direction on near-to-far wake characteristics behind wind turbines over flat terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 220, 104869.
- García Regodeseves, P. (2017). Estudio integral del flujo en la turbina y la estela de aerogeneradores experimentales.
- Shakoor, R., Hassan, MY, Raheem, A. y Wu, YK (2016). Modelado del efecto de estela: una revisión de la optimización del diseño de parques eólicos utilizando el modelo de Jensen. *Reseñas de energías renovables y sostenibles*, 58, 1048-1059.
- Gallo Campos, A. F. (2022). Modelamiento de parques eólicos offshore de gran tamaño.
- Lazzari, F., & Otero, A. (2018). Simulación mediante modelos analíticos de estela en parques eólicos y validación con mediciones del parque eólico Rawson. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 22, 47-56.
- Jensen, N. O. (1983). A note on wind generator interaction. *Risø National Laboratory*.
- Frandsen, S., Barthelmie, R., Pryor, S., Rathmann, O., Larsen, S., Højstrup, J., & Thøgersen, M. (2006). Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore wind farms. *Wind Energy: An International Journal for Progress and Applications in Wind Power Conversion Technology*, 9(1-2), 39-53.
- Ainslie, J. F. (1988). Calculating the flowfield in the wake of wind turbines. *Journal of wind engineering and Industrial Aerodynamics*, 27(1-3), 213-224.

Fotocatálisis heterogénea: una alternativa ante la contaminación de aguas residuales

Jesús Ignacio Toledo Díaz
Fernando Morales Anzures
Pastora Salinas Hernández*

¹ Instituto de Estudios de la Energía
Universidad del Istmo

Correspondencia:
*salinashp@yahoo.com.mx

Palabras Clave:

Fotocatálisis, Degradación,
Fotocatalizador

RESUMEN

Hoy en día, uno de los métodos más efectivos para la degradación de contaminantes orgánicos producidos por las grandes industrias es la fotocatálisis. Este método ha demostrado una alta eficiencia en la degradación de contaminantes y, además, es muy económico, ya que puede utilizar la luz solar como fuente de energía. En la fotocatálisis se emplea un semiconductor llamado fotocatalizador, que, al ser irradiado con luz visible o ultravioleta, genera pares electrón-hueco. Estos pares provocan reacciones de reducción y oxidación (redox), produciendo radicales hidroxilo (*OH), los cuales atacan y degradan las moléculas orgánicas. Aunque la fotocatálisis es un método muy utilizado, es importante considerar que existen variables que afectan su eficiencia. Por ejemplo, un mayor tiempo de reacción generalmente conduce a una mayor degradación de los contaminantes. Sin embargo, llega un punto en el que la degradación adicional no es significativa, lo que hace necesario optimizar el tiempo de reacción. Por esta razón, es crucial comprender cómo todas las variables influyen en el sistema para lograr una degradación óptima.

ABSTRACT

Nowadays, one of the most effective methods for the degradation of organic pollutants produced by large industries is photocatalysis. This method has demonstrated high efficiency in the degradation of pollutants and is also very economical, since it can use sunlight as an energy source. Photocatalysis uses a semiconductor called a photocatalyst, which, when irradiated with visible or ultraviolet light, generates electron-hole pairs. These pairs cause reduction and oxidation (redox) reactions, producing hydroxyl radicals (*OH), which attack and degrade organic molecules. Although photocatalysis is a widely used method, it is important to consider that there are variables that affect its efficiency. For example, a longer reaction time generally leads to greater degradation of pollutants. However, there comes a point where the additional degradation is not significant, making it necessary to optimize the reaction time. For this reason, it is crucial to understand how all variables influence the system to achieve optimal degradation.

1. Introducción

Hoy en día, la contaminación de los compuestos orgánicos representa un grave problema ambiental. La mayoría de los procesos químicos industriales desechan sus residuos en mares y ríos, lo que resulta en una significativa contaminación de las aguas (Kesari et al., 2021). Este fenómeno no solo afecta al medio ambiente, sino que también pone en riesgo la salud humana. La exposición a aguas contaminadas puede causar diversas enfermedades graves, como irritación de ojos y piel, daños en el hígado y los riñones, y en casos extremos, cáncer y muerte (Al-Nuaim et al., 2023).

Para abordar esta situación crítica, los seres humanos han desarrollado nuevas técnicas para la

degradación de contaminantes. Métodos como el tratamiento biológico y el uso de carbón activado han sido explorados. Sin embargo, estos métodos presentan desventajas significativas. El tratamiento biológico puede ser costoso, mientras que el carbón activado no degrada los contaminantes, sino que los cambia de fase, a veces convirtiéndolos en compuestos aún más peligrosos (Heidarinejad et al., 2020; Zeng et al., 2023). Ante estas limitaciones, se han desarrollado métodos más avanzados, como los Procesos de Oxidación Avanzada (POA). Dentro de estos, la fotocatálisis destaca por sus numerosas ventajas. Este proceso ha demostrado ser altamente eficaz en la degradación de contaminantes orgánicos, logrando altos porcentajes de eliminación. Además, es un método económico,

ya que puede funcionar con energía solar o mediante simulación solar (Liu et al., 2020).

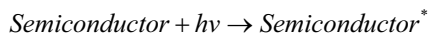
La fotocatalisis es un proceso en el cual un fotocatalizador, comúnmente un semiconductor como el dióxido de titanio (TiO_2), absorbe luz ultravioleta o visible. Esta absorción genera pares de electrones y huecos, que reaccionan con el agua y el oxígeno presentes para producir radicales libres altamente reactivos, como el radical hidroxilo ($\bullet\text{OH}$). Estos radicales son capaces de oxidar y descomponer compuestos orgánicos contaminantes, transformándolos en sustancias menos perjudiciales, como dióxido de carbono y agua (André Fernandes, Patrycja Makos, Zhaohui Wang, 2019). A pesar de ser un proceso excelente, la fotocatalisis depende de ciertas variables para alcanzar una mayor degradación de contaminantes orgánicos. Factores como el tiempo de reacción, la temperatura, el porcentaje de catalizador, el pH inicial y la concentración inicial del contaminante orgánico son cruciales. Una mala elección de estas variables puede aumentar la recombinación de los pares electrón-hueco, reduciendo así la eficiencia del proceso de degradación (Schiavello, 1995).

El problema de la contaminación de las aguas residuales ha ido en aumento en los últimos tiempos, y por ello, es necesario buscar soluciones efectivas para resolverlo. En este estudio, se abordan aspectos esenciales para entender el funcionamiento básico de la fotocatalisis, con el objetivo de lograr una fotodegradación más rápida y eficiente.

2. ¿Qué es la fotocatalisis heterogénea?

La fotocatalisis heterogénea es un proceso químico avanzado (POA) que utiliza materiales semiconductores para catalizar reacciones químicas mediante la absorción de luz solar (Su et al., 2024). Estos materiales pueden estar disueltos en la solución acuosa o estar adheridos a una superficie. Se basa en la generación de pares electrón-hueco en la superficie del semiconductor cuando este es irradiado con fotones de luz. Estos pares electrón-hueco son capaces de participar en reacciones redox con compuestos químicos presentes en el medio ambiente, lo que lleva a la degradación o transformación de los contaminantes (X. Li et al., 2021; Yang & Wang, 2018).

El proceso puede describirse mediante la siguiente ecuación de reacción simplificada:



Donde:

$h\nu$ representa la energía de un fotón de luz incidente.

Semiconductor^* denota la formación de un estado excitado del semiconductor.

Una vez que el semiconductor se excita, los electrones son promovidos desde el nivel de energía de valencia (VB) al nivel de energía de conducción (CB), creando así un par electrón-hueco (Malayeri et al., 2021) ideal plug flow model and axially dispersed plug flow model (dispersion model). Esta excitación puede describirse utilizando la ecuación de Beer-Lambert, que relaciona la intensidad de la luz absorbida (I) con la concentración del semiconductor (c) y la longitud del camino óptico (L):

$$I = I_0 * e^{-\alpha cL}$$

Donde:

I_0 es la intensidad de la luz incidente.

α es el coeficiente de absorción del material.

Los electrones y los huecos generados pueden migrar a la interfaz semiconductor-solución, donde interactúan con contaminantes presentes en el medio. Los electrones pueden reducir especies químicas, mientras que los huecos pueden oxidarlas. Esta interacción conduce a la mineralización o transformación de los contaminantes orgánicos en productos menos tóxicos (Ramos-Huerta et al., 2021).

2.1 Funcionamiento de la fotocatalisis

Cuando un catalizador semiconductor (SC) de tipo calcogenuro, como los óxidos (TiO_2 , ZnO , ZrO_2 , CeO_2 , etc.) o sulfuros (CdS , ZnS , etc.), es expuesto a fotones cuya energía es igual o mayor a su banda prohibida ($h\nu \geq E_G$), estos fotones son absorbidos, generando pares de electrones y huecos. Estos pares se separan en electrones en la banda de conducción y huecos en la banda de valencia (ver Fig. 1). Al mismo tiempo, en presencia de una fase fluida (ya sea gaseosa o líquida), ocurre una adsorción espontánea. Dependiendo del potencial redox o nivel de energía de cada adsorbato, se produce una transferencia de

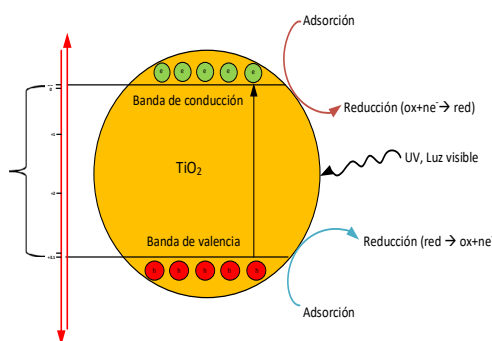
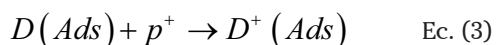
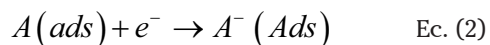
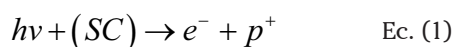


Fig. 1 Fotocatálisis heterogénea.

electrones hacia las moléculasceptoras, mientras que los huecos positivos se transfieren a las moléculas donantes (esto implica una transferencia de un electrón del donante al sólido) (Vikrant et al., 2019; Water et al., 2023).

Los iones formados reaccionan posteriormente para generar intermediarios y productos finales. Como resultado de las reacciones (1-3), la excitación del catalizador mediante fotones es el paso inicial en la activación del sistema catalítico completo. Por lo tanto, el fotón activo debe considerarse un reactivo, y el flujo de fotones se puede ver como una fase fluida especial llamada “fase electromagnética”. La energía del fotón se ajusta para ser absorbida por el catalizador, no por los reactivos. La activación del proceso se lleva a cabo a través de la excitación del sólido, no de los reactivos, lo que indica que no hay un proceso fotoquímico en la fase adsorbida, sino un verdadero régimen fotocatalítico heterogéneo, como se demostrará más adelante (Leu & Zhang, 2007).



3. Pasos fundamentales de la fotocatalisis

La fotocatalisis heterogénea es un proceso versátil que puede llevarse a cabo en diversos entornos, ya sea en fase gaseosa, fases líquidas orgánicas puras o soluciones acuosas. Este método implica una serie de cinco pasos fundamentales que descomponen el



Fig. 2 Pasos fundamentales de la fotocatalisis.

proceso general en etapas independientes, cada una crucial para el éxito de la reacción:

1. Transferencia de los reactivos a la superficie:

En este proceso, los reactivos presentes en la fase fluida, ya sea en forma gaseosa o líquida, deben migrar hacia la superficie del catalizador. Esta transferencia puede estar influenciada por factores como la difusión molecular, la concentración de reactivos en la fase fluida y las características superficiales del catalizador. Además, las propiedades del material catalítico, como su área superficial y su estructura porosa, pueden influir en la eficiencia de este paso al proporcionar sitios de adsorción adecuados para los reactivos (Z. Li et al., 2017).

2. Adsorción de al menos uno de los reactivos:

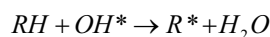
La adsorción es un proceso en el cual los reactivos se unen físicamente a los sitios activos del catalizador a través de fuerzas intermoleculares, como enlaces de van der Waals o interacciones electrostáticas. Esta adsorción es crucial para concentrar los reactivos en la superficie del catalizador, lo que aumenta la probabilidad de que ocurran colisiones entre las moléculas de los reactivos y, por lo tanto, facilita la reacción química. La naturaleza y la fuerza de la adsorción pueden variar según el tipo de reactivos y el catalizador utilizado, y pueden influir en la cinética y la selectividad de la reacción (Yu et al., 2016).

3. Reacción en la fase adsorbida:

Durante esta etapa, los radicales hidroxilo ($\bullet\text{OH}$) se generan a partir de la interacción entre las especies excitadas del catalizador y el agua o los grupos hidroxilo

presentes en la superficie del catalizador o en la solución circundante. La energía fotónica absorbida por el catalizador promueve la formación de estas especies activas o excitadas, que desencadenan la ruptura de enlaces químicos y la formación de nuevos productos.

En este paso la degradación de contaminantes orgánicos se puede llevar por la oxidación (Ec. 3), debido a que un contaminante orgánico (RH) se oxida mediante la acción de los radicales hidroxilo (OH^*), produciendo un radical orgánico (R^*) y agua (H_2O). Este radical orgánico puede continuar reaccionando con otros reactivos o especies en la superficie del catalizador para formar productos degradados más simples (Zhang & Jaroniec, 2020).



4. Desorción del/de los producto(s): Una vez que se han formado los productos de la reacción en la superficie del catalizador, es necesario que se desprendan de la misma para permitir la continuación de la reacción. Este proceso implica la ruptura de los enlaces entre los productos y los sitios activos del catalizador, y su liberación hacia la fase fluida circundante. La eficiencia de este paso puede verse afectada por factores como la fuerza de adsorción de los productos y la temperatura del sistema (Karoui et al., n.d.).

5. Eliminación de los productos de la región de interfaz: Una vez que los productos se han desorbido de la superficie del catalizador, es necesario eliminarlos de la región de reacción para evitar su acumulación y garantizar la continuidad del proceso. La eliminación de los productos puede implicar su difusión hacia la fase fluida circundante, su extracción física del sistema o su conversión en productos secundarios menos reactivos. En sistemas acuosos, por ejemplo, los productos pueden ser eliminados mediante técnicas de separación como la filtración, la centrifugación o la evaporación. En sistemas gaseosos, los productos pueden ser eliminados mediante la purga del sistema con un gas inerte o mediante técnicas de absorción o adsorción en materiales específicos (Karoui et al., n.d.).

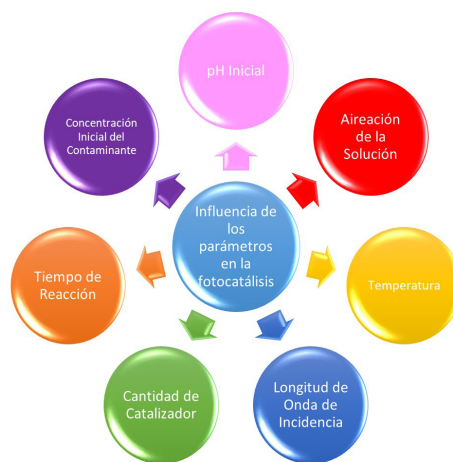


Fig. 3 Influencia de los parámetros en la fotocatalisis.

4. Influencia de los parámetros en la fotocatalisis heterogénea

La eficiencia de la fotocatalisis heterogénea está influenciada por una variedad de parámetros, cada uno de los cuales juega un papel crucial en la optimización del proceso. A continuación, se describe cómo algunos de los principales parámetros afectan esta técnica:

pH Inicial: El pH inicial de la solución es un factor determinante en la fotocatalisis heterogénea. Influye en la carga superficial del catalizador y en la ionización de los contaminantes. Un pH adecuado puede aumentar la adsorción de los contaminantes en la superficie del catalizador y mejorar la generación de especies reactivas de oxígeno, aumentando así la eficiencia del proceso (Gherbi et al., 2022).

Concentración Inicial del Contaminante: La concentración inicial del contaminante afecta la velocidad de degradación fotocatalítica. A bajas concentraciones, la degradación suele seguir una cinética de primer orden. Sin embargo, a concentraciones más altas, la superficie del catalizador puede saturarse, reduciendo la tasa de degradación y haciendo necesario un tiempo de reacción más prolongado (Mazierski et al., 2016).

Tiempo de Reacción: El tiempo de reacción es fundamental para lograr la completa degradación de los contaminantes. Un tiempo insuficiente puede resultar en una degradación parcial, mientras que un tiempo excesivo podría no ser eficiente en términos de energía y costos operativos. Por lo tanto, es esencial encontrar un equilibrio para maximizar la eficiencia del proceso (Manoharan & Mohammed, 2019).

Cantidad de Catalizador: La cantidad de catalizador utilizado impacta directamente la superficie disponible para la adsorción y la reacción de los contaminantes. Una cantidad óptima de catalizador maximiza la eficiencia de degradación. Sin embargo, un exceso de catalizador puede llevar a la aglomeración de partículas, reduciendo la superficie activa y la eficiencia fotocatalítica (Heveline Enzweiler, Patricia H. Yassue-Cordeiro, Marcio Schwaab, Elisa Barbosa-Coutinho, Mara Heloisa N. Olsen Scaliante, 2019).

Longitud de Onda de Incidencia: La longitud de onda de la luz incidente es crucial, ya que debe coincidir con la banda prohibida del catalizador para excitar los electrones. Los catalizadores como el TiO₂ se activan bajo luz ultravioleta, mientras que otros catalizadores pueden responder a la luz visible. La selección de la fuente de luz adecuada es esencial para optimizar la eficiencia fotocatalítica (Heredia et al., 2023).

Temperatura: La temperatura puede afectar la velocidad de las reacciones fotocatalíticas. En general, un aumento moderado de la temperatura puede mejorar la movilidad de los electrones y huecos, aumentando la tasa de reacción. Sin embargo, temperaturas demasiado altas pueden provocar la recombinación de electrones y huecos, reduciendo la eficiencia del proceso (Meng et al., 2018).

Aireación de la Solución: La aireación o la presencia de oxígeno en la solución es vital para la fotocatálisis heterogénea, ya que el oxígeno actúa como aceptor de electrones, ayudando a generar especies reactivas de oxígeno que participan en la degradación de contaminantes. Una buena aireación asegura un suministro adecuado de oxígeno, mejorando la eficiencia del proceso (Rojviroon & Rojviroon, 2022).

5. Aplicación de la fotocatálisis Heterogénea

La fotocatálisis heterogénea es utilizada fundamentalmente para degradar compuestos orgánicos presentes en las aguas residuales. Entre los compuestos más comúnmente degradados se encuentran los compuestos fenólicos, debido a que estos contaminantes pueden causar serios problemas de salud humana, como irritación ocular y cutánea, problemas renales y pulmonares, e incluso cáncer. Otro grupo de contaminantes que se están degradando actualmente son

los fármacos. Esto se debe a que se ha observado que las aguas residuales están contaminadas con ciertos medicamentos, ya que los seres humanos no absorben el 100 % de los fármacos ingeridos, sino que una parte de estos se excreta a través de la orina y el sudor, llegando finalmente a las aguas residuales.

Ante estas problemáticas, se han desarrollado nuevos fotocatalizadores heterogéneos para degradar distintos contaminantes. Entre los fotocatalizadores más utilizados se encuentran el dióxido de titanio (TiO₂) y el óxido de zinc (ZnO). Estos materiales se están dopando con otros elementos para mejorar su eficiencia y reducir el tiempo necesario para la degradación de los contaminantes. A continuación, se presentan los resultados de la degradación de distintos contaminantes orgánicos utilizando diferentes fotocatalizadores en el proceso de fotocatálisis heterogénea (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados de la degradación de compuestos orgánicos.

| Fotocatalizador | Contaminante | % de degradación |
|--|-------------------|------------------|
| Degradación De Contaminantes Fenólicos | | |
| ZnAl (Portillo-vélez et al., 2024) | Fenol | 68 |
| TiO ₂ /SiO ₂ (Eddy et al., 2021) | Fenol | 96.05 |
| TiO ₂ /Ni (Limón-Rocha et al., 2022) | 2,4-DCP | 90.3 |
| ZnO/S O ₄ ⁻ (A. E. Rodríguez-Mata et al., 2018) | 2,4-D | 82.3 |
| Degradación De Fármacos | | |
| TiO ₂ (Dufner, 2024) | Paracetamol | 75.1 |
| PES-ZnO (Chijiokere et al., 2022) | Paracetamol | 92 |
| BiVO ₄ (Maximenko et al., 2024) | Naproxeno | 98.2 |
| TiO ₂ /CaTiO ₃ /Cu ₂ O (Tanos et al., 2024) | Peroximonosulfato | 96 |

Conclusiones

A pesar que la fotocatálisis es uno de los mejores métodos para la degradación de los contaminantes orgánicos, esta presenta ciertas variables que los afectan por ende es crucial saber cómo afecta cada una de ellas, por lo que se encontró que a media que se incrementa la dosis del fotocatalizador llegará un momento que se sobresature, por lo que no dejará entrar la luz solar, por lo que no se van a crear pares

electrón hueco y no se va a poder degradar la molécula, en cambio también es necesario saber que longitud de onda se le va a incidir a la solución del contaminante y esto va implícito el fotocatalizador, ya que debemos de saber cuál es la brecha de energía del material que se está utilizando, debido a que si la longitud de onda es mayor a la de la brecha, este no será capaz de generar las reacciones redox, las cuales son capaces de degradar la molécula, por lo que es necesario optimizar estas variables en el sistema, para esto será necesario utilizar un diseño de experimentos para entender cuál de las variables tienen una mayor influencia.

Referencias

- A. E. Rodríguez-Mata, F. J. T., Amabilis-Sosaa, L. E., & , I. Díaz-Peña , Y. Bustos-Terrones, and J. G. R.-P. (2018). Characterization of SO₄ / ZnO and Photodegradation Kinetics of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid (2,4-D). *Kinetics and Catalysis*, 59(6), 720–726. <https://doi.org/10.1134/S0023158418060125>
- Al-Nuaim, M. A., Alwasiti, A. A., & Shnain, Z. Y. (2023). The photocatalytic process in the treatment of polluted water. *Chemical Papers*, 77(2), 677–701. <https://doi.org/10.1007/s11696-022-02468-7>
- André Fernandes, Patrycja Makos, Zhaohui Wang, G. B. (2019). Synergistic Effect Of TiO₂ Photocatalytic Advanced Oxidation Processes In The Treatment Of Refinery Effluents. *Chemical Engineering Journal*, 123488. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123488>
- Chijioke-okere, M., Chijioke-okere, M., Halim, A., Adlan, Z., & Hir, M. (2022). Efficient photodegradation of paracetamol by integrated PES-ZnO photocatalyst sheets Efficient photodegradation of paracetamol by integrated PES-ZnO photocatalyst sheets. *Inorganic Chemistry Communications*, 148(December), 110377. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2022.110377>
- Dufner, L. (2024). Photocatalytic degradation of paracetamol on immobilized TiO₂ in a low-tech reactor by solar light for water treatment. *Open Ceramics*, 18(April), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100599>
- Eddy, D. R., Ishmah, S. N., Permana, M. D., Firdaus, M. L., Rahayu, I., El-badry, Y. A., Hussein, E. E., & El-bahy, Z. M. (2021). applied sciences Photocatalytic Phenol Degradation by Silica-Modified Titanium Dioxide.
- Gherbi, B., Laouini, S. E., Meneceur, S., Bouafia, A., Hemmam, H., Tedjani, M. L., Thiripuranathar, G., Barhoum, A., & Mena, F. (2022). Effect of pH Value on the Bandgap Energy and Particles Size for Biosynthesis of ZnO Nanoparticles : Efficiency for Photocatalytic Adsorption of Methyl Orange. *Sustainability*.
- Heidarinejad, Z., Dehghani, M. H., Heidari, M., Javedan, G., Ali, I., & Sillanpää, M. (2020). Methods for preparation and activation of activated carbon: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 18(2), 393–415. <https://doi.org/10.1007/s10311-019-00955-0>
- Heredia, S. A., Wols, B. A., Yntema, D. R., & Lammertink, R. G. H. (2023). Photocatalytic ceramic membrane : Effect of the illumination intensity and distribution. *Journal of Photochemistry & Photobiology, A: Chemistry*, 437(December 2022), 114469. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.114469>
- Heveline Enzweiler, Patricia H. Yassue-Cordeiro, Marcio Schwaab, Elisa Barbosa-Coutinho, Mara Heloisa N. Olsen Scaliante, N. R. C. F. (2019). Catalyst concentration, ethanol content and initial pH effects on hydrogen production by photocatalytic water splitting. *Journal Photochemistry and Photobiology*. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.112051>
- Karoui, S., Ben, R., Ghorbal, A., & Amrane, A. (n.d.). Innovative sequential combination of fixed bed adsorption / desorption and photocatalysis cost-effective process to remove antibiotics in solution.
- Kesari, K. K., Soni, R., Jamal, Q. M. S., Tripathi, P., Lal, J. A., Jha, N. K., Siddiqui, M. H., Kumar, P., Tripathi, V., & Ruokolainen, J. (2021). Wastewater Treatment and Reuse: a Review of its Applications and Health Implications. *Water Air Soil Pollut*, 232: 208. <https://sci-hub.se/https://doi.org/10.1007/s11270-021-05154-8>
- Leu, M. C., & Zhang, W. (2007). Interactive sketch-based digital prototyping by using the level-set method. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 3, 257–264. <https://doi.org/10.1115/IMECE200743738>
- Li, X., Wang, W., Dong, F., Zhang, Z., Han, L., Luo, X., Huang, J., Feng, Z., Chen, Z., Jia, G., & Zhang, T. (2021). Recent Advances in Noncontact External-Field-Assisted Photocatalysis: From Fundamentals to Applications. *ACS Catalysis*, 11(8), 4739–4769. <https://doi.org/10.1021/acscatal.0c05354>
- Li, Z., Tian, B., Zhen, W., Wu, Y., & Lu, G. (2017). Environmental Inhibition of hydrogen and oxygen recombination using oxygen transfer reagent hemin chloride in Pt / TiO₂ dispersion for photocatalytic hydrogen generation. "Applied Catalysis B, Environmental," 203, 408–415. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.10.049>
- Limón-Rocha, I., Marizcal-Barba, A., Guzmán-González, C. A., Anaya-Esparza, L. M., Ghotekar, S., González-Vargas, O. A., & Pérez-Larios, A. (2022). Co, Cu, Fe, and Ni Deposited over TiO₂ and Their Photocatalytic Activity in

- the Degradation of 2,4-Dichlorophenol and 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid. *Inorganics*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/inorganics10100157>
- Liu, H., Wang, C., & Wang, G. (2020). Photocatalytic Advanced Oxidation Processes for Water Treatment: Recent Advances and Perspective. *Chemistry - An Asian Journal*, 15(20), 3239–3253. <https://doi.org/10.1002/asia.202000895>
- Malayeri, M., Haghighat, F., & Lee, C. S. (2021). Kinetic modeling of the photocatalytic degradation of methyl ethyl ketone in air for a continuous-flow reactor. *Chemical Engineering Journal*, 404(May 2020), 126602. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126602>
- Manoharan, P. V. C., & Mohammed, B. S. (2019). Effect of reaction time on structural , morphological , optical and photocatalytic properties of copper oxide (CuO) nanostructures. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 0(0), 0. <https://doi.org/10.1007/s10854-019-00928-7>
- Maximenko, A., Szkudlarek, A., Sikora, K., Kowalki, M., & Zieli, A. (2024). Addressing challenges of BiVO₄ light-harvesting ability through vanadium precursor engineering and sub-nanoclusters deposition for peroxymonosulfate-assisted photocatalytic pharmaceuticals removal. *Separation and Purification Technology*, 351(April). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.127643>
- Mazierski, P., Nadolna, J., Lisowski, W., & Winiarski, M. J. (2016). Effect of irradiation intensity and initial pollutant concentration on gas phase photocatalytic activity of TiO₂ nanotube arrays. *Catalysis Today*. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2016.09.004>
- Meng, F., Liu, Y., Wang, J., Tan, X., Sun, H., Liu, S., & Wang, S. (2018). Temperature dependent photocatalysis of g-C₃N₄, TiO₂ and ZnO: differences in photoactive mechanism. *Journal of Colloid And Interface Science*. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.07.131>
- Portillo-vélez, N. S., Velásquez-torres, M. E., & Pérez-hernández, R. (2024). Boosted Photocatalytic Activity of Zn / Al-Based Layered Double Hydroxides Through Cobalt Incorporation for Phenol Degradation. 202304860, 1–8. <https://doi.org/10.1002/slct.202304860>
- Ramos-Huerta, L. A., Valadés-Pelayo, P. J., Llanos, A. G., Ruiz, R. S., Cabello, J. J., & Castillo-Araiza, C. O. (2021). Development of a new methodology to determine suspended photocatalyst optical properties. *Chemical Engineering Journal*, 413(October). <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.127458>
- Rojviroon, O., & Rojviroon, T. (2022). Photocatalytic process augmented with micro / nano bubble aeration for enhanced degradation of synthetic dyes in wastewater. *Water Resources and Industry*, 27(December 2021), 100169. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2021.100169>
- Schiavello, V. A. V. L. L. P. M. (1995). Performance of Heterogeneous Photocatalytic Systems: Influence of Operational Variables on Photoactivity of Aqueous Suspension of TiO₂. *Journal of Catalysis*, 32–40. <https://doi.org/doi:10.1006/jcat.1995.1105>
- Su, R., Zhu, Y., Gao, B., & Li, Q. (2024). Progress on mechanism and efficacy of heterogeneous photocatalysis coupled oxidant activation as an advanced oxidation process for water decontamination. *Water Research*, 251(January). <https://doi.org/10.1016/j.watres.2024.121119>
- Tanos, F., Makhoul, E., Nada, A. A., Bekheet, M. F., Riedel, W., Kawrani, S., Belaid, H., Petit, E., Viter, R., Fedorenko, V., Ramanavicius, A., Boulos, M., Cornu, D., Razzouk, A., Lesage, G., Cretin, M., & Bechelany, M. (2024). Graphene oxide-induced CuO reduction in TiO₂ / CaTiO₃ / Cu₂O / Cu composites for photocatalytic degradation of drugs via peroxymonosulfate activation. *Applied Surface Science*, 656(February). <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2024.159698>
- Vikrant, K., Park, C. M., Kim, K. H., Kumar, S., & Jeon, E. C. (2019). Recent advancements in photocatalyst-based platforms for the destruction of gaseous benzene: Performance evaluation of different modes of photocatalytic operations and against adsorption techniques. *Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews*, 41, 100316. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochemrev.2019.08.003>
- Water, O., Ara, E. S., Pereira, M. F. G., Silva, G. M. G., Tavares, G. F., Oliveira, C. Y. B., & Faia, P. M. (2023). A Review on the Use of Metal Oxide-Based Nanocomposites for the Remediation of Organics-Contaminated Water via Photocatalysis: Fundamentals, Bibliometric Study and Recent Advances. *Toxics*, 11, 658.
- Yang, X., & Wang, D. (2018). Photocatalysis: From Fundamental Principles to Materials and Applications [Review-article]. *ACS Applied Energy Materials*, 1(12), 6657–6693. <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b01345>
- Yu, H., Xiao, P., Tian, J., Wang, F., & Yu, J. (2016). Phenylamine-Functionalized rGO / TiO₂ Photocatalysts : Spatially Separated Adsorption Sites and Tunable Photocatalytic Selectivity Phenylamine-Functionalized rGO / TiO₂ Photocatalysts : Spatially Separated Adsorption Sites and Tunable Photocatalytic Sele. <https://doi.org/10.1021/acsaem.8b01345>
- Zeng, G., Zhang, R., Liang, D., Wang, F., Han, Y., Luo, Y., Gao, P., Wang, Q., Wang, Q., Yu, C., Jin, L., & Sun, D. (2023). Comparison of the Advantages and Disadvantages of Algae Removal Technology and Its Development Status. *Water (Switzerland)*, 15(6). <https://doi.org/10.3390/w15061104>
- Zhang, L., & Jaroniec, M. (2020). Fundamentals of adsorption for photocatalysis. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102890-2.00002-6>

Kesteritas como capa transportadora de huecos en celdas solares de perovskita

Mildred Camacho Carlock¹
Isaac Montoya De Los Santos^{1*}
Maykel Courel²
Liliana Hechavarría-Difur¹
Hugo J. Cortina-Marrero¹

¹ Instituto de Estudios de la Energía
Universidad del Istmo

² Centro Universitario de los Valles
Universidad de Guadalajara

Correspondencia:
*isaacms88@gmail.com

Palabras Clave:
Perovskita, HTL, Kesteritas, CZTS

RESUMEN

Las celdas solares de perovskita (CSP) han ido mejorando, en poco tiempo, la eficiencia de conversión de energía más alta reportada es de 25.2 %. La capa de transporte de huecos es uno de los factores importantes para aumentar el rendimiento del dispositivo. Actualmente existen materiales transportadores de huecos (HTL) orgánicos, tales como el Spiro-OMeTAD, que ha sido bastante estudiado e investigado, pero hasta el momento la estabilidad y el proceso de síntesis siguen siendo desafíos importantes. Por ello, se estudian diferentes materiales inorgánicos como HTL, siendo las kesteritas compuestos alternativos para la capa transportadora de huecos. En este artículo se presentan las consideraciones para ser un buen HTL, así como algunas de las propiedades de las kesteritas.

ABSTRACT

Perovskite solar cells have been improving, in a short time, highest reported energy conversion efficiency is 25.2 %. The hole transport layer is one of the most important factor for increasing the performance of the device. Currently there are organic hole transporter materials (HTLs), such as Spiro-OMeTAD, which has been extensively studied and researched, but so far stability and the synthesis process remain important challenges. For this reason, different inorganic materials such as htm are studied, with kesterites being alternative compounds for the hole transport layer. This article presents the considerations of a good HTL, as well as some of the properties of kesterites.

1. Introducción

En los últimos años, las celdas solares de perovskita (CSP) son estudiadas debido a sus buenas propiedades y han tenido grandes avances en la eficiencia de conversión de energía. Este tipo de celdas se están desarrollando para ser tan buenas como las celdas solares de silicio. Sin embargo, las celdas de perovskita presentan una desventaja en la actualidad, y es su baja estabilidad, lo cual hace cuestionable para su comercialización (Oh et al., 2024).

Las capas de transporte de electrones (ETL) y de huecos (HTL) influyen en la mejora de la eficiencia y la estabilidad de las celdas. Por lo tanto, la selección de capas de transporte adecuadas es crucial para las celdas solares de perovskita. En general, una buena capa de transporte debe tener buena estabilidad hacia la PVK. Hoy en día, se estudian diferentes materiales transportadores de carga, que de acuerdo con sus propiedades se pueda obtener un mayor rendimiento (Tang et al., 2024).

Las celdas de perovskita haluro orgánicas-inorgánicas son atractivas por sus propiedades optoelectrónicas, así como la alta movilidad y larga longitud de difusión del portador de carga. En los últimos años se ha acelerado el desarrollo de las celdas solares de perovskita debido a su bajo costo de fabricación y procesos de síntesis más sencillos. Este tipo de celdas pueden ser fabricadas en dos diseños principales: arquitectura plana y arquitectura mesoporosa. El diseño del dispositivo se puede dividir en estructura regular (n-i-p) y estructura invertida (p-i-n), esto de acuerdo con la ubicación de las capas transportadoras de carga. Estas capas contribuyen sustancialmente, independientemente de la arquitectura del dispositivo (Kumar et al., 2024).

Cuando una capa de perovskita se intercala entre dos electrodos, el contacto directo de la PVK con los electrodos provocará una alta tasa de recombinación del portador de carga, cuando la luz incidente genera

electrones y huecos, y como consecuencia se reduce el rendimiento de la celda (Rabhi et al., 2024).

Por otro lado, se sabe que la PVK es afectada por la humedad y el oxígeno, ya que tiende a degradarse por el contacto con ellos. Por lo tanto, elegir el HTL adecuado ayudará a prevenir la recombinación del portador de carga y protegerá la capa de perovskita de factores externos, que de alguna otra forma podrían desencadenar la degradación. Además de la alta movilidad de los huecos, los niveles de energía del HTL deben coincidir con los contactos correspondientes para un transporte y recolección de carga eficiente. En la fabricación de las celdas solares de perovskitas de bajo costo, también se debe considerar el costo del HTL (Oh et al., 2024).

Por lo tanto, se desea presentar a las kesteritas como HTL inorgánicos en CSP, mencionando las características físicas y optoelectrónicas vitales que tienen, y como influyen en la mejora del rendimiento del dispositivo.

2. Celdas solares de perovskitas

Las celdas solares de perovskita son investigadas por su fácil fabricación y su alta eficiencia alcanzada en la actualidad. En el campo fotovoltaico, las perovskitas generalmente están constituidas a base de plomo (Pb) o estaño (Sn) y poseen buenas propiedades optoelectrónicas, tales como una buena absorción óptica, una movilidad y longitudes de difusión excelentes para ambos portadores de carga, que resultan idóneas para las aplicaciones fotovoltaicas (Njema et al., 2024).

2.1 Funcionamiento

La radiación solar se transforma en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico, el cual describe cómo funciona una celda solar.

Como se puede observar en la Figura 1, el principio de funcionamiento de la celda para generar corriente eléctrica a partir de la energía solar se basa en la absorción de los fotones y la formación del par electrón-hueco.

2.2 Configuración de la celda solar de PVK.

En la Figura 2, se ilustra la configuración general de la celda solar, consta de 5 capas, un contacto frontal, un material transportador de electrones (ETL), el mate

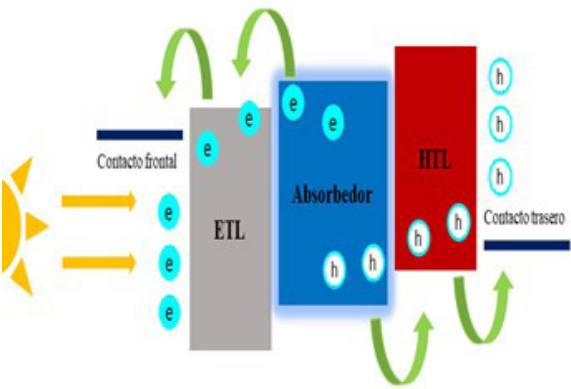


Fig. 1. Diagrama representativo del funcionamiento de una celda solar. Elaboración propia.

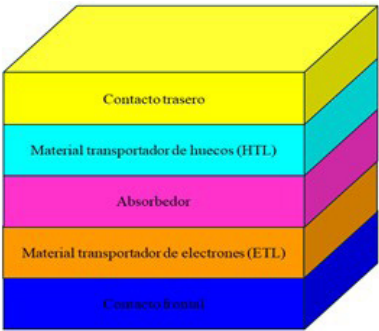


Fig. 2. Configuración de la celda. Elaboración propia.

rial absorbedor, un material transportador de huecos (HTL) y un contacto trasero.

En la Tabla 1 se mencionan algunos de los materiales más utilizados para cada capa correspondiente de la celda.

Tabla 1. Materiales más comunes para cada capa de la celda.

| Capa de la celda | Materiales |
|---------------------------|---|
| Contacto trasero (ánodo) | Au, Ag, Ni, Fe, Pt, Cr. |
| HTL | Spiro-OMeTAD, CuI, CuSCN, Cu ₂ O, CuSbS ₂ , CuAlO ₂ , MoO ₃ . |
| Absorbedor | Perovskitas |
| ETL | TiO ₂ , ZnO, CdS, SnO ₂ , SiO ₂ , SrO ₂ , WO ₃ |
| Contacto frontal (cátodo) | FTO, ITO. |

3. Capa transportadora de huecos (HTL)

Los materiales transportadores de huecos (HTL) tienen un papel importante en el rendimiento del dispositivo, independientemente de la configuración de la celda. La estabilidad y la eficiencia dependen en gran medida de las capas de transporte (ETL y HTL).

Existen ciertas consideraciones que se deben tomar en cuenta al seleccionar el HTL:

- El material debe tener una amplia banda prohibida.
- Baja energía superficial para evitar el deterioro por humedad.
- El material debe tener un nivel de energía HOMO (orbital molecular ocupado más alto) apropiado con respecto al material absorbedor (PVK).
- Alta movilidad de huecos, para reducir la resistencia en serie y aumentar el factor de forma.
- Alta estabilidad térmica y fotoquímica.
- Tener un rango de absorción de la región visible al IR, para minimizar las pérdidas ópticas en dispositivos fotovoltaicos.
- Ser menos propenso a la degradación por la humedad y al aire.
- Proceso de síntesis sencillo y de bajo costo.

Los materiales transportadores de huecos pueden ser orgánicos e inorgánicos, pero dado que los HTL orgánicos son menos estables, los investigadores se encuentran estudiando diversos materiales HTL inorgánicos.

Las eficiencias de conversión de energía (PCE) de las celdas de perovskita fabricadas con HTL orgánicos convencionales, suelen rondar el 26 %. Dentro de los HTL orgánicos utilizados con mayor frecuencia está el spiro-OMeTAD, que posee baja estabilidad, baja movilidad de huecos y además es de alto costo. Cuando se fabrica este material sobre la perovskita en la estructura normal del dispositivo, se obtiene un buen rendimiento (Sajid et al., 2023)

Desafortunadamente, la escasa estabilidad del dispositivo y el alto costo del spiro-OMeTAD, han limitado la comercialización de las celdas solares basadas en este HTL, además, debido a la susceptibilidad que tiene este material a la humedad, las CSP se degradan fácilmente. La interacción irreversible entre los iones de yodo de la perovskita y los componentes del spiro-OMeTAD, reduce la movilidad de huecos y la eficiencia de la celda (Krishna et al., 2023).

Los últimos estudios han demostrado que el rendimiento de las CSP basadas en spiro-OMeTAD disminuye por la difusión del electrodo (Au) a través de los HTL, que reaccionan con la capa de perovskita y desencadenan su degradación.

Por lo tanto, debido a los inconvenientes mencionados, es complicado mantener la estabilidad del dispositivo y la consistencia del rendimiento basado

en los HTL orgánicos. Es importante explorar HTLs que operen con CSP de bajo costo, que tengan una excelente estabilidad y una eficiencia satisfactoria.

Gracias a sus excepcionales características optoelectrónicas, los HTL inorgánicos se han convertido recientemente en líderes entre otros HTL. Los principales contendientes por los HTL emergentes en las CSP son los óxidos metálicos y otros semiconductores inorgánicos, incluidos cianatos metálicos, ftalocianinas, calcogenuros, nitruros y carburos (Jamil et al., 2020).

Además, es importante mencionar que los niveles de banda de energía de los HTL inorgánicos coinciden con los niveles HOMO y LUMO de la perovskita.

La Figura 3 ilustra esquemáticamente los niveles de banda energética de varios HTL inorgánicos como CuSCN, NiO, MoO₃, CuS y CZTS. Con estas ventajas, los HTL inorgánicos pueden resolver los desafíos futuros de la comercialización de las celdas solares de perovskita.

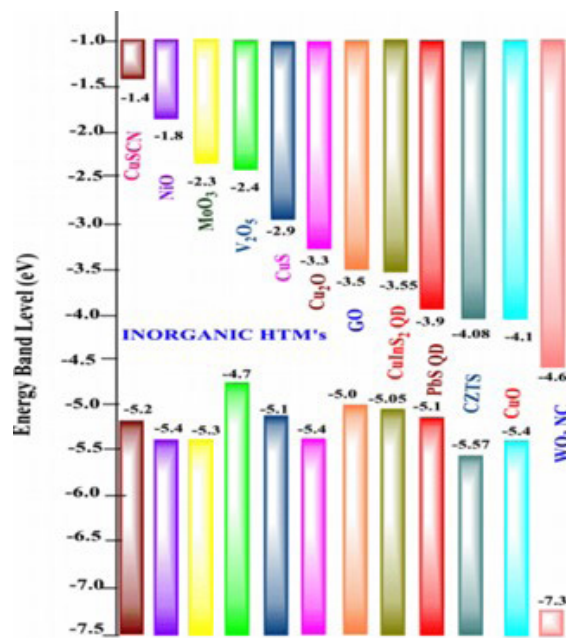


Fig. 3. Diagrama energético de diversos HTL inorgánicos (Rajeswari et al., 2017).

En la Figura 4, se encuentran algunos materiales transportadores de huecos orgánicos e inorgánicos, con sus eficiencias máximas para celdas solares de perovskita.

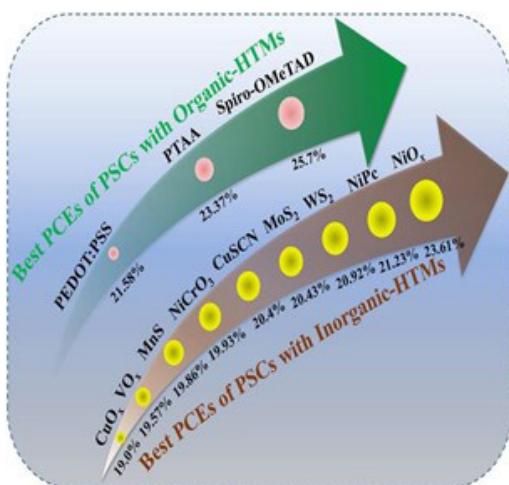


Fig. 4. Esquema de diferentes materiales transportadores y sus eficiencias reportadas (Sajid et al., 2023).

3.1 Kesteritas como capa transportadora de huecos

Las kesteritas han despertado un interés considerable para las aplicaciones de celdas solares, este material $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (CZTS) está hecho de cobre (Cu), zinc (Zn), estaño (Sn) y azufre (S); las kesteritas son de bajo costo y de fácil acceso, debido a que se encuentran con abundancia en la naturaleza (Sravani et al., 2021). Además, no están compuestas por elementos tóxicos, por lo que su impacto ambiental es mínimo durante la fabricación y el desecho de las celdas solares. En comparación con otros materiales, los procesos de síntesis de las kesteritas son más sencillos, se pueden obtener mediante métodos físicos o químicos, como depósito químico en fase vapor, depósito por láser pulsado, erosión catódica, rocío pirolítico, y depósito electroquímico.

Las kesteritas son materiales semiconductores inorgánicos con buenas propiedades físicas y eléctricas, su estructura cristalina (Fig. 5) es más estable que la de otros materiales, tienen una banda prohibida directa y sintonizable que varía de 1.0 a 1.5 eV y una alta movilidad de huecos, además poseen un alto coeficiente de absorción de 10^4 cm^{-1} (Srivastava et al., 2021), que las convierte en materiales muy favorables y prometedores.

Estos semiconductores pueden soportar temperaturas de hasta 800°C (la banda prohibida de CZTS se puede ajustar), y además presenta un mayor incremento del espectro de absorción de hasta 1000 nm, realizado con la incorporación de selenio (Se) en la estructura.

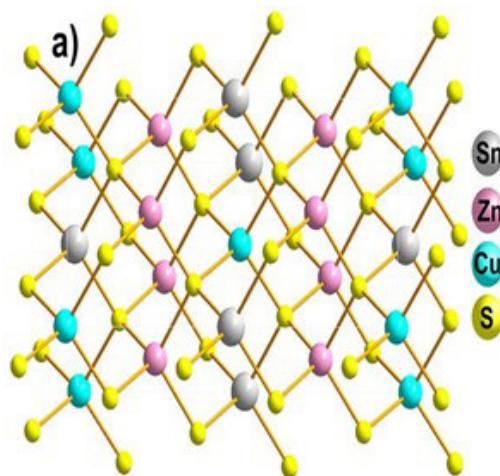


Fig. 5. Estructura cristalina de la kesterita.

Inicialmente se utilizó la kesterita como material activo para reemplazar los costosos y escasos CIGS, en celdas solares de película delgada (Syafiq et al., 2020).

Mediante cálculos se conoce que los materiales CZTS, tienen una eficiencia teórica del 32.4 % según el límite de Shockley-Queisser. Sin embargo, con una técnica de fabricación adecuada, la mayor eficiencia de conversión de energía alcanzable hasta el momento es inferior a la mitad, es del 13.0 % (Wei et al., 2023).

El gráfico de eficiencia cuántica externa (EQE) para celdas solares de kesteritas CZTS muestra que el proceso de recolección de luz ocurre en el rango de 400 nm a más de 800 nm.

Por otro lado, aunque se puede reducir el costo de fabricación, se sabe que el rendimiento de las celdas solares de segunda generación sigue siendo pobre en comparación con la primera generación (Syafiq et al., 2020).

Debido a esta desafortunada circunstancia, las investigaciones sobre CZTS se han ramificado hacia otras aplicaciones como la termoelectrica y la capa de transporte, aplicando los conocimientos que se tienen del material y adquiriendo otros nuevos. Por lo tanto, no sorprende que CZTS se esté estudiando actualmente como HTL en las celdas solares de perovskitas.

Actualmente, se ha comenzado a realizar estudios, se sabe que utilizando kesteritas como HTL puede mejorar el contacto interfacial entre la capa de perovskita y el electrodo de Au, reduciendo la recombinación de huecos y de electrones.

Por lo tanto, las kesteritas cumplen con su función de transportar huecos en las CSP a bajo costo.

Conclusiones

Las celdas solares de perovskitas muestran un potencial considerable en la tecnología fotovoltaica, ya que han brindado un rendimiento mejorado del dispositivo. La eficacia de las CSP depende de varios factores, la arquitectura del dispositivo, las técnicas de producción adecuadas, los electrodos y las capas de transporte. El rendimiento y la estabilidad son requisitos para la comercialización de estas celdas. Al utilizar como capa transportadora de huecos, materiales inorgánicos como las kesteritas, se tiene la ventaja de mejorar la estabilidad y el rendimiento de las CSP, debido a sus buenas propiedades eléctricas.

Además, las kesteritas poseen una estabilidad superior, debido a la ausencia de componentes orgánicos en su estructura, por lo que es una alternativa de HTL a bajo costo, abundante y menos tóxica para las celdas.

Hasta ahora, los estudios sobre la aplicación de kesteritas como HTL aún se están llevando a cabo, existiendo un margen para mejoras significativas.

Referencias

- Belarbi, F., Rahal, W., Rached, D., benghabrit, S., & Adnane, M. (2020). A comparative study of different buffer layers for CZTS solar cell using Scaps-1D simulation program. *Optik*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2020.164743>
- Jamil, M., Ali, A., Mahmood, K., Arshad, M. I., Tahir, S., Ajaz un Nabi, M., Ikram, S., Amin, N., & Hussain, S. (2020). Numerical simulation of perovskite/Cu₂Zn(Sn_{1-x}Gex)S₄ interface to enhance the efficiency by valence band offset engineering. *Journal of Alloys and Compounds*, 821, 153221. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.153221>
- K H, G. (2021). Advances in surface passivation of perovskites using organic halide salts for efficient and stable solar cells. In *Surfaces and Interfaces* (Vol. 26). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2021.101420>
- Karthick, S., Bouclé, J., & Velumani, S. (2021). Effect of bismuth iodide (BiI₃) interfacial layer with different HTLs in FAPI based perovskite solar cell – SCAPS – 1D study. *Solar Energy*, 218, 157–168. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.02.041>
- Krishna, B. G., Ghosh, D. S., & Tiwari, S. (2023). Hole and electron transport materials: A review on recent progress in organic charge transport materials for efficient, stable, and scalable perovskite solar cells. *Chemistry of Inorganic Materials*, 1, 100026. <https://doi.org/10.1016/j.cinorg.2023.100026>
- Kumar, A., Tripathi, S. K., Shkir, Mohd., AlFaify, S., & Srilavanya, T. (2024). Processing methods towards scalable fabrication of perovskite solar cells: A brief review. *Inorganic Chemistry Communications*, 169, 113115. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2024.113115>
- Njema, G. G., Kibet, J. K., & Ngari, S. M. (2024). A review of interface engineering characteristics for high performance perovskite solar cells. *Measurement: Energy*, 2, 100005. <https://doi.org/10.1016/j.meae.2024.100005>
- Oh, E. S., Lee, S., Oh, S. Y., Guo, Z., & Kim, G. M. (2024). Reduction of fabrication time for organic-inorganic hybrid perovskite solar cells in lab-scale. *Solar Energy*, 278, 112793. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112793>
- Rabhi, S., Hameed, T. A., Mayarambakam, S., Hossain, M. K., & Sekar, K. (2024). The impact of CBz-PAI interlayer in various HTL-based flexible perovskite solar cells: A drift-diffusion numerical study. *Heliyon*, 10(10), e31138. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31138>
- Rajeswari, R., Mrinalini, M., Prasanthkumar, S., & Giribabu, L. (2017). Emerging of Inorganic Hole Transporting Materials For Perovskite Solar Cells. In *Chemical Record* (Vol. 17, Issue 7, pp. 681–699). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/tcr.201600117>
- Sajid, S., Alzahmi, S., Salem, I. ben, Park, J., & Obaidat, I. M. (2023). Inorganic hole transport materials in perovskite solar cells are catching up. *Materials Today Energy*, 37, 101378. <https://doi.org/10.1016/j.mtener.2023.101378>
- Sravani, L., Routray, S., Courel, M., & Pradhan, K. P. (2021). Loss mechanisms in CZTS and CZTSe Kesterite thin-film solar cells: Understanding the complexity of defect density. *Solar Energy*, 227, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.052>
- Srivastava, A., Dua, P., Lenka, T. R., & Tripathy, S. K. (2021). Numerical simulations on CZTS/CZTSe based solar cell with ZnSe as an alternative buffer layer using SCAPS-1D. *Materials Today: Proceedings*, 43, 3735–3739. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.986>
- Syafiq, U., Ataollahi, N., & Scardi, P. (2020). Progress in CZTS as hole transport layer in perovskite solar cell. *Solar Energy*, 196, 399–408. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.12.016>
- Tang, J., Chen, Y., Xu, Z., Li, X., Liu, M., Chen, Z., Zhang, P., & Li, S. (2024). Composites electron transport layer of PVA-regulated SnO₂ for high-efficiency stable perovskite solar cells. *Journal of Alloys and Compounds*, 1004, 175939. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175939>
- Wei, H., Li, Y., Cui, C., Wang, X., Shao, Z., Pang, S., & Cui, G. (2023). Defect suppression for high-efficiency kesterite CZTSSe solar cells: Advances and prospects. *Chemical Engineering Journal*, 462, 142121. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142121>

Influencia de polímeros orgánicos en celdas solares

G. Alameda-Alonso*
Hugo J. Cortina-Marrero
L. Hechavarría-Difur
Isaac Montoya De Los Santos

¹ Instituto de Estudios de la Energía
Universidad del Istmo

Correspondencia:
*gerardo.alameda.a@outlook.com

Palabras Clave:

P3HT, PTB7-Th, intercapas poliméricas, celdas solares híbridas, perovskita

RESUMEN

Derivado de la gran necesidad por suplir la enorme demanda energética a nivel mundial, se tienen diversas áreas de estudio activas. Una de ellas, y con grandes perspectivas, es la Energía Solar Fotovoltaica. Dentro de esta, se encuentran la tecnología de las celdas solares híbridas. Como parte de la mejora de esta tecnología, existe la iniciativa de incorporar películas poliméricas en la interfaz del material absorbedor y el material transportador de huecos (MTH). El P3HT y el PTB7-Th, son polímeros de relativo bajo costo que, además, son hidrofóbicos y tienen absorbancia complementaria, por lo cual podrían dar buenos resultados al incorporarlos en la interfaz material absorbedor/MTH. En dos trabajos de investigación que involucran películas poliméricas en la interfaz en cuestión, se reportan mejoras al introducir estas intercapas. Con el P3HT, se obtuvieron los mejores resultados, en cuanto a eficiencia y estabilidad.

ABSTRACT

As a result, from the great need to supply the enormous energy demand worldwide, there are several active areas of study. One of them, and with great perspectives, is the Photovoltaic Solar Energy. This includes hybrid solar cell technology. As part of the improvement of this technology, there is an initiative to incorporate polymeric films at the interface of the absorber material and the hole transport material (HTM). P3HT and PTB7-Th are inexpensive and hydrophobic polymers of complementary absorbance, so it is believed that they could give promising results when incorporated at the absorber/HTM interface. In two research papers involving polymer films at the interface in question, they report an improvement by introducing these interlayers. Being P3HT, the one that gives better results, in terms of hole extraction, cell performance and stability.

1. Introducción

Derivado de la gran demanda energética a nivel mundial, sumado a la lucha contra el cambio climático existe un gran interés por el desarrollo de nuevas tecnologías para generar energía eléctrica de una manera más sostenible y eficiente. Dentro de estos esfuerzos, se encuentran las celdas solares, las cuales son una gran promesa debido a la gran disponibilidad del recurso solar, bajo impacto ambiental y relativo bajo costo de producción.

Actualmente, la tecnología más utilizada es la del silicio, la cual se basa en materiales semiconductores inorgánicos de alta pureza y procesos que requieren grandes cantidades de energía para su fabricación. En la actualidad se desarrollan nuevas tecnologías que se puedan escalar a nivel industrial y con bajos costos de producción. Tal es el caso de las celdas

solares híbridas, las cuales combinan el uso de materiales semiconductores orgánicos e inorgánicos. Los semiconductores orgánicos se caracterizan por sus bajos costos y sencillos métodos de obtención, fácil manipulación, así como modificación de sus propiedades mediante diseño molecular. Por otra parte, los semiconductores inorgánicos suelen ser muy estables, y pueden sintetizarse como nanopartículas, y estas presentan la gran ventaja de que, mediante el control de su forma y tamaño, se pueden regular sus propiedades ópticas y eléctricas. Por estas razones, las celdas solares híbridas han captado la atención de la comunidad científica a nivel mundial, y se consideran una opción prometedora para la obtención de celdas solares eficientes, estables, no tóxicas y de bajo costo. Un ejemplo de las celdas solares híbridas, lo podemos ver en la Fig. 1.1.

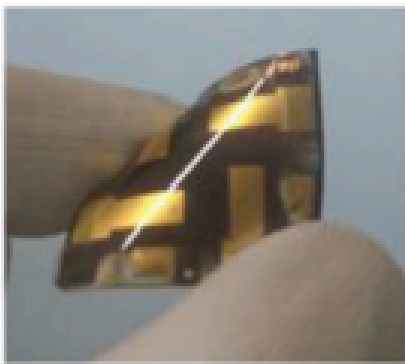


Fig. 1.1 Celda solar flexible basada en perovskita (Galagan et al., 2018).

2. Celdas solares

Las celdas solares consisten en dispositivos semiconductores que convierten la luz solar directamente en electricidad mediante el efecto fotovoltaico. El efecto fotovoltaico ocurre cuando la luz solar incide sobre el material semiconductor de la celda solar y excita los electrones, permitiendo que se desplacen a través del material, generando así una corriente eléctrica.

2.1 Tecnologías de las Celdas Solares

En la Figura 2.1, se muestra las diferentes tecnologías de celdas solares clasificadas en generaciones.

Como podemos observar, las celdas solares a abordar son consideradas celdas de 3ra generación. Dentro del conjunto de las celdas híbridas, se destacan las llamadas celdas solares de perovskitas (CSP), las cuales emplean perovskitas para absorber la luz, y dicho material puede ser inorgánico o híbrido. Cabe resaltar que las CSP han tenido un gran avance en el aumento de la eficiencia, pasando de 3.81 % en 2009 a 26.7 % en 2023 (Green et al., 2024; NREL, 2024). El crecimiento de eficiencia de las CSP supera el de la tecnología del Silicio, la cual se ha estudiado desde 1954, alcanzando actualmente una eficiencia de 27.3 % (Green et al., 2024).

2.2 Estructura de las Celdas Solares de Perovskita (CSP)

Usualmente, una CSP está compuesta por un óxido conductor transparente (TCO, por sus siglas en inglés), una capa de perovskita (material absorbedor) depositada entre una capa transportadora de electrones (MTE) y una capa transportadora de huecos (MTH), y un contacto metálico trasero. Con la finalidad de optimizar el desempeño de las CSP, se suelen incorporar

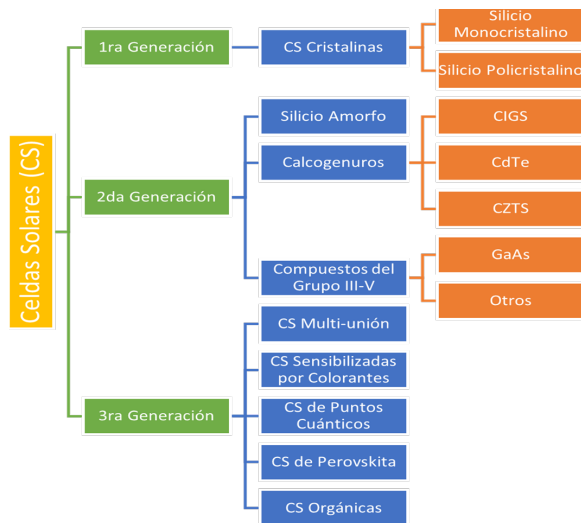


Fig. 2.1 Clasificación de tecnologías fotovoltaicas por generaciones.

capas intermedias en las interfaces perovskita / MTE y perovskita / MTH (Ahmad et al., 2021).

En la Figura 2.2, se ilustran las posibles estructuras de celdas solares de Perovskita, así como un esquema energético de transporte de portadores de carga para una CSP con estructura n-i-p (donde el MTE es un semiconductor tipo *n*, la perovskita es uno tipo *i*, y el MTH es tipo *p*).

2.3 ¿Qué son los materiales transportadores de carga?

Como se observa en Figura 2.2d, durante la fotoexcitación, la capa de perovskita absorbe la luz y genera pares de electrones (e^-) y huecos (h^+). Los electrones se mueven hacia la banda de conducción del MTE, y los huecos se transfieren a la banda de valencia del MTH, y finalmente ambos portadores de carga se recogen en los respectivos electrodos frontal y posterior. Además de los procesos mencionados, pueden ocurrir procesos de recombinación (en el interior del absorbedor y en sus interfaces), en los cuales electrones de la banda de conducción ceden su energía y ocupan huecos de la banda de valencia, perdiéndose así estos portadores de carga, lo cual afecta la eficiencia de las celdas.

Los semiconductores orgánicos (tipo *p*) como MTH, desempeñan un papel fundamental en la mejora del rendimiento de los CSP. La función de los MTH es extraer huecos de la capa de perovskita, transportarlos y transferirlos al electrodo correspondiente (ánodo). Además, los MTH pueden cumplir una función protec-

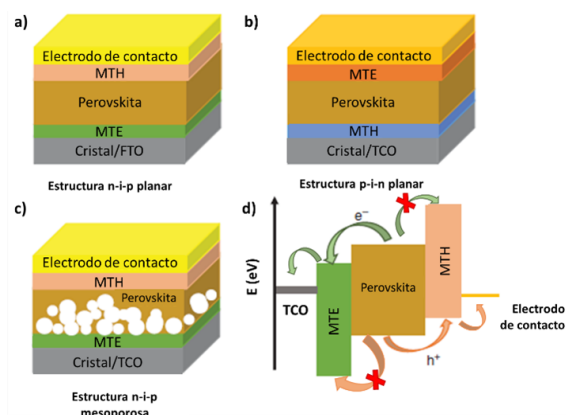


Fig. 2.2 Celdas solares de perovskita (CSP) típicas a) Estructura planar n-i-p, b) Estructura planar p-i-n, c) Estructura n-i-p mesoporosa, d) Esquema de niveles de energía para transporte de portadores de carga en una CSP con estructura n-i-p.

tora de la perovskita. Factores ambientales como la humedad, por ejemplo, degradan a ciertas perovskitas, y los MTH pueden impedir que estos factores ambientales dañinos lleguen hasta la perovskita. Además de ser una barrera física contra agentes ambientales dañinos, los MTH pueden ser barreras energéticas que impiden que electrones de la banda de conducción de la perovskita se dirijan al electrodo equivocado (ánodo), y se pierdan en un proceso de recombinación (Figura 2.2d).

Por otra parte, introducir una película de MTH generalmente aumenta la resistencia en serie (R_s) de la CSP, y su aumento es proporcional al espesor del MTH, lo cual puede disminuir la eficiencia de la celda.

Los MTH pueden ser orgánicos o inorgánicos. La mayoría de los MTH inorgánicos requieren una etapa de procesamiento a alta temperatura o al vacío. Por el contrario, los MTH orgánicos pueden procesarse en solución a baja temperatura y sus propiedades pueden ajustarse con precisión mediante el diseño molecular (Yao et al., 2022).

3. Polímeros orgánicos como MTH en CSP

3.1 P3HT

El Poly(3-hexiltiofeno) (P3HT), es el material donador tipo p más estudiado, su estructura y propiedades son bien conocidas (Ahmad et al., 2017), es económico, es fácil de sintetizar y tiene gran versatilidad para el diseño molecular (Suresh et al., 2022).

El P3HT se destaca por su alta movilidad de huecos, la cual puede mejorarse controlando su regiorregularidad. Se han descrito varios métodos diferentes para la síntesis de P3HT altamente regiorregulares (Ansari et al., 2018).

Por otra parte, el P3HT presenta características desfavorables para actuar como absorbedor en celdas solares, como es su amplia brecha de energía (~ 2.0 eV), la cual limita la eficiencia de absorción de una gran parte de la radiación solar (región roja del espectro visible y región del infrarrojo cercano) (Ansari et al., 2018).

La longitud de onda con la mayor densidad de flujo de fotones del espectro solar está localizado a 700 nm aproximadamente, la cual corresponde a una brecha de energía de 1.77 eV, la cual es menor a la del P3HT. Para maximizar la absorción de la radiación solar terrestre, el espectro de absorción de los polímeros debe cubrir la región roja del espectro visible y la región del infrarrojo cercano (Cheng et al., 2009).

El P3HT presenta un elevado coeficiente de absorción en el espectro visible azul-verde (400-600 nm) (Goh et al., 2015).

Disminuir la amplitud de la brecha de energía del P3HT, podría mejorar la eficiencia de absorción. Con el fin de absorber la mayor densidad de flujo de fotones del espectro solar, el P3HT podría ser modificado en tres maneras:

- I. Comprimiendo los niveles energéticos del HOMO y LUMO.
- II. Disminuyendo el nivel de energía del LUMO.
- III. Aumentando el nivel de energía del HOMO.

Una mayor masa molar en el P3HT muestra una mayor longitud de conjugación y por lo tanto una disminución en su brecha de energía. El dopaje voltamperométrico de tipo p, también puede mejorar las propiedades optoelectrónicas. El espectro de absorción del P3HT puede ampliarse mediante el dopaje p, lo que permite captar una amplia región del espectro solar en comparación con el P3HT neutro original.

Otro aspecto desfavorable del P3HT es el valor energético relativamente alto del orbital molecular ocupado de mayor energía (HOMO, siglas en inglés de Highest Occupied Molecular Orbital) (4.7 - 5.2 eV), lo cual puede afectar el voltaje entre los terminales de la celda (Goh et al., 2015).

Una vía de solución de los dos últimos problemas mencionados del P3HT, es emplearlo en combinación con otros materiales (como el PTB7 y el PTB7-Th), los cuales tienen una mejor posición del HOMO y presentan absorbancia complementaria con el P3HT.

3.2 PTB7-Th

El Poly([2,6'-4,8-di(5-ethylhexylthienyl) venzo [1,2-b;3,3-b] dithiophene]{3-fluoro-2[(2-ethylhexyl) carbonyl] thieno [3,4-b] thiophenediyl})) (PTB7-Th), es un polímero de baja brecha de energía, así como material donador tipo p. Tiene un nivel HOMO alto (5.22 eV), por lo que se espera tenga una influencia en proporcionar un mayor voltaje en las celdas.

La banda prohibida del PTB7-Th (1.6 eV), indica que este material puede absorber en la región amarillo-rojo (570-780 nm) del espectro solar (Colodrero, 2017).

Normalmente, el PTB7-Th es utilizado en mezclas con diferentes fullerenos, para obtener mejores resultados en celdas de heterouniones en bulto (Tetreault et al., 2022).

4. Influencia de los polímeros orgánicos en las celdas solares.

4.1 Influencia en la Morfología de la Celda

Existen resultados reportados, de que el uso de las capas poliméricas en la interfaz Perovskita/Material Transportador de Huecos (MTH), mejoran la morfología de la celda de manera notable. Las capas poliméricas, sellan los huecos de la película de perovskita y la cubren, obteniéndose así una superficie más uniforme y compacta, como se puede observar en las imágenes de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM, siglas en inglés) de las Figuras 4.1 (Ruiz et al., 2023), y 4.2 (Huang et al., 2018). Este mejoramiento morfológico, inhibe la dañina penetración excesiva del MTH a través de los poros de la Perovskita, y propicia la formación de un buen contacto entre las capas poliméricas y dicho MTH.

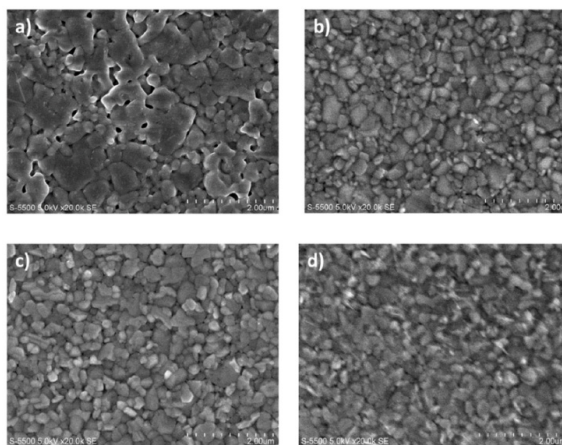


Fig. 4.1 Imágenes SEM de a) Película de Perovskita sin capas poliméricas, y b) Película de P3HT, c) Película de PTB7-Th, y d) Películas de PTB7-Th/P3HT depositadas sobre una película de Perovskita (Ruiz et al., 2023).

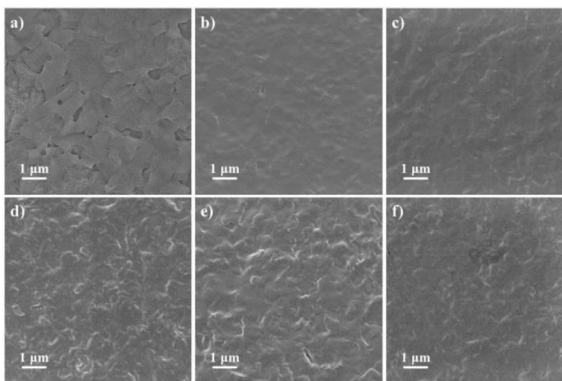


Fig. 4.2 Imágenes SEM de a) Película de Perovskita sin capa polimérica, y película de: b) P3HT, c) PTAA, d) MEH-PPV, e) poly-TPD y f) PBDDTT-CT depositadas sobre una película de perovskita (Huang et al., 2018).

4.2 Influencia en la Extracción de Huecos

También, se tiene reportado que el uso de las capas poliméricas, favorece la extracción de los huecos del absorbedor hacia el ánodo, mejorando el desempeño de las celdas.

Ruiz et al. (2023), realizaron mediciones de espectroscopia de fotoluminiscencia (PL), las cuales se muestran en la Fig. 4.3, en la cual se observa la influencia de la incorporación de capas poliméricas en la extracción de los huecos del absorbedor. En dicha figura se observa que, al incorporar capas intermedias, disminuye el pico de emisión (~775 nm) de la muestra de perovskita (PVK), lo cual puede atri

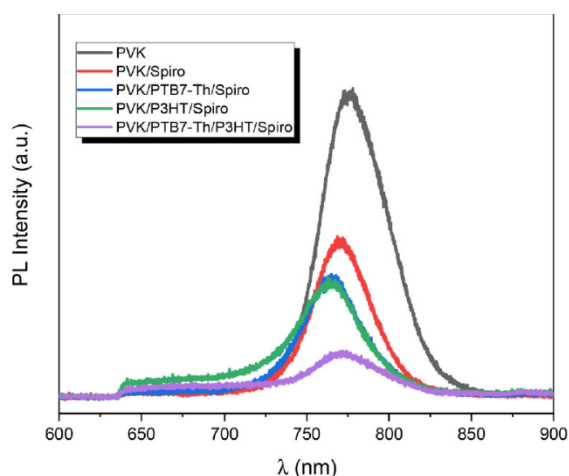


Fig. 4.3 Mediciones de espectroscopia de fotoluminiscencia (PL) (Ruiz et al., 2023).

buirse a la eficiente extracción de huecos que realiza la capa polimérica adyacente. Aquí, el uso de ambos polímeros (PTB7-Th/P3HT), tiene la mayor eficiencia de extracción de huecos.

De la misma manera, Huang et al. (2018), realizaron mediciones de PL, como se muestra en la Fig. 4.4. Se observa que la muestra de perovskita (Perovskite) tiene un espectro PL con un pico alrededor de 775 nm, y que dicho pico disminuye drásticamente cuando la película de perovskita se puso en contacto con diversos MTHs, lo cual puede atribuirse a una mayor transferencia de huecos del absorbedor al Spiro-OMeTAD. Aquí se observa que, de los polímeros evaluados, el P3HT es el más eficiente en la extracción de los huecos.

4.3 Influencia en la Eficiencia de las Celdas

Las influencias antes mencionadas de las capas intermedias, en aspectos de morfología, y transferencia de portadores de carga, tienen un impacto en la eficiencia de las celdas. En la Tabla 4.1 (Ruiz et al., 2023), se observa que la incorporación de capas intermedias influye en la eficiencia, la resistencia en serie (R_s) y la resistencia en paralelo (R_{sh}) de las celdas. Cabe resaltar los resultados prometedores del P3HT ya que, con este material, la celda tiene la menor R_s y la mayor R_{sh} (lo cual es muy recomendable), y alcanza la mayor eficiencia del conjunto (14.4 %). Por su parte,

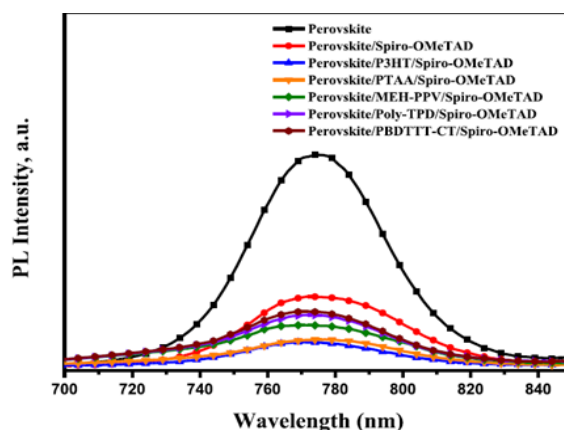


Fig. 4.4 Mediciones de PL (Huang et al., 2018).

Huang et al., (2018), obtuvieron máxima eficiencia (19.0 %) con un capa intermedia de P3HT (Tabla 4.2). En ambos trabajos, se empleó la misma celda de referencia (FTO/ TiO_2 / $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ /Spiro-OMeTAD/Au), y solo se diferencian en el conjunto de materiales evaluados para cumplir la función de capa intermedia en la interfaz perovskita/Spiro-OMeTAD, salvo el P3HT, que fue empleado en ambos (Ruiz et al., 2023; Huang et al., 2018).

Tabla. 4.1 Resultados de eficiencia, resistencia en serie y paralelo de dispositivos con y sin capas poliméricas (Ruiz et al., 2023).

| Dispositivo | Eficiencia (%) | R_s (Ω) | R_{sh} (Ω) |
|---------------------------|----------------|--------------------|-----------------------|
| PVK/Spiro/Au | 13.5 | 54.14 | 5642.36 |
| PVK/PTB7-Th/P3HT/Spiro/Au | 13.8 | 54.29 | 8206.10 |
| PVK/PTB7-Th/Spiro/Au | 12.5 | 60.37 | 12113.16 |
| PVK/P3HT/Spiro/Au | 14.4 | 47.59 | 72619.43 |

Tabla. 4.2 Resultados de eficiencia, resistencia en serie y paralelo de dispositivos con y sin capas poliméricas (Huang et al., 2018).

| Dispositivo | Eficiencia (%) | R_s ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) | R_{sh} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$) |
|------------------------|----------------|--------------------------------------|---|
| PVK/Spiro/Au | 15.0 | 2.79 | 1794.55 |
| PVK/P3HT/Au | 11.9 | 3.11 | 1550.75 |
| PVK/P3HT/Spiro/Au | 19.0 | 1.24 | 5995.80 |
| PVK/PTAA/Spiro/Au | 18.6 | 1.22 | 4984.22 |
| PVK/MEH-PPV/Spiro/Au | 18.4 | 1.98 | 5728.91 |
| PVK/poly-TPD/Spiro/Au | 17.8 | 2.27 | 3396.69 |
| PVK/PBDTTT-CT/Spiro/Au | 17.7 | 2.60 | 3460.32 |

4.4 Influencia en la Estabilidad de las Celdas

En los dos trabajos antes mencionados, se hicieron pruebas para evaluar la estabilidad de las celdas ante la humedad ambiental.

Para Ruiz et al. (2023), al inicio de la prueba, la celda con mayor Eficiencia de Conversión de Energía Normalizada (NPCE, por sus siglas en inglés), fue la que incorporaba una película de PTB7-Th. Por otra parte, la de P3HT es la que presentaba peor NPCE. Sin embargo, después de 22 días, los resultados se invirtieron, como se puede ver en la Fig. 4.5.

Para Huang et al. (2018), después de 700 h, la celda que incluye una película de P3HT, es la segunda más estable (después de la que incluye una película de poly-TPD, en la misma interfaz), como se puede ver en la Fig. 4.6. Cabe resaltar que en este trabajo se incorporaron otros polímeros diferentes, sin embargo, el P3HT sigue demostrando una gran estabilidad.

Los resultados muestran que el uso de capas poliméricas en la interfaz Perovskita/MTH, mejora la estabilidad de las celdas protegiéndolas de la humedad, destacándose en este sentido el P3HT.

Conclusiones

En resumen, las capas poliméricas en la interfaz Perovskita/Material Transportador de Huecos, cumplen un rol importante, ya que ayudan a mejorar la morfología de la celda (en especial, la interfaz entre la Perovskita y el Spiro-OMeTAD), pueden disminuir la resistencia en serie y aumentar la resistencia en paralelo de la celda, y favorecen la extracción de los huecos de la Perovskita hacia el ánodo, todo lo cual mejora el desempeño de la celda. Por otra parte, las películas poliméricas funcionan como encapsulante/aislante de la Perovskita ante la humedad ambiental, mejorando así la estabilidad de la celda.

Los resultados presentados, demuestran que el efecto de la capa intermedia en el desempeño de la celda depende del polímero empleado. En los casos analizados se destacó el P3HT, con el cual se obtuvieron los mejores resultados en cuanto a eficiencia y estabilidad.

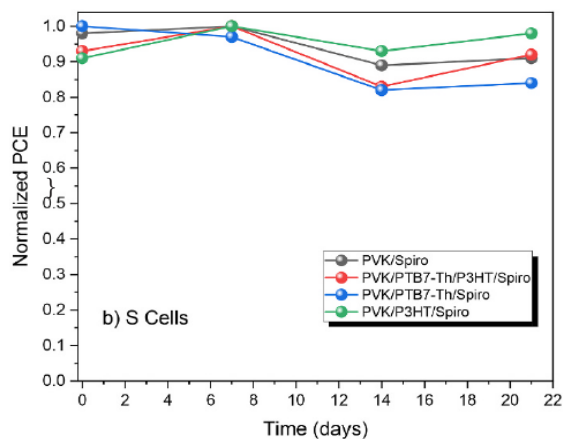


Fig. 4.5 Eficiencia de conversión de energía normalizada en función del tiempo (Ruiz et al., 2023).

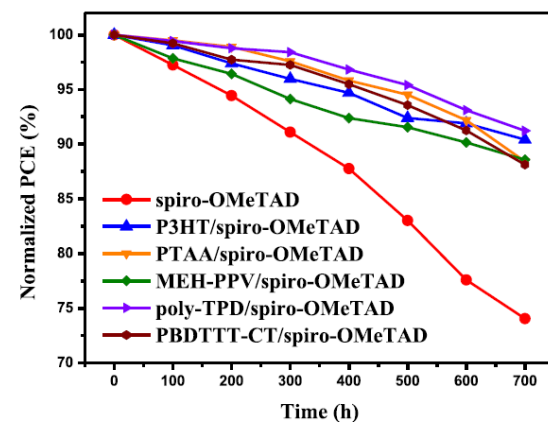


Fig. 4.6 Eficiencia de conversión de energía normalizada en función del tiempo (Huang et al., 2018).

Referencias

- Ahmad, S., Kazim, S., & Grätzel, M. (2021). Perovskite Solar Cells: Materials, Processes, and Devices. WILEY-VCH.
- Ahmad, Z., Awais, M., Najeeb, M. A., Shakoor, R. A., & Touati, F. (2017). Poly(3-Hexylthiophene) (P3HT), Poly(Gamma-Benzyl-L-Glutamate) (PBLG) and Poly(Methyl Methacrylate) (PMMA) as Energy Harvesting Materials (pp. 95–118).
- Ansari, M. A., Mohiuddin, S., Kandemirli, F., & Malik, M. I. (2018). Synthesis and characterization of poly(3-hexylthiophene): Improvement of regioregularity and energy band gap. RSC Advances, 8(15), 8319–8328.
- Cheng, Y. J., Yang, S. H., & Hsu, C. S. (2009). Synthesis of conjugated polymers for organic solar cell applications. Chemical Reviews, 109(11), 5868–5923.
- Colodrero, S. (2017). Conjugated polymers as functional hole selective layers in efficient metal halide perovskite solar cells. AIMS Materials Science, 4(4), 956–969. <https://doi.org/10.3934/matricsci.2017.4.956>
- Galagan, Y., di Giacomo, F., Gortler, H., Kirchner, G., de Vries, I., Andriessen, R., & Groen, P. (2018). Roll-to-Roll Slot

- Die Coated Perovskite for Efficient Flexible Solar Cells. *Advanced Energy Materials*, 8(32).
- Goh, T., Huang, J. S., Bartolome, B., Sfeir, M. Y., Vaisman, M., Lee, M. L., & Taylor, A. D. (2015). Panchromatic polymer-polymer ternary solar cells enhanced by Förster resonance energy transfer and solvent vapor annealing. *Journal of Materials Chemistry A*, 3(36), 18611–18621.
- Green, M. A., Dunlop, E. D., Yoshita, M., Kopidakis, N., Bothe, K., Siefert, G., Hinken, D., Rauer, M., Hohl-Ebinger, J., & Hao, X. (2024). Solar cell efficiency tables (Version 64). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 32(7), 425–441.
- Huang, L. B., Su, P. Y., Liu, J. M., Huang, J. F., Chen, Y. F., Qin, S., Guo, J., Xu, Y. W., & Su, C. Y. (2018). Interface engineering of perovskite solar cells with multifunctional polymer interlayer toward improved performance and stability. *Journal of Power Sources*, 378, 483–490.
- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2023, September 31). Best Research-Cell Efficiency Chart. Best Research-Cell Efficiencies. Retrieved February 6, 2024, from <https://www.nrel.gov/pv/assets/pdfs/best-research-cell-efficiencies.pdf>
- Ruiz-Sánchez, M. A., Moreno-Romero, P. M., Abrego-Martínez, P. G., Torres-Herrera, D. M., Montoya De Los Santos, I., Hechavarría-Difur, L., Courel, M., Sánchez-Rodríguez, F. J., Hu, H., & Cortina-Marrero, H. J. (2023). Modification of perovskite/HTL interface with cooperative polymers bilayer (PTB7-Th/P3HT) to improve perovskite solar cell efficiency and stability. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 157.
- Suresh D S., Vandana, M., Veeresh, S., Ganesh, H., Nagaraju, Y. S., Vijeth, H., Basappa, M., & Devendrappa, H. (2022). Low Cost Synthesis and Characterization of Donor P3HT Polymer for Fabrication of Organic Solar Cell. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1221(1), 012060.
- Tetreault, A. R., Dang, M.-T., & Bender, T. P. (2022). PTB7 and PTB7-Th as universal polymers to evaluate materials development aspects of organic solar cells including interfacial layers, new fullerenes, and non-fullerene electron acceptors. *Synthetic Metals*, 287.
- Yao, Y., Cheng, C., Zhang, C., Hu, H., Wang, K., & de Wolf, S. (2022). Organic Hole-Transport Layers for Efficient, Stable, and Scalable Inverted Perovskite Solar Cells. In *Advanced Materials* (Vol. 34, Issue 44). John Wiley and Sons Inc.

Cálculo de primeros principios (DFT) aplicadas a celdas solares

Dunia Ruiz Villalobos¹
Isaac Montoya De Los Santos^{1*}
Miguel Ojeda Martínez²

¹ Instituto de Estudios de la Energía
Universidad del Istmo

² Centro de Investigación en
Nanociencia y Nanotecnología
de CUValles, Depto. de Ciencias
Naturales y Exactas
Universidad de Guadalajara

Correspondencia:
*isaacms88@gmail.com

Palabras Clave:

DFT, estructura, brecha de energía, CdTe

RESUMEN

Uno de los métodos que se utilizan para la realización de cálculos (ab initio) de diferentes estructuras como son: átomos, moléculas, cristales, superficies y sus interacciones, es la teoría del funcional de la densidad (DFT). Desafortunadamente, la introducción habitual a DFT a menudo se considera demasiado extensa para incluirla en varios planes de estudio. El tema central de DFT es, decir, conocer los beneficios y contribuciones que este método nos ofrece para el estudio teórico. En el contenido encontraremos los conceptos generales de la energía funcional para sistemas electrónicos que se derivan las ecuaciones de Kohn-Sham. Se presenta de manera resumida la parte de correlación de intercambio de esta funcional, incluyendo tanto su aproximación de densidad local como su expresión formalmente exacta en términos del agujero de correlación de intercambio.

En este escrito, se presenta el resultado del estudio sobre cálculos de primeros principios de la estructura electrónica de CdTe utilizando el método de la teoría de funcionales de la densidad (DFT). Este estudio se realizó para comprender el papel que representa DFT en estudios teóricos, en su estructura de banda y características de energía de banda prohibida. Los cálculos se iniciaron encontrando las constantes de red óptimas y la energía total más baja de estos cristales de la estructura en su fase cúbica de CdTe. En estos cálculos se han implementado pseudo potenciales con funciones de correlación de intercambio GGA-PBE. Los resultados del cálculo muestran que las brechas de energía se ven afectadas significativamente por la selección de la fase y su forma inicial, que se encuentran en el rango de -1.4143 eV para el pseudo potencial GGA-PBE. Además, la Densidad de Estados (DOS) calculada indica que la banda de valencia está predominantemente construida por los aniones Te, mientras que la banda de conducción está predominantemente construida por los cationes Cd. Por lo tanto, los resultados presentes también pueden implicar que los cationes Cd no están involucrados significativamente en la foto excitación entre bandas, fotovoltaica y procesos de transporte de carga.

ABSTRACT

One of the methods used to perform calculations (ab initio) of different structures, such as: atoms, molecules, crystals, surfaces and their interactions, is the density functional theory (DFT). Unfortunately, the usual introduction to DFT is often considered too extensive to be included in various study plans. The central theme of DFT is, in other words, to know the benefits and contributions that this method offers us for theoretical study. In the content we will find the general concepts of the functional energy for electronic systems that are derived from the Kohn-Sham equations. The exchange correlation part of this functional is summarized, including both its local density approximation and its formally exact expression in terms of the exchange correlation hole. In this paper, the result of the study on first-principles calculations of the electronic structure of CdTe using the density functional theory (DFT) method is presented. This study was undertaken to understand the role that DFT plays in theoretical studies, in its band structure and band gap energy characteristics. The calculations started by finding the optimal lattice constants and lowest total energy of these crystals in the structure in its cubic CdTe phase. In these calculations, pseudo potentials with GGA-PBE exchange correlation functions have been implemented. The calculation results show that the energy gaps are significantly affected by the phase selection and its initial shape, which are in the range of -1.4143 eV for the GGA-PBE pseudo potential. Furthermore, the calculated Density of States (DOS) indicates that the valence band is predominantly built by Te anions, while the conduction band is predominantly built by Cd cations. Therefore, the present results may also imply that Cd cations are not significantly involved in interband photoexcitation, photovoltaic, and charge transport processes.

1. Introducción a la química computacional

Debido a que compañías farmacéuticas de todo el mundo tenían el interés en la química medicinal y al acelerado desarrollo de la computación, emerge un nuevo campo de conocimiento a finales de los años 70, este va dirigido al diseño de moléculas apoyado por medio de una computadora entonces se llamó: Química computacional (Cuevas et al. (2005) & Vazquez et al (2006)).

El cambio total y radical en la industria computacional, en un principio, un tanto violento, era la impresión de cambiar la idea que de inicio se planteaba, que, para obtener conocimiento en la química, esta disciplina científica, sería necesario realizar experimentos. Desde entonces, la frase que imponían: “la química es una ciencia experimental” perdió cierto valor. Actualmente, compiten la predicción de propiedades químicas de manera teórica con las determinaciones de manera experimental, inclusive con prelación (Leiva et al. (2011)).

La Química Computacional es el área de la Química que utiliza la computadora para realizar modelos y simulaciones, esto con la finalidad de ayudar a la resolución de proposiciones químicas. Empleando los métodos de la Química Teórica, que se integran con instrucciones por medio de algún método computacional, con la finalidad de conocer la estructura y calcular las propiedades de los átomos, moléculas, sistemas biológicos y nanomateriales. En un sentido más restrictivo, el núcleo de la química computacional nos lleva al uso de modelos matemáticos que nos ayudan a predecir las propiedades químicas y físicas de los compuestos utilizando solamente la computadora.

Si bien los cálculos de pequeñas partículas han logrado una precisión cada vez mayor, de igual manera, las técnicas generales de la teoría de la estructura electrónica se han extendido a partículas cada vez más grandes mediante el desarrollo de nuevas aproximaciones y mejores algoritmos. En conjunto, estos avances han hecho que la teoría de la estructura electrónica sea una parte cada vez más importante de la investigación científica moderna. Por ejemplo, ahora generalmente se espera que los químicos que proponen mecanismos de reacción tengan un respaldo en evidencias que se basan en cálculos de química cuántica.

El concepto de superficie de energía potencial es una función que muestra la variación de la energía con las posiciones de los átomos, esta describe las interacciones entre ellos, mediante diferentes modelos se pueden describir esas superficies, estos que se basan en las leyes de la mecánica cuántica son los más exactos, en proporción de los átomos y sus núcleos. Estos modelos se pueden manejar en programas computacionales, en la actualidad se cuenta con una variedad que se encuentra al alcance de los diferentes ámbitos (Académicos e industriales) (Mó et al. (2011) & Muñoz et al. (2000)).

Los principales tipos de métodos usados en los cálculos son: mecánica molecular y mecánica cuántica.

2. DFT ¿Qué es y para qué sirve?

La teoría del funcional de la densidad (DFT por sus siglas en inglés: Density functional theory), se encuentra relacionado a sistemas electrónicos, se basa en procedimientos variacionales alternativos a la solución

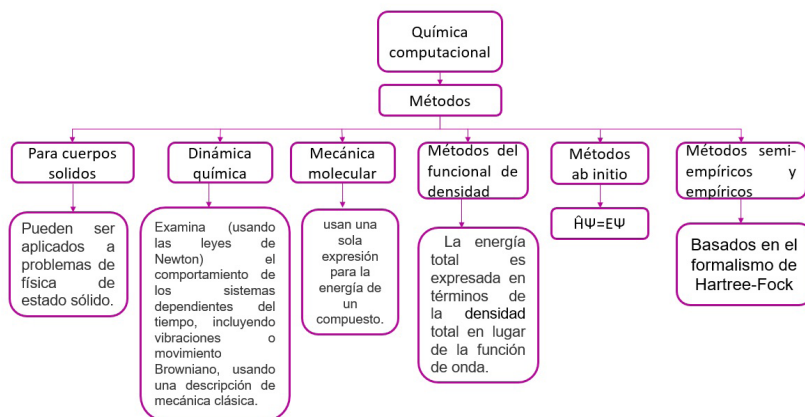


Fig. 1.- Métodos computacionales (Perdew, J. P., Burke, K., & Ernzerhof, M. (1996).)

de la ecuación de Schrödinger, donde el funcional de la energía electrónica es reducido sobre la densidad electrónica. Es uno de los métodos más utilizados en los cálculos cuánticos de la estructura electrónica de la materia, tanto en la física de la materia condensada como en la química cuántica (Young, D. (2004) & Sherrill, C. D. (2010)).

A finales del año 1920 se obtiene un modelo que desarrollan Llewellyn Thomas y Enrico Fermi donde se originó la DFT electrónica. No obstante, las aportaciones que establecieron el formalismo teórico en el que se encuentra el método que es utilizado actualmente, lo establecieron Pierre Hohenberg, Walter Kohn y Lu Sham a mediados de los años 1960. Los aportes al desarrollo de esta teoría llevo a Walter Kohn a obtener el premio Nobel de Química (Kohn, W. (1999)).

Los métodos que tradicionalmente se conocen en las teorías de la estructura electrónica de la materia, en principio la teoría de Hartree-Fock y los derivados de este formalismo, se encuentran basadas en una función de onda multi-electrónica. Si bien esta resolución de la ecuación de Schrödinger permite describir de forma exacta el desempeño de sistemas demasiado pequeños, la disposición de predecir se limita por el hecho de que sus ecuaciones son demasiado complejas de resolver numéricamente o menos aun de manera analítica (Perdew, J. P., Burke, K., & Ernzerhof, M. (1996). La DFT reformula el problema para ser capaz de obtener, por ejemplo, la energía y la distribución electrónica del estado fundamental, trabajando en lugar de la función de onda con el funcional de la densidad electrónica (Polzella et al (2013)). Una ventaja es que la densidad es una magnitud mucho más simple que la función de ondas y por lo tanto más fácil de calcular y en la práctica son accesibles sistemas mucho más complejos: la función de ondas de un sistema de N electrones depende de 3N variables, cuando que la densidad electrónica depende únicamente de 3 variables (Coello Rodríguez, E. (2016)). Una desventaja es que, salvo los casos más simples, no es posible tener con exactitud el funcional que relaciona dicha densidad con la energía del sistema. Los funcionales que se utilizan comprueban que dan buenos resultados en la práctica (Albavera-Mata et al. (2020)).

Este método es uno de los exponentes máximos de la interpretación probabilística de la mecánica cuántica.

3. Aplicaciones

La teoría de funcionales de la densidad, ha sido utilizada en diferentes áreas de investigación, las más conocidas son en farmacéuticos, metales, celdas solares, entre otros (Burke, K. (2012)).

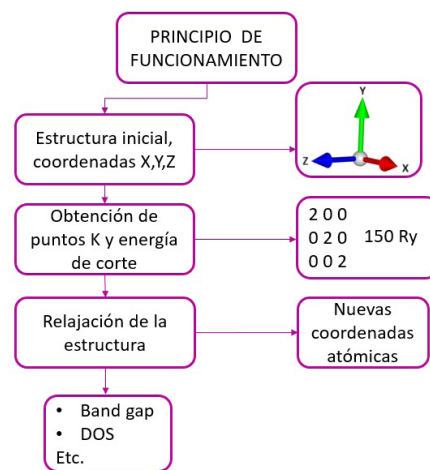


Fig. 2.- Principio de funcionamiento.

4. Teoremas

4.1. Los teoremas de Hohenberg - Kohn

Hohenberg y Kohn demostraron que incluso con la presencia de potencial externo estático, un funcional de densidad electrónica es el total de la energía de un gas de electrones.

$$F(\rho') + \int V(r) \rho' dr \geq E(\rho)$$

También probaron que la energía total del sistema se minimiza en el valor mínimo del funcional, esa es la energía del estado basal del sistema, y la densidad que realiza este valor mínimo es la densidad precisa del estado base de una partícula unitaria (Gilbert, T. L. (1975)).

4.2. El modelo de Kohn y Sham

Walter Kohn y Lu Jeu Sham lograron una formulación de la DFT, esta ha llegado a ser la base de numerosos métodos en la actualidad que estudian los electrones en átomos, moléculas, y materia espesa. Las ecuaciones de Kohn y Sham realizaron de esta teoría una herramienta práctica, ya que a partir de éstas se puede obtener la densidad del estado base.

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V_{\text{eff}}(\mathbf{r}) \right) \Psi_i(\mathbf{r}) = \epsilon_i \Psi_i(\mathbf{r})$$

Kohn y Sham demostraron, formalmente, la manera en que se puede reemplazar un sistema de N electrones por un conjunto equivalente de ecuaciones de un solo electrón (Bickelhaupt et al. (2000)).

4.3. Energía de intercambio y correlación

Todavía no se conoce la forma adecuada a su objetivo con este tipo de aproximaciones para las energías de intercambio y correlaciones electrónicas. Pertenecen a la interacción cuántica entre electrones, una se debe al principio de exclusión de Pauli dentro electrones del mismo espín y la otra al rechazo coulombiano de la parte cuántica (Albavera-Mata et al. (2020) & Anota et al. (2004)).

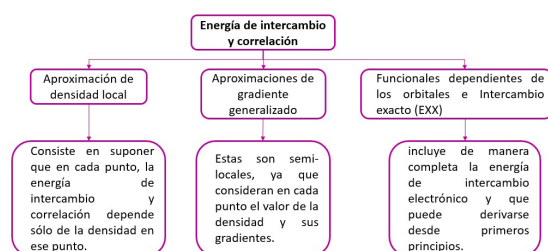


Fig. 3.- Funcionales de intercambio y correlación.

5. Software para simulaciones DFT

Para realizar los cálculos tanto de DFT y de la teoría dependiente del tiempo (TD-DFT) el software a utilizar es necesario definir principalmente el tipo de trabajo a realizar. La DFT se emplea para los diferentes tipos de sistemas (Perdew, J. P., Burke, K., & Ernzerhof, M. (1996).):

Algunos de los paquetes mencionados son gratuitos para usos académicos.

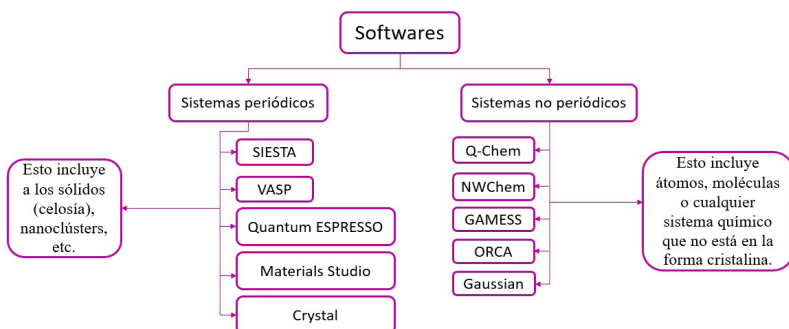


Fig. 4.- Tipos de software para DFT.

El uso de conjuntos bases son la diferencia esencial entre los sistemas periódicos y no periódicos, estos utilizan las ondas planas (estos dan resultados más precisos) y de tipo gaussiano respectivamente.

6. Cálculo DFT de la estructura CdTe

Los resultados presentados en este escrito para presentar la metodología propuesta se han realizado rigurosas simulaciones computacionales DFT, usando el programa (SIESTA) que emplea una metodología análoga extensa a diferencia de otros programas que se encuentran más completas y son más eficientes, la diferencia entre estos programas es que SIESTA es un programa libre que se puede instalar en cualquier computadora. Por tanto, se ha requerido aprender el uso del programa y hacer muchas pruebas para comprobar el correcto funcionamiento y así los resultados obtenidos sean fiables. Los cálculos realizados en el material han seguido el siguiente orden:

1. Obtener un modelo para representar la estructura cristalina cúbica de CdTe.
2. Calcular los parámetros de convergencia.
3. Relajar la estructura para tener la geometría optimizada.
4. Calcular la estructura de bandas y la densidad de estados (DOS) y sus contribuciones por orbitales atómicos (PDOS).
5. Se realizan las gráficas de la estructura de banda electrónicas sobre diferentes puntos de alta simetría de la celda unitaria CdTe.

En este trabajo se utilizó una estructura cúbica del CdTe correspondiente al grupo espacial F43m, lo cual indica que la estructura cristalina se encuentra en una celda de la forma cubica. En la Figura 5 y 6 se observa la estructura inicial y sus posiciones atómicas con la que se comenzó los cálculos. Dentro de estas

simulaciones se configuran los archivos para poder determinar lo que se quiere lograr.

1. Obtener un modelo para representar la estructura cristalina cúbica de CdTe. En la fig. 5 se muestra una representación de la estructura inicial y en la Fig. 6 los vectores de entrada de dicha estructura y las coordenadas de cada átomo.

2. Calcular los parámetros de convergencia.

Se presentan los resultados de simulaciones variando en la Fig. 7 puntos k que van desde 2 a 22 puntos k y en la Fig. 8 la energía de corte que va desde 20 hasta 300 ry, esto con la finalidad de elegir tanto los puntos k como la energía de corte en un punto donde su energía final se estabiliza en este caso lo que hizo fue tomar los valores 14 para los puntos k y 130 de energía de corte, esto para que la simulación pueda llegar a tener resultados más exactos.

3. Coordenadas atómicas de salida.

Como se puede observar en la Fig. 9, los vectores de red cambian y también las coordenadas de cada átomo, se miden las distancias de enlaces para

ver en qué cambia la obtención del diagrama de bandas y la densidad de esta dos del material a estudiar, cabe destacar que estos movimientos generados por la relajación de la estructura pueden alterar los resultados en las propiedades del material.

4. Calcular la estructura de bandas y la densidad de estados (DOS) y sus contribuciones por orbitales atómicos (PDOS).

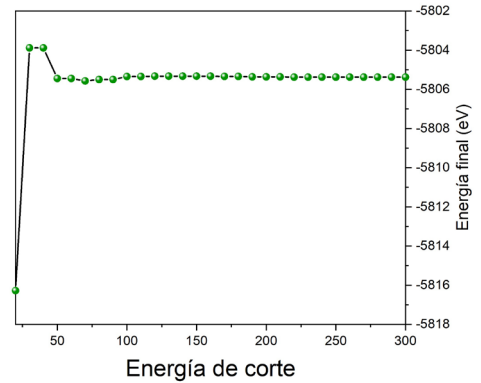


Fig. 7.- Obtención de Puntos k.

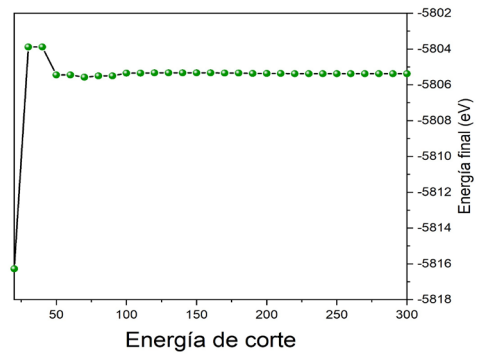


Fig. 8.- Obtención de energía de corte.

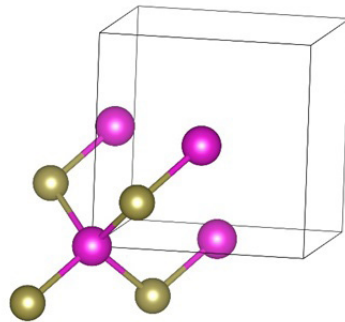


Fig. 5.- Estructura de CdTe.

| Vectores de red (Å) | | |
|-------------------------------------|------|------|
| 6.13 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 6.13 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 6.13 |
| Coordenadas atómicas de entrada (Å) | | |
| 0.00 | 3.06 | 3.06 |
| 3.06 | 0.00 | 3.06 |
| 3.06 | 3.06 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 3.06 | 3.06 | 3.06 |
| 0.00 | 0.00 | 3.06 |
| 0.00 | 3.06 | 0.00 |
| 3.06 | 0.00 | 0.00 |

Fig.6.- Vectores de red y coordenadas atómicas.

| Vectores de red (Å) | | |
|------------------------------------|-------|-------|
| 5.96 | 0.00 | 0.00 |
| 0.00 | 5.96 | 0.00 |
| 0.00 | 0.00 | 5.96 |
| Coordenadas atómicas de salida (Å) | | |
| -0.03 | 3.01 | 3.01 |
| 3.01 | -0.03 | 3.01 |
| 3.01 | 3.01 | -0.03 |
| -0.03 | -0.03 | -0.03 |
| 2.96 | 2.96 | 2.96 |
| 0.01 | 0.01 | 2.96 |
| 0.01 | 2.96 | 0.01 |
| 3.06 | 0.01 | 0.01 |

Fig.9.- Vectores de red y coordenadas atómicas de salida.

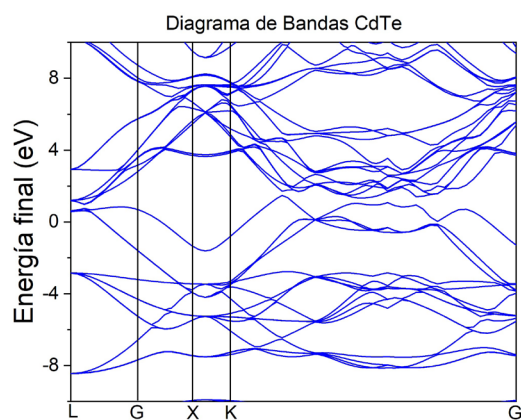


Fig. 10.- Diagrama de bandas de CdTe.

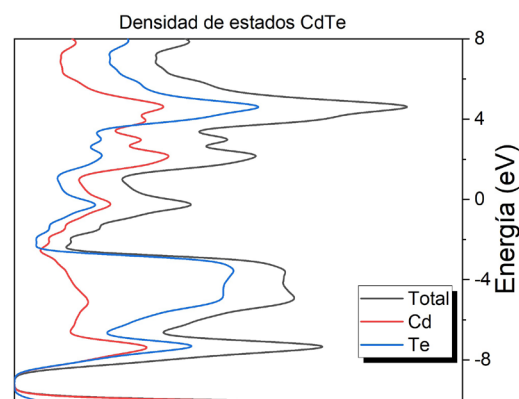


Fig.11.- Densidad de estados de CdTe.

Los resultados del cálculo indican que los cristales CdTe muestran propiedades semiconductoras con energía de banda prohibida en el rango de -1.4143 eV. Los resultados del cálculo muestran que las brechas de energía se ven afectadas significativamente por la selección de la fase y su forma inicial (Jain et al. (2013)) que se encuentran en el rango de -1.4143 eV. Además, la DOS calculada indica que la banda de valencia está predominantemente construida por los aniones Te, mientras que la banda de conducción está predominantemente construida por los cationes Cd. Por lo tanto, mientras que sus energías de banda prohibida están determinadas simplemente por la estructura cúbica de CdTe como se informó anteriormente, los resultados presentes también pueden implicar que los cationes Cd no están involucrados significativamente en la foto excitación entre bandas, fotovoltaica y procesos de transporte de carga.

Conclusiones

En conclusión, la teoría funcional de la densidad sigue siendo una piedra angular en la investigación teórica de la estructura electrónica, proporcionando herramientas indispensables para el avance en la comprensión y desarrollo de nuevos materiales. Su aplicación en el estudio del CdTe es solo un ejemplo de su capacidad para abordar problemas complejos y ofrecer soluciones detalladas y precisas en la ciencia de los materiales. Los cálculos de estructuras electrónicas basados en el método DFT se han realizado para la estructura CdTe utilizando pseudopotenciales GGA. Los resultados del cálculo indican que los cristales CdTe muestran propiedades semiconductoras con energía de banda prohibida en el rango de -1.4143 eV.

En comparación con los resultados experimentales y de otros cálculos informados en la literatura, el resultado de cálculo que se obtuvo no es favorable debido a diferentes consideraciones de la estructura estudiada como son la fase a la que pertenece, grupo espacial entre otros (Kosyachenko et al. (2011) & Bacaksiz et al. (2007)). Para ello, es necesario realizar más estudios sobre el material, habría que cambiar la fase y las consideraciones que se tomaron de manera inicial, debido a que estas simulaciones llevan tiempo de estudio es necesario considerar que el estudio no se puede obtener de manera rápida y certera (Kosyachenko et al. (2011) & Bacaksiz et al. (2007)).

Referencias

- Albavera-Mata, A., Botello-Mancilla, K., Trickey, S. B., Gázquez, J. L., & Vela, A. (2020). Generalized gradient approximations with local parameters. *Physical Review B*, 102(3), 035129.
- Anota, E. C., & Silva, J. R. (2004). La aproximación LDA+ U en la teoría DFT. *Revista mexicana de física*, 50(En2), 88-95.
- Bacaksiz, E. M. I. N., Basol, B. M., Altunbaş, M., Novruzov, V., Yanmaz, E. K. R. E. M., & Nezir, S. (2007). Effects of substrate temperature and post-deposition anneal on properties of evaporated cadmium telluride films. *Thin Solid Films*, 515(5), 3079-3084.
- Bickelhaupt, F. M., & Baerends, E. J. (2000). Kohn-Sham density functional theory: predicting and understanding chemistry. *Reviews in computational chemistry*, 1-86.
- Burke, K. (2012). Perspective on density functional theory. *The Journal of chemical physics*, 136(15).
- Campos, D. (1992). Funciones de onda en el espacio de fase. *MOMENTO*, (6), 3-12.

- Coello Rodríguez, E. (2016). Study of the thermodynamic properties of solids through ab-initio methods: Estudio de las propiedades termodinámicas de sólidos mediante métodos ab-initio.
- Cuevas, G. (2005). Química computacional. *Revista Ciencia*, 56(2), 33-42.
- Gilbert, T. L. (1975). Hohenberg-Kohn theorem for nonlocal external potentials. *Physical Review B*, 12(6), 2111.
- Jain, A., Ong, S. P., Hautier, G., Chen, W., Richards, W. D., Dacek, S., ... & Persson, K. A. (2013). Commentary: The Materials Project: A materials genome approach to accelerating materials innovation. *APL materials*, 1(1).
- Kosyachenko, L. A., Sklyarchuk, V. M., Sklyarchuk, O. V., & Maslyanchuk, O. L. (2011). Band gap of CdTe and Cd 0.9 Zn 0.1 Te crystals. *Semiconductors*, 45, 1273-1280.
- Kohn, W. (1999). Nobel Lecture: Electronic structure of matter—wave functions and density functionals. *Reviews of Modern Physics*, 71(5), 1253.
- Leiva, E., & Estrin, D. (2011). Simulaciones matemáticas del comportamiento de átomos y moléculas. *Química Computacional*, 21(124), 50-54.
- Mó, O., & Yáñez, M. (2011). La química computacional en la nueva frontera. *Arbor*, 187(Extra_1), 143-155.
- Muñoz-Caro, C., & Niño, A. (2000). Química computacional. *Líneas de investigación en informática*, 26, 87.
- Pagola, G. I. 2.4 Teoría Respuesta y Hartree-Fock Acoplado.
- Perdew, J. P., Burke, K., & Ernzerhof, M. (1996). Generalized gradient approximation made simple. *Physical review letters*, 77(18), 3865.
- Polzella, S., & Lodeyro, P. (2013). Las simulaciones computacionales DFT en un proceso experimental: una perspectiva desde las prácticas científicas.
- Sherrill, C. D. (2010). Frontiers in electronic structure theory. *The Journal of chemical physics*, 132(11).
- Van Voorhis, T., & Scuseria, G. E. (1998). A novel form for the exchange-correlation energy functional. *The Journal of chemical physics*, 109(2), 400-410.
- Vazquez, N., & Ines, M. (2006). Algunos aspectos básicos de la química computacional. UNAM.
- Young, D. (2004). *Computational chemistry: a practical guide for applying techniques to real world problems*. John Wiley & Sons.

Los fulerenos como MTE en las celdas solares

Brandon L. Lazo-Cervantes
Liliana Hechavarría-Difur*
Hugo J. Cortina-Marrero
I. Montoya De Los Santos

Instituto de Estudios de la Energía
Universidad del Istmo

Correspondencia:

* lihed@live.com

Palabras Clave:

Fullereno, Eficiencia, Celda solar de perovskita.

RESUMEN

Las celdas solares tienen distintos comportamientos en sus parámetros fotovoltaicos, en dependencia de los materiales empleados en las diferentes capas que la conforman. En los últimos tiempos se ha prestado especial atención a las características de las interfaces con materiales transportadores de electrones (MTE) y materiales transportadores de huecos (MTH), dado que la estructura de dichas capas de materiales juega un papel importante en los procesos de transferencia de carga, por lo tanto, en la eficiencia de dichas celdas solares. Los fulerenos son una familia de compuestos de gran interés en el campo solar fotovoltaico. Las celdas solares orgánicas más eficientes (eficiencias mayores del 10%) emplean derivados del fullereno para cumplir la función de aceptores de electrones (He et al., 2015; Liu et al., 2014). Investigaciones recientes demuestran que los fulerenos también pueden contribuir a elevar la eficiencia y la estabilidad de celdas solares con perovskitas.

En el presente trabajo, se presenta el resultado de una revisión de la literatura, y presentación de algunos casos de estudio, que reflejan la importancia de los fulerenos, tales como: el PCBM, Bis-PCBM y otros basados en C60 y C70, en el mejoramiento de la eficiencia de celdas solares orgánicas e híbridas.

ABSTRACT

Solar cells have different behaviors in their photovoltaic parameters, depending on the materials used in the different layers that make up the cell. In recent times, special attention has been paid to the characteristics of the interfaces with electron transporting materials (ETM) and hole transporting materials (HTM), since the structure of these layers of materials plays an important role in the charge transfer processes and, therefore, in the efficiency of these solar cells. Fullerenes are a family of compounds of great interest in the solar photovoltaic field. The most efficient organic solar cells (efficiencies greater than 10%) employ fullerene derivatives to fulfill the role of electron acceptors (He et al., 2015; Liu et al., 2014). Recent research shows that fullerenes can also contribute to raising the efficiency and stability of perovskite solar cells.

In the present work, we present the result of a literature review, and presentation of some case studies, which reflect the importance of fullerenes, such as: PCBM, Bis-PCBM and others based on C60 and C70, in improving the efficiency of organic solar cells.

1. Introducción

En la actualidad, el 68 % del suministro de energía primaria en el mundo es a partir de combustibles fósiles (Motyka, 2023), y como se sabe, la explotación de esta fuente de energía es la principal causa de la contaminación ambiental y el cambio climático. El uso de tecnologías de aprovechamiento de las energías renovables constituye una solución a largo plazo para revertir los efectos del uso de los combustibles convencionales. La solar fotovoltaica, es la fuente de energía renovable que ha tenido un mayor crecimiento

en los últimos años por ser una fuente que ofrece muchas ventajas sobre otras fuentes renovables, y por supuesto sobre las fuentes convencionales; la potencia instalada a nivel mundial, a finales del 2023, fue de 1,589 GW (REN21, 2024).

En el campo de la energía fotovoltaica, las celdas solares de perovskita han emergido como una tecnología prometedora debido a su alta eficiencia, bajo costo de producción y facilidad de fabricación. Estas celdas solares se basan en materiales que son cristales de estructura cristalina con propiedades

fotovoltaicas excepcionales (Chiang & Wu, 2016; Seo et al., 2014).

Una de las áreas de investigación clave en el desarrollo de celdas solares de perovskita es la mejora de la estabilidad y la eficiencia a largo plazo. Para ello se han desarrollado diversas investigaciones, en las cuales, de manera general se busca mejorar la absorción de radiación por la capa de material absorbedor (perovskita) y garantizar un transporte eficiente de electrones y huecos fotogenerados a los electrodos de salida correspondientes. El transporte de los electrones y huecos fotogenerados puede optimizarse empleando materiales que fungen como transportadores de electrones y huecos y creando con ellos interfaces, por ejemplo: la interfaz MTE/perovskita y la interfaz MTH/ perovskita. Los fullerenos y sus derivados, por ejemplo, el PC₆₁BM, PC₇₁BM, entre otros, han resultado ser excelentes materiales transportadores de electrones, que han permitido mejorar la eficiencia de celdas solares orgánicas. En general, los fullerenos han sido empleados como modificadores superficiales, como capas independientes y formando heterouniones bul- to con la perovskita (Kim et al., 2014; Tao et al., 2015; Chang et al., 2016; Li et al., 2015; Zhang et al., 2016; Wojciechowski et al., 2014; Abrusci et al., 2013; Zhong et al., 2016; Fang et al., 2017).

El PC₇₁BM, cuyo nombre completo es [6,6]-fenil-C71-butil metano, es un material semiconductor que se caracteriza por su alta conductividad electrónica y su adecuada energía de nivelación de Fermi que permite la transferencia de carga en las interfaces electrónicas. En las celdas solares de perovskita, el PC₇₁BM se utiliza típicamente como una capa intermedia entre la perovskita, la cual absorbe la radiación, y el electrodo de transporte de carga.

2. Estructura de una celda solar

La estructura de una celda solar es fundamentalmente definida por el tipo de unión entre materiales semiconductores. Las celdas convencionales de silicio (monocristalino, policristalino) se caracterizan por presentar una homounión entre dos semiconductores extrínsecos de silicio, uno tipo N y uno tipo P, los cuales forman la conocida unión P-N. En la figura 1 se muestra un esquema representativo de una celda solar, donde se observa la estructura compuesta por la unión entre dos semiconductores (N y P), la capa

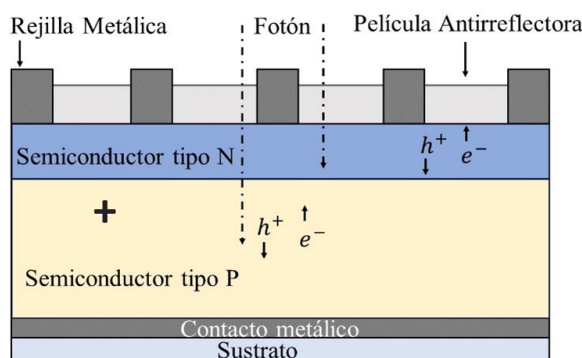


Fig 1. Estructura de una celda solar.

o película antirreflejante cuya función es reducir las pérdidas por reflexión de la luz; una rejilla metálica o electrodo para la colección de portadores; contacto metálico posterior o electrodo para colección de portadores y por último una capa aislante térmico, por lo general de un material conocido como Tedlar. Otras estructuras de celdas solares suelen estar compuestas por dos materiales semiconductores diferentes, conocidas como heterouniones. (Sánchez, 2013).

Las celdas solares orgánicas, en su configuración más simple, están formadas por un material donador de electrones, un material aceptor de electrones, un cátodo mediante el cual los electrones salen al circuito exterior, y un ánodo mediante el cual los huecos salen al circuito exterior. Las celdas solares híbridas, por ejemplo, la celda de perovskita, están formadas por materiales orgánicos e inorgánicos. Suelen tener una estructura formada, en su configuración más simple, por un material absorbedor de radiación, ejemplo la perovskita, en donde se genera un par electrón/hueco (excitón), el cual es separado en las interfaces con los materiales que transportan los electrones y los huecos a los electrodos (cátodo y ánodo) correspondientes. La figura 2 muestra una estructura simple, de una celda solar de perovskita.

3. Material transportador de electrones

En una celda solar típica de perovskita, la capa de perovskita la cual absorbe la radiación solar, se ubica entre un material transportador de electrones (MTE) y un material transportador de huecos (MTH), tal como se observa en la figura 2. La capa conductora e electrones en el caso de celdas solares de perovskita, está formada por un material con alta afinidad y movilidad

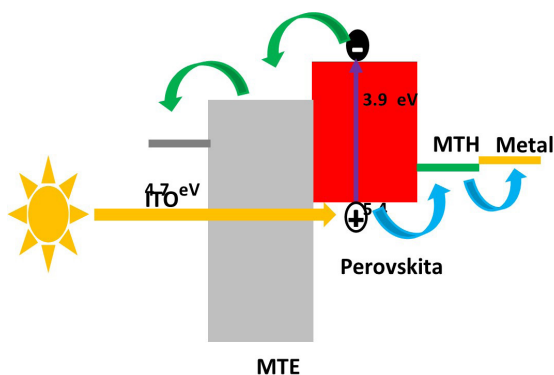


Fig 2. Estructura de una celda solar de perovskita.

electrónica, esto con el propósito de que los electrones fluyan a través de él y lleguen al electrodo correspondiente para su recolección y a su vez los huecos sean bloqueados y redirigidos hacia la capa conductora de huecos (Salazar, 2021).

Las características que debe tener el material transportador de electrones (MTE), son:

1. Adecuado alineamiento energético para promover una eficiente transferencia de electrones desde la perovskita hacia el MTE, y bloquear huecos.
2. Alta movilidad de los electrones para garantizar el rápido transporte de éstos dentro del MTE.
3. Alta transmitancia para reducir las pérdidas ópticas de energía.
4. Alta estabilidad.

Diversos materiales inorgánicos y orgánicos han sido empleado como MTE en celdas solares de perovskitas. Entre los materiales inorgánicos se encuentran: TiO_2 , ZnO , PC_{71}BM , PC_{60}BM , PCBM , SnO_2 , CdS , CdSe , Zn_2SO_4 , BaSnO_3 y SrTiO_4 . Estos materiales se emplean en celdas de perovskita con configuración convencional.

La figura 3 muestra una imagen de microscopia electrónica de barrido de una celda solar de perovskita con una capa de fullereno: PC_{71}BM , donde se puede observar una excelente formación de la interfaz perovskita/MTE.

4. Fullerenos para celdas fotovoltaicas

Los fullerenos y sus derivados han sido utilizado con éxito como aceptores de electrones en la preparación de celdas solares, ya que cuentan con una alta afinidad electrónica, movilidad de electrones y compatibilidad con materiales absorbentes como la perovskita.

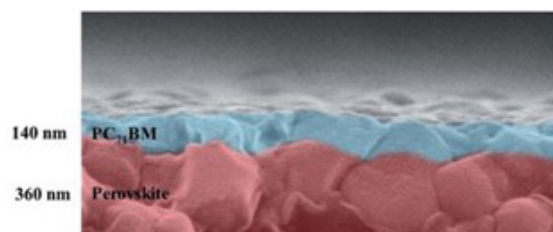


Fig 3. Diagrama SEM de la sección transversal de una celda con PC_{71}BM (Chiang, 2021).

ta. A continuación, se describen los fullerenos y sus derivados más comúnmente utilizados:

1. **PCBM** (Phenyl- C_{61} -butyric acid methyl ester): Es usado ampliamente como material transportador de electrones (MTE), debido a su excelente capacidad para transportar electrones. Adicionalmente, este compuesto tiene amplia absorción complementaria en el rango visible obteniendo una mayor recolección de fotones (Zhang, 2010). La Tabla 1., muestra los resultados de un estudio realizado en (Hossain, 2022), en el cual, se desarrolló una celda solar empleando como material semiconductor absorbente el compuesto de $\text{Cs}_2\text{BiAgI}_6$, y el PCBM como MTE. Los resultados de la evaluación de la celda solar arrojaron un incremento en la eficiencia de 14.44 % a 19.99 %. Lo cual indica, según el estudio, que el PCBM, mejora la separación y movilidad de cargas.

Tabla 1. Comparación de los parámetros fotovoltaicos de $\text{Cs}_2\text{BiAgI}_6$ y células solares similares basadas en absorbentes.

| Estructura | Voc (v) | Jsc (mA/cm ²) | FF (%) | PCE (%) |
|--|---------|---------------------------|--------|---------|
| ITO/PCBM/ $\text{Cs}_2\text{BiAgI}_6$ /CBTS/Au | 1.08 | 22.39 | 82.56 | 19.99 |
| ITO/C60/ $\text{Cs}_2\text{BiAgI}_6$ /CBTS/Au | 1.07 | 19.62 | 82.65 | 17.47 |
| ITO/ CeO_2 / $\text{Cs}_2\text{BiAgI}_6$ /CBTS/Au | 0.92 | 23.59 | 66.21 | 14.44 |

2. **ICBA** (Indene-C60 bisadduct): Es un material innovador que se utiliza en las celdas solares orgánicas para mejorar su eficiencia y rendimiento. Este material pertenece a la familia de los fullerenos, compuestas de carbono con una estructura esférica similar a un balón de fútbol. Los fullerenos tienen propiedades electrónicas únicas que los hacen ideales para aplicaciones fotovoltaicas. Según Zhao (Zhao, G., He, Y., & Li, Y.

2010), uno de los materiales aceptores de electrones con mayor potencial es el ICBA, debido a que se puede aumentar el voltaje de circuito abierto de una celda solar a valores mayores de 1 volt, lo cual es importante para mejorar la eficiencia. La figura 4, muestra una celda binaria de celdas basadas en ICBA y PCBM, en donde muestra que este tipo de fullerenos, tiene una mayor eficiencia cuántica externa en longitudes de onda altas.

3. **Bis-PCBM** (Bis-phenyl-C61-butyric acid methyl ester): Es un material avanzado y crucial en el ámbito de las celdas solares orgánicas, conocido por su capacidad para mejorar significativamente la eficiencia y el rendimiento de estos dispositivos. Como derivado del fullereno, el Bis-PCBM se basa en la estructura esférica del fullereno C60, modificada con dos grupos fenil-butirolato de metilo, lo que le confiere propiedades electrónicas superiores en comparación con su predecesor, el PCBM. Esta doble modificación permite un transporte más eficiente de los electrones generados cuando la luz solar incide sobre el material activo de la celda, reduciendo las pérdidas de energía y mejorando la separación de cargas, crucial para maximizar la eficiencia (Ye, L. 2013).

4. **C60 y C70 Fullerenos Puros:** A veces se utilizan en su forma pura como capas transportadoras de electrones. Aunque no tienen una funcionalidad adicional como la de los derivados, ejemplo el PCBM, ofrecen buenas propiedades electrónicas intrínsecas. Estas macromoléculas de carbono tienen estructuras diferentes a otros materiales de interés, están formadas por átomos de carbono creando pentágonos y hexágonos cuya forma final es similar a la de un balón de fútbol. Aunque su estructura es diferente, cuenta con propiedades interesantes para ser empleado en celdas solares, tales como: altos coeficientes de absorción, estructuras simples y bajas temperaturas de proceso de elaboración. Además, estos compuestos tienen una síntesis sencilla y no costosa, y se purifican fácilmente (Ruiz, 2021). El PC₇₁BM solar. Este material tiene una alta afinidad electrónica, lo que le permite aceptar electrones con gran eficacia y disminuir las pérdidas de energía.

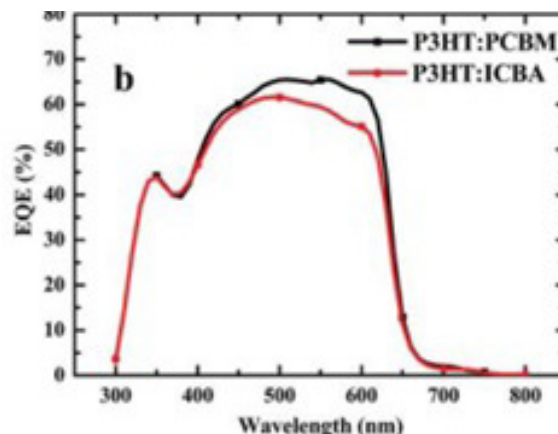


Fig. 4. Eficiencia cuántica externa de celdas basadas en PCBM e ICBA (He, 2010).

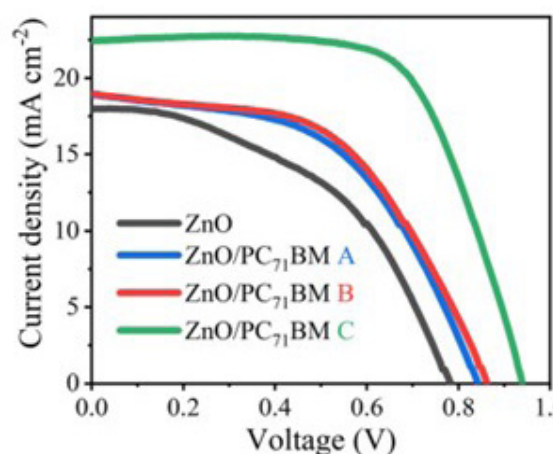


Fig. 5. Curva IV experimental (Castañeda, 2021).

Según Castañeda (Castañeda, 2021), una capa de este fullereno promueve la pasivación de estados trampas en celdas de perovskitas, los cuales propician su degradación. Por otra parte, el PC₇₁BM contribuye a disminuir la resistencia en serie y lograr un mejor rendimiento fotovoltaico. La figura 5, muestra curvas corriente-voltajes de diferentes celdas solares de perovskita (PVK) con ausencia de fullereno (línea negra) y con presencia de fullereno en diferentes concentraciones (líneas azul, roja y verde), en el electrodo aceptor de electrones (ZnO). Puede observarse que la presencia del derivado de fullereno (PC₇₁BM) mejora considerablemente el desempeño de todos los parámetros fotovoltaicos. La tabla 2 resume los valores de los parámetros fotovoltaicos correspondientes a las celdas solares representadas con las líneas negra y verde en la figura 5. Puede observarse que la eficiencia de con-

versión de potencia se incrementa de 5.5 a 12.9 %, solo debido a la presencia de fullereno, que los autores justifican con el efecto pasivador de trampas que ejerce el PC₇₁BM sobre el electrodo de óxido de zinc (ZnO) y el mejoramiento en el transporte de electrones de la perovskita al electrodo colector de electrones.

Tabla 2. Comparación de los parámetros fotovoltaicos de con el uso del derivado de fullereno PC₇₁BM.

| Estructura | Voc (v) | Jsc (mA/cm ²) | FF (%) | PCE (%) |
|--|---------|---------------------------|--------|---------|
| FTO/ZNO/PVK/ Spiro-MeOTAD/Au | 0.78 | 16.56 | 42 | 5.5 |
| FTO/ZNO/PC ₇₁ BM/PVK/ Spiro-MeOTAD/Au | 0.92 | 21.61 | 65 | 12.9 |

Conclusiones

En la literatura se han reportado diversos trabajos de investigación en celdas solares, en las que se emplea fullereno como una capa intermedia que ayuda al mejoramiento de los diferentes parámetros fotovoltaicos (voltaje de circuito abierto, Voc, densidad de corriente de corto circuito, Jsc, factor de llenado, FF y eficiencia PCE). En este trabajo se discutieron algunos resultados de trabajos que fueron desarrollados por autores, en los que se comprueba la factibilidad del uso de este compuesto orgánico para incrementar la eficiencia de las celdas solares. Entre las principales razones que se exponen para explicar el efecto significativo de éstos materiales en el desempeño de las celdas solares se pueden citar: la eliminación de trampas superficiales en el electrodo que colecta electrones, el mejoramiento en el transporte de carga, reducción de procesos de histéresis, favorecimiento en la extracción de electrones, sirve como capa protectora de la perovskita contra la humedad y la presencia de oxígeno, lo que mejora la estabilidad de las celdas, entre otras. Por otra parte, es importante destacar que suelen ser fáciles de procesar y compatibles con diversos materiales donadores. Los fullerenos y sus derivados, no solo contribuyen al mejoramiento de la eficiencia de conversión de energía, sino que también a la durabilidad y estabilidad a largo plazo de las celdas solares, haciendo posible el desarrollo de tecnologías solares más eficientes y sostenibles.

Referencias

- He, Z., Xiao, B., Liu, F., Wu, H., Yang, Y., Xiao, S., Wang, C., Russell, T. P., & Cao, Y. (2015). Single-junction polymer solar cells with high efficiency and photovoltage. *Nature Photonics*, 9, 174179. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2014.321>.
- Liu, Y., Zhao, J., Li, Z., Mu, C., Ma, W., Hu, H., Jiang, K., Lin, H., Ade, H., & Yan, H. (2014). Aggregation and morphology control enables multiple cases of high-efficiency polymer solar cells. *Nature Communications*. <https://doi.org/10.1038/ncomms6293>.
- Wiatros-Motyka, Małgorzata, Dave Jones, Hannah Broadbent, Nicolas Fulghum, Chelsea Bruce-Lockhart. *Global Electricity. Review 2023*. 2023.
- REN21. 2024. Renewables 2024 Global Status Report collection, Renewables in Energy Supply. https://www.ren21.net/gsr2024/modules/energy_supply/01_global_trends
- Chiang, C.-H., & Wu, C.-G. (2016). Bulk heterojunction perovskite-PCBM solar cells with high fill factor. *Nature Photonics*, 10, 196-200. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2016.3>
- Seo, J., Park, S., Kim, Y. C., Jeon, N. J., Noh, J. H., Yoon, S. C., & Seok, S. I. (2014). Benefits of very thin PCBM and LiF layers for solution-processed p-i-n perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 2642-2646. <https://doi.org/10.1039/C4EE00603F>
- Kim, J., Kim, G., Kim, T. K., Kwon, S., Back, H., Lee, J., Lee, S. H., Kang, H., & Lee, K. (2014). Efficient planar-heterojunction perovskite solar cells achieved via interfacial modification of a sol-gel ZnO electron collection layer. *Journal of Materials Chemistry A*, 2, 17291-17296. <https://doi.org/10.1039/C4TA03449H>
- Tao, C., Neutzner, S., Colella, L., Marras, S., Ram, A., Kandada, S. R., Gandini, M., De Bastiani, M., Pace, G., Manna, L., Caironi, M., Bertarelli, C., & Petrozza, A. (2015). 17.6% stabilized efficiency in low-temperature processed planar perovskite solar cells. *Energy & Environmental Science*, 8, 2365-2370. <https://doi.org/10.1039/C5EE00963J>
- Chang, C.-Y., Huang, W.-K., & Chang, Y.-C. (2016). Highly-efficient and long-term stable perovskite solar cells enabled by a cross-linkable n-doped hybrid cathode interfacial layer. *Chemistry of Materials*, 28, 6305-6312. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b02904>
- Li, Y., Zhao, Y., Chen, Q., Yang, Y. (Michael), Liu, Y., Hong, Z., Liu, Z., Hsieh, Y.-T., Meng, L., Li, Y., & Yang, Y. (2015). Multifunctional fullerene derivative for interface engineering in perovskite solar cells. *Journal of the American Chemical Society*, 137, 15540-15547. <https://doi.org/10.1021/jacs.5b09567>
- Zhang, Y., Wang, P., Yu, X., Xie, J., Sun, X., Wang, H., Huang, J., Xu, L., Cui, C., Lei, M., & Yang, D. (2016). Enhanced performance and light soaking stability of planar perovskite

- solar cells using an amine-based fullerene interfacial modifier. *Journal of Materials Chemistry A*, 4, 18509-18515. <https://doi.org/10.1039/C6TA07321K>
- Wojciechowski, K., Stranks, S. D., Abate, A., Sadoughi, G., Sadhanala, A., Kopidakis, N., Rumbles, G., Li, C.-Z., Friend, R. H., Jen, A. K.-Y., & Snaith, H. J. (2014). Heterojunction modification for highly efficient organic-inorganic perovskite solar cells. *ACS Nano*, 8, 12701-12709. <https://doi.org/10.1021/nn505723h>
- Abrusci, A., Stranks, S. D., Docampo, P., Yip, H.-L., Jen, A. K.-Y., & Snaith, H. J. (2013). High performance perovskite-polymer hybrid solar cells via electronic coupling with fullerene monolayers. *Nano Letters*, 13, 3124-3128. <https://doi.org/10.1021/nl4017107>
- Zhong, Y., Munir, R., Balawi, A. H., Sheikh, A. D., Yu, L., Tang, M.-C., Hu, H., Laquai, F., & Amassian, A. (2016). Mesos-structured fullerene electrodes for highly efficient n-i-p perovskite solar cells. *ACS Energy Letters*, 1, 1049-1056. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.6b00358>
- Fang, Y., Bi, C., Wang, D., & Huang, J. (2017). The functions of fullerenes in hybrid perovskite solar cells. *ACS Energy Letters*, 2, 782-794. <https://doi.org/10.1021/acsenerylett.7b00111>
- Sánchez Maza Miguel Ángel. *Energía Solar Fotovoltaica*. LI-MUSA. 2013. ISBN 9789681871987.
- Esparza Salazar, D., Torres García, C. J., Sánchez Díaz, J. A., & Rivas Martínez, J. M. (2021). Celdas solares de tercera generación a base de puntos cuánticos y perovskitas. *Investigación Científica*.
- Chiang, C. H., Tseng, Z. L., & Wu, C. G. (2014). Planar heterojunction perovskite/PC71BM solar cells with enhanced open-circuit voltage via a (2/1)-step spin-coating process. *Journal of Materials Chemistry A*, 2(38), 15897-15903.
- Zhang, F., Zhuo, Z., Zhang, J., Wang, X., Xu, X., Wang, Z., ... & Wang, Y. (2012). Influence of PC60BM or PC70BM as electron acceptor on the performance of polymer solar cells. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 97, 71-77.
- Hossain, M. K., Arnab, A. A., Das, R. C., Hossain, K. M., Rubel, M. H. K., Rahman, M. F., ... & Pandey, R. (2022). Combined DFT, SCAPS-1D, and wxAMPS frameworks for design optimization of efficient Cs₂ BiAgI₆-based perovskite solar cells with different charge transport layers. *RSC advances*, 12(54), 35002-35025.
- Zhao, G., He, Y., & Li, Y. (2010). 6.5% efficiency of polymer solar cells based on poly (3-hexylthiophene) and indene-C60 bisadduct by device optimization. *Advanced Materials*, 22(39), 4355-4358.
- He, Y., Chen, H. Y., Hou, J., & Li, Y. (2010). Indene-C60 bisadduct: a new acceptor for high-performance polymer solar cells. *Journal of the American Chemical Society*, 132(4), 1377-1382.
- Ye, L., Zhang, S., Qian, D., Wang, Q., & Hou, J. (2013). Application of bis-PCBM in polymer solar cells with improved voltage. *The Journal of Physical Chemistry C*, 117(48), 25360-25366.
- Duarte-Ruiz, A., Torres-Cortés, S. A., Meléndez, A., Velásquez, J. D., & Chaur, M. N. (2021). Synthesis and characterization of C60 and C70 acetylacetonate monoadducts and study of their photochemical properties for potential application in solar cells. *Revista Colombiana de Química*, 50(1), 86-97.
- Rappaport, P. (1959). The photovoltaic effect and its utilization. *Solar Energy*, 3(4), 8-18.
- Rodríguez-Castañeda, Carlos A., Paola M. Moreno-Romero, D. Mateus Torres-Herrera, Candy A. Enríquez-Alamares, Hugo J. Cortina-Marrero, I. Montoya De Los Santos, Maykel Courel, F. J. Sánchez-Rodríguez, Hailin Hu A L. Hechavarria-Difur. Impact of PC71BM layer on the performance of perovskite solar cells prepared at high moisture conditions using a low temperature annealed ZnO thin film as the electron transport layer. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2021, 32(1), 265-276. ISSN 1573482X. doi:10.1007/s10854-020-04766-w

Deshidratación solar: una alternativa sostenible para preservar alimentos

Claudia Martínez Alonso^{a*}
Juan Pereyda Hernández^a
Ulises Martínez Alonso^a
Evelyn B. Díaz-Cruz^b

^aFacultad de Ciencias Agropecuarias y Ambientales
Universidad Autónoma de Guerrero

^bFacultad de Química, Materiales-Energía
Universidad Autónoma de Querétaro

Correspondencia:
*18757@uagro.mx

Palabras Clave:

Sol, deshidratación, deshidratación solar, alimentos

RESUMEN

La radiación solar es una alternativa de bajo costo para deshidratar alimentos e incrementar su vida útil, sin representar un riesgo para nuestro entorno. En la actualidad se desarrollan diversas investigaciones en torno a la deshidratación solar de varios productos. Existen diferentes tipos de deshidratadores solares, sin embargo, todos tienen el mismo objetivo, eliminar la humedad de los alimentos sin comprometer sus propiedades. Este tipo de tecnologías pueden ayudar a la preservación de productos agrícolas de pequeños productores y mejorar la calidad de vida en torno a la seguridad alimentaria de la población.

ABSTRACT

Solar radiation is a low-cost alternative for dehydrating food and extending its shelf life without posing a risk to our environment. Currently, several research projects are being conducted on solar dehydration of various products. There are different types of solar dehydrators; however, they all share the same goal: to remove moisture from food without compromising its properties. These types of technologies can help in the preservation of agricultural products from small-scale producers and improve the quality of life by enhancing food security for the population.

1. ¿Qué sabemos del Sol?

El Sol es la estrella más grande del sistema solar y es la mayor fuente de energía que tenemos. Se estima que la edad del Sol es de 6000 millones de años y podría seguir proporcionando energía por un aproximado de 8000 millones de años más, por esta razón es considerado como una fuente renovable de energía. Se compone de una mezcla de gases (principalmente hidrógeno), que generan en su interior altas presiones, bajo estas condiciones se produce de manera espontánea y sin interrupciones un proceso denominado fusión nuclear y como es de esperarse las temperaturas alcanzadas aquí son muy elevadas, de varios millones de grados centígrados. Sin embargo, en el exterior su temperatura se estima alrededor de 5600 °C, con estos datos, se estima que la radiación que emite el Sol es de 64 millones de watts (o vatios) por cada metro

cuadrado de superficie, sin embargo, debido a la distancia entre el Sol y la Tierra de 150 millones de kilómetros, a nosotros únicamente nos llega una porción insignificante de ésta, pero lo suficiente para iluminar y calentar día a día de manera natural nuestro entorno. La radiación incidente en la superficie terrestre se estima alrededor de 1367 watts por metro cuadrado de superficie, sin embargo, al atravesar las diferentes capas que conforman la atmósfera (FIGURA 1), parte de esta radiación se pierde debido a fenómenos de absorción, reflexión y dispersión de la luz, llegando al suelo una radiación de unos 1000 watts por metro cuadrado de superficie. Aunque esta radiación no es uniforme y depende de varios factores, como son la hora del día, la zona geográfica y las condiciones climatológicas (Sakthivadivel et al., 2021).

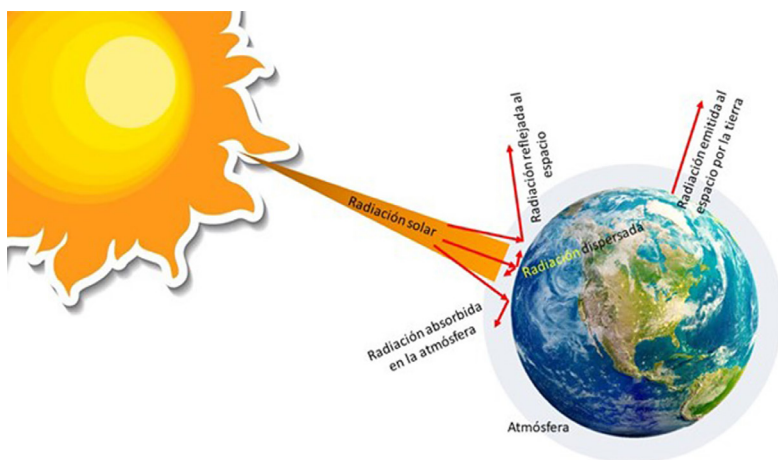


Figura 1. Radiación solar al entrar en contacto con la atmósfera terrestre.

Por otro lado, es conocido que la energía solar es el recurso energético mejor distribuido a nivel mundial, sin embargo, debido a la forma esférica del planeta Tierra y su inclinación, la radiación solar se encuentra mayormente concentrada en la llamada franja o cinturón solares de la Tierra ubicado entre los paralelos 40°N y 35°S, en donde vive el 70% de la población (Greenpeace, 2022). Afortunadamente México se encuentra dentro de esa franja solar y posee una radiación promedio anual de 5.56 kilowatts hora por metro cuadrado de superficie-por día, y más del 85% de nuestro país cuenta con condiciones óptimas para aprovechar la energía solar (Solarama, 2019). Por otro lado, si conjuntamos el recurso solar disponible en nuestro país con la producción de alimentos se puede obtener un gran beneficio para la sociedad a través del aprovechamiento de la radiación solar mediante los deshidratadores solares, con el objetivo de preservar alimentos, utilizando la radiación solar como una alternativa renovable, amigable con el ambiente y favoreciendo la economía (Rosas-Flores et al., 2019).

2. Deshidratación de alimentos y deshidratadores solares

La deshidratación o secado de alimentos es una de las formas más antiguas de incrementar la vida útil de los mismos, debido a la eliminación completa del agua libre en el alimento de manera suave, se impide completamente la actividad microbiana y como resultado se reduce la actividad enzimática, lo cual garantiza su conservación a través del tiempo. Esto a su vez, genera una reducción en los costos de almacenamiento y transporte. Además, este tratamiento permite mantener la mayor parte de las propiedades de los alimentos, ya que la manera en que se retire el

agua debe garantizar que no se alteren los nutrientes. Actualmente, existen muchas ventajas por la cual es deseable la deshidratación de los alimentos, las más relevantes son las siguientes:

- Las frutas y verduras deshidratadas son una forma saludable y conveniente de agregarlas a nuestra dieta.
- Los alimentos deshidratados también son una buena fuente de fibra y vitaminas.
- Las frutas deshidratadas son livianas y compactas, lo que las hace ideales para acampar, viajar con mochila y otras actividades al aire libre.
- Las verduras deshidratadas se pueden usar en muchas recetas o se pueden comer tal cual. Las verduras y frutas deshidratadas son un bocadillo excelente y se pueden agregar a sopas, ensaladas, postres.
- Las verduras deshidratadas se utilizan ampliamente como ingredientes alimentarios, ya que son fáciles de usar y almacenar. Se utilizan ampliamente en alimentos procesados para mejorar el sabor, la textura y la apariencia de los alimentos. Como estas verduras se secan, se pueden almacenar durante un largo período de tiempo.

En la actualidad, aun se sigue utilizando la deshidratación solar tradicional (a cielo abierto), proceso que ayuda a la preservación de alimentos con las bondades de la radiación solar. Pero tiene algunas desventajas, como son las pérdidas de cosecha por el inadecuado proceso, ataques de hongos, insectos, invasión de aves y roedores, lluvia inesperada y otros efectos meteorológicos. Atribuido a lo anterior, la deshidratación solar a cielo abierto ha sido reemplazada por sistemas mecánicos que obtienen calor de

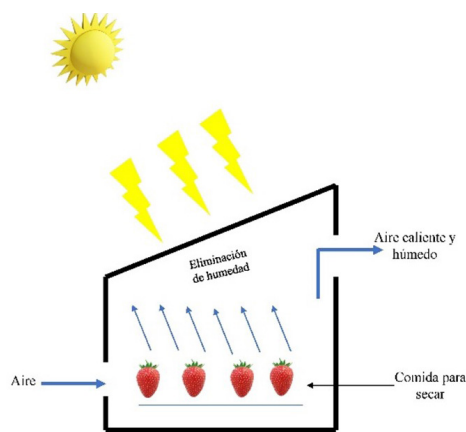


Figura 2. Deshidratación solar de alimentos.

calderas, reduciendo los tiempos de deshidratación y obteniendo una mejor calidad del producto. Sin embargo, estas tecnologías son costosas y requieren cantidades considerables de combustible o electricidad para operar, resultando además un método poco amigable con el ambiente. De aquí surge la necesidad de implementar nuevos procesos que no impliquen un incremento en los costos del producto final y sin comprometer al ambiente. En las últimas décadas, se han desarrollado sistemas de deshidratación solar. Esta tecnología ofrece una alternativa para preservar diversos alimentos en condiciones óptimas de higiene y utilizando la radiación solar que incide en la Tierra. La deshidratación solar ahorra energía, tiempo, mejora la calidad del producto, hace que el proceso sea más eficiente y protege el ambiente. Además, es una opción para promover las fuentes de energía renovables y generar ingresos (Bhaskara Rao & Murugan, 2021).

De manera general un deshidratador solar funciona de la siguiente forma: la radiación solar incide

sobre el deshidratador, calienta el aire en el interior, con el aire caliente los alimentos son deshidratados hasta el nivel de humedad deseado, como se muestra en la FIGURA 2. El proceso para deshidratar alimentos se enumera a continuación: 1. Selección, 2. Lavado y desinfección, 3. Corte homogéneo, 4. Tratamiento (para evitar oxidación), 5. Colocación en las bandejas del deshidratador solar, 6. Tiempo de deshidratado y 7. Envasado-etiquetado, ver FIGURA 3 (Bhaskara Rao & Murugan, 2021).

Por otra parte, los deshidratadores solares de acuerdo con el movimiento del aire en su interior se clasifican en pasivos (convección natural) y activos (convección forzada). Los deshidratadores solares pasivos logran el secado de los productos sin necesidad de emplear elementos mecánicos (ventilador) para mover el aire, contrario a los activos. Otra clasificación es de acuerdo a la exposición de productos a la radiación solar, los deshidratadores solares pueden ser directos, indirectos o mixtos. En los directos el producto se expone directamente a la radiación solar, existiendo una sobreexposición. En cambio, los indirectos protegen a la cámara de secado de la sobreexposición a la radiación solar, pero tienen un colector solar que aumenta la temperatura del aire de secado. Por último, el mixto como su nombre lo indica es la combinación de un deshidratador solar directo e indirecto, es decir, posee una cámara de secado conectado a un colector solar. Simultáneamente, todos los deshidratadores solares proporcionan protección contra insectos, aves, polvo, etc., favoreciendo la vida útil de los alimentos y conservando sus propiedades. La Tabla 1 muestra la clasificación de los deshidratadores solares y sus principales ventajas y desventajas (Kamarulzaman et al., 2021).

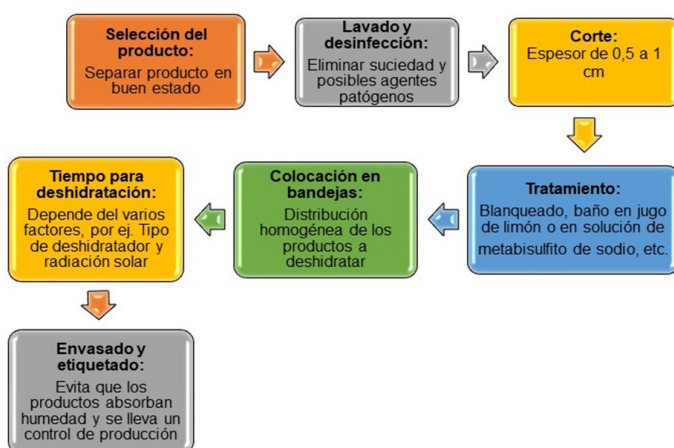


Figura 3. Proceso de deshidratación solar de alimentos.

Tabla 1. Clasificación de deshidratadores solares, principales ventajas y desventajas.

| Clasificación de deshidratadores solares | Tipo | Ventajas | Desventajas |
|--|------------|---|---|
| Movimiento del aire dentro del deshidratador | Pasivos | Calentamiento por convección natural (sin ventilador) | No son funcionales por la noche y en días nublados. Mayor tiempo de deshidratado. |
| | Activos | Menor tiempo de deshidratado | Calentamiento por convección forzada (usa un ventilador). Utiliza energía eléctrica convencional. |
| Exposición de productos a la radiación solar | Directos | Exposición directa a la radiación solar | No se puede controlar las condiciones de radiación. Sobreexposición y tiempos prolongados de deshidratado. |
| | Indirectos | Incremento de la temperatura del aire, usa un colector. Protegen los productos de la radiación directa. Menor tiempo de deshidratado. | Deficiente flujo de aire. Dificultad para su manipulación, atribuido a sus dimensiones. |
| | Mixtos | Alcanza mayor temperatura. Menor tiempo de deshidratado. | Sobreexposición a la radiación solar. Dificultad para su manipulación, atribuido a sus dimensiones. |

3. ¿Qué alimentos podemos deshidratar en un deshidratador solar?

Los productos que se pueden deshidratar son diversos, destacando frutas, verduras, semillas, hierbas aromáticas o medicinales e incluso carnes. En México se cosecha una gran variedad de productos que en algunos casos son desperdiciados. Datos del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) indican que en los estados del centro y sur de nuestro país se cosecha principalmente coco, mango, melón, cacao, sandía, guayaba, papaya, aguacate, durazno, plátano, piña, entre otros productos, algunos de ellos se desechan si no logran salir al mercado (SIAP, 2022). En este sentido, la deshidratación de dichos productos empleando deshidratadores solares es una alternativa viable para preservarlos, incrementar su vida de anaquel para consumo de las familias productoras e incluso puede favorecer la economía de las mismas al emprender un negocio con los productos deshidratados. Es necesario transmitir la información en las comunidades para aprovechar al máximo sus productos, así como aprovechar también la radiación solar que favorece considerablemente al estado de Guerrero.

Conclusiones

El incremento de la población y el cambio climático han provocado una elevación de los costos de producción de frutas y verduras, además es evidente que en ocasiones mucha cosecha se pierde, ya que no es posible colocarla en los mercados en un periodo corto de tiempo, por lo tanto, los deshidratadores solares son una alternativa sostenible para preservar alimentos, sin comprometer sus propiedades. Además, no representan un gasto energético ya que funcionan con la radiación solar que recibimos día a día. Con esta tecnología se puede incrementar la vida de anaquel de diversos productos que pueden ser consumidos posteriormente por las familias productoras e incluso pueden ser comercializados. Sin duda alguna, los deshidratadores solares pueden favorecer a pequeños productores y personas que deseen deshidratar frutos de manera casera, ya que actualmente existen deshidratadores caseros.

Referencias

Bhaskara Rao, T. S. S., & Murugan, S. (2021). Solar drying of medicinal herbs: A review. *Solar Energy*, 223, 415-436. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.05.065>

Greenpeace. (2022). El sol, la fuente de energía más abundante del planeta—Greenpeace México. <https://www.>

- greenpeace.org/mexico/blog/51001/la-fuente-de-energia-mas-abundante-del-planeta-el-sol/
- Kamarulzaman, A., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N. A. (2021). Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review. *Solar Energy*, 221, 559-582. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.04.056>
- Rosas-Flores, J. A., Zenón-Olvera, E., & Gálvez, D. M. (2019). Potential energy saving in urban and rural households of Mexico with solar photovoltaic systems using geographical information system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 109412. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109412>
- Sakthivadivel, D., Balaji, K., Dsilva Winfred Rufuss, D., Iniyan, S., & Suganthi, L. (2021). Solar energy technologies: Principles and applications. En *Renewable-Energy-Driven Future* (pp. 3-42). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820539-6.00001-7>
- SIAP. (2022). Panorama Agroalimentario 2022. <https://www.inforural.com.mx/wp-content/uploads/2022/11/Atlas-Agroalimentario-2022.pdf>
- Solarama. (2019). Top 5 estados con mayor radiación solar en México. <https://solarama.mx/blog/radiacion-solar-en-mexico/>

Impacto de los vientos extremos en el Istmo de Tehuantepec: causa y efecto

J.A. Rojas-Escobar¹
E. Dueñas-Reyes^{1*}
E. Campos-Mercado²

¹ Instituto de Estudios de la Energía
Universidad del Istmo

² CONAHCYT-Universidad del Istmo

Correspondencia:
*

Palabras Clave:

Ráfagas de viento, Istmo de Tehuantepec, infraestructura eólica, impacto y mitigación

RESUMEN

El Istmo de Tehuantepec, Oaxaca, es una región estratégica para la generación de energía eólica debido a sus fuertes vientos. Sin embargo, las ráfagas de viento extremas representan un desafío importante para la infraestructura eólica. Comprender el complejo comportamiento del viento es un reto clave para mejorar la precisión de los modelos de predicción y mitigar los daños de las turbinas eólicas. Las ráfagas de viento son uno de los diversos factores que pueden causar daños en las turbinas. Por lo que este estudio analiza las ráfagas de viento de La Ventosa, Oaxaca, utilizando datos históricos de las velocidades del viento, se examinó su intensidad, frecuencia, causas e impacto que tienen tanto en las infraestructuras locales como en el funcionamiento de los aerogeneradores.

ABSTRACT

The Isthmus of Tehuantepec, Oaxaca, is a strategic region for wind power generation due to its strong winds. However, extreme wind gusts represent a major challenge for wind infrastructure. Understanding the complex behaviour of wind is a key challenge to improve the accuracy of prediction models and mitigate wind turbine damage. Wind gusts are one of several factors that can cause damage to turbines. Therefore, this study analyses wind gusts in La Ventosa, Oaxaca, using historical wind speed data, examining their intensity, frequency, causes and impact on local infrastructure and wind turbine operation. Keywords: Wind gusts, Isthmus of Tehuantepec, wind infrastructure, impact and mitigation.

1. Introducción

En México, se encuentra una zona denominada La Ventosa con la capacidad estimada de albergar aproximadamente 2.000 MW en centrales eólicas. En la región de La Ventosa, se manifiestan dos fenómenos meteorológicos prominentes. Uno de ellos es el viento de montaña, caracterizado por velocidades excepcionales debido al marcado gradiente de presión entre las montañas. Los vientos intensos se originan en el Golfo de México como viento del norte, se canalizan y aceleran a través de la estrecha brecha de Tehuantepec (Paso de Chivela) y se precipitan hacia el Océano Pacífico. Por otro lado, se presenta el viento de brisa marina, un viento costero local que sopla desde el Golfo de Tehuantepec hacia tierra firme, inducido por las diferencias de temperatura cuando la superficie del mar es más fría que la tierra adyacente. Esta región, ofrece ubicaciones propicias para la instalación de aerogeneradores. A pesar de que la velocidad del viento tiende a disminuir hacia el oeste-suroeste en

esta área, varias zonas mantienen una velocidad media anual de 7 m/s o superior. El Istmo de Tehuantepec es una de las regiones con mayor potencial eólico del mundo, lo que lo convierte en un lugar ideal para la generación de energía eólica. Sin embargo, las ráfagas de viento extremas que se presentan en la zona pueden tener efectos adversos en la infraestructura eólica, afectando su funcionamiento y durabilidad.

El objetivo de este estudio es proporcionar un análisis detallado de las ráfagas de viento extremas en el Istmo de Tehuantepec, identificando sus causas principales, su frecuencia e intensidad, y un breve análisis de los impactos de las ráfagas de viento en la energía eólica en el Istmo de Tehuantepec.

1.1 ¿Definición de una ráfaga de viento?

La definición de una ráfaga de viento es un tema complejo y multifacético en la literatura científica. Aunque no existe un consenso universal, la mayoría de las definiciones coinciden en que una ráfaga implica un cambio abrupto en la velocidad del viento.

(Branlard, 2009) propone una definición amplia y flexible, describiendo una ráfaga como “una variación de la velocidad del viento a corto plazo dentro de un campo de viento turbulento”. Esta definición permite una interpretación más inclusiva del fenómeno, sin imponer criterios cuantitativos estrictos. Por su parte, la norma IEC 61400-1 (IEC, 2005), enfocada en la seguridad de turbinas eólicas, caracteriza una ráfaga en términos de tres parámetros principales: tiempo de subida, magnitud y duración. Este enfoque proporciona una base para el análisis y diseño de turbinas eólicas resistentes a eventos de ráfagas. En contraste, la Sociedad Meteorológica Americana (AMS, 2020) opta por una definición más específica y cuantitativa. Según la AMS, una ráfaga debe cumplir dos criterios: alcanzar una velocidad pico superior a $8,6 \text{ m/s}$ y experimentar un cambio de velocidad mayor a $4,6 \text{ m/s}$ en un intervalo menor a 20 segundos. Esta definición ofrece parámetros concretos para la identificación y medición de ráfagas en contextos meteorológicos.

Es importante señalar que, como indica (Branlard, 2009), la mayoría de los métodos de identificación de ráfagas se centran en el análisis en el dominio del tiempo. Esta aproximación, aunque útil, podría limitar la comprensión completa del fenómeno, sugiriendo la necesidad de explorar enfoques adicionales en futuros estudios sobre ráfagas de viento.

1.2 ¿Cómo se crean las ráfagas en el Istmo de Tehuantepec?

El Istmo de Tehuantepec se encuentra en una región donde confluyen diversos sistemas climáticos lo que propicia la formación de fuertes vientos conocidos como “Tehuano” (vea Figura. 1). Estos vientos se originan debido a la interacción entre el anticiclón del Atlántico Norte y la topografía local.

Los “Tehuantepecers” o “Tehuano” son fenómenos meteorológicos característicos del Istmo de Tehuantepec, que generan ráfagas de viento intensas y tienen un impacto significativo en la región. Estos eventos se producen principalmente durante el invierno y son el resultado de una compleja interacción entre sistemas de presión atmosférica, topografía local y factores geográficos. El mecanismo detrás de estos vientos fuertes comienza cuando sistemas de alta presión fríos, originados en América del Norte, se desplazan sobre el Golfo de México siguiendo frentes

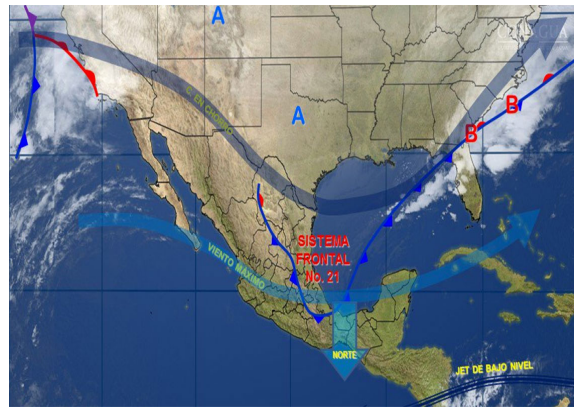


Fig. 1. Ubicación del Istmo de Tehuantepec.

fríos. Esto crea un marcado gradiente de presión entre la Bahía de Campeche y el Golfo de Tehuantepec en el Pacífico. La diferencia de presión resultante impulsa un flujo de aire del norte que se acelera a través del Paso Chivela, una brecha natural en la topografía del istmo.

Al salir del Paso Chivela, el viento se expande en forma de abanico sobre el Golfo de Tehuantepec, curvándose anticiclónicamente. La extensión de este flujo de aire sobre el océano se ve favorecida por la ausencia de obstáculos y el débil efecto Coriolis característico de las latitudes tropicales. Esta combinación de factores permite que el viento mantenga su intensidad sobre una gran distancia en el Pacífico.

La intensidad y persistencia de estos vientos han sido objeto de numerosos estudios científicos, los primeros estudios científicos sobre la intensidad y persistencia de los vientos en el Istmo de Tehuantepec fueron realizados por (McCreary et al., 1989) y (Steenburgh et al., 1998) quienes analizaron la configuración, causas y dinámica de estos vientos intensos en el Istmo de Tehuantepec.

Por su parte, (Jaramillo y Borja, 2004) también realizaron un estudio detallado sobre las características de estos vientos en la región. Su trabajo analizó la variabilidad y patrones de los vientos en el Istmo de Tehuantepec, aportando una mejor comprensión de este fenómeno eólico.

Mientras que (Brennan et al., 2010) determinó que los eventos de “Tehuantepecers” suelen alcanzar su máxima frecuencia en diciembre, con una duración promedio de 48 horas por evento.

(Velazquez-Muñoz et al., 2011) observaron una correlación inversa entre la presencia de los eventos

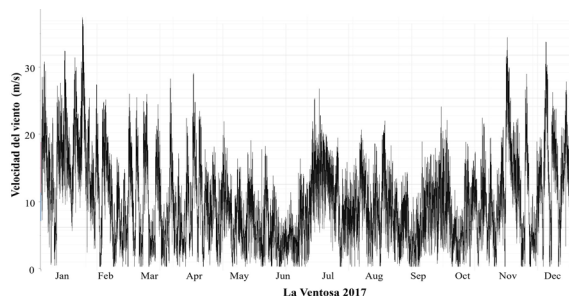


Fig. 2. Registro de base de datos de velocidades de viento.

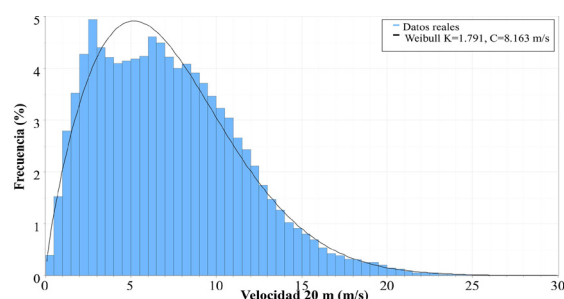


Fig. 3. Distribución Weibull de la velocidad del viento de la Ventosa, Oaxaca.

de viento Tehuano y la energía cinética de la corriente costera. Es decir, cuando se presentan estos vientos intensos del norte, se reduce la energía cinética de la corriente costera en el Istmo de Tehuantepec.

(Gallego et al., 2015), encontraron que a combinación de los efectos de canalización que generan vientos regionales característicos, y la influencia de sistemas meteorológicos a gran escala sobre la región, son los principales factores que generan ráfagas de viento.

En estudios más recientes, (Drew et al., 2018) deduce que las ráfagas son causadas por tres mecanismos meteorológicos principales; (1) velocidades de viento muy altas asociadas con un ciclón, (2) ráfagas asociadas con tormentas eléctricas y (3) banda organizada de convección después de un frente y de acuerdo con (Canepa et al., 2020); los fenómenos meteorológicos como frentes fríos, tormentas eléctricas también generan ráfagas extremas de viento.

En resumen, las ráfagas de viento en el Istmo de Tehuantepec son generadas por la combinación de diferencias de presión atmosférica entre el Golfo de México y el Océano Pacífico, junto con la topografía única del istmo que canaliza y acelera el flujo de aire, (Prósper et al., 2019).

La comprensión de estos fenómenos es crucial para diversos sectores, incluyendo la generación de energía eólica, la navegación marítima y la gestión de riesgos climáticos en la región del Istmo de Tehuantepec. Los estudios continúan profundizando nuestro conocimiento sobre estos eventos meteorológicos únicos y sus implicaciones para la zona.

Para el estudio de las ráfagas de viento en el Istmo de Tehuantepec, se utilizan modelos meteorológicos de alta resolución permiten simular la dinámica del

viento con precisión, teniendo en cuenta las complejas interacciones entre las condiciones meteorológicas y la topografía local. Estos son esenciales para la planificación y mitigación de los impactos de las ráfagas de viento extremas en la región.

2. Metodología

2.2 Recurso eólico del Istmo de Tehuantepec

2.2.1. Recopilación de Datos

Se recopilaban datos de velocidad del viento y eventos de ráfagas extremas de estaciones meteorológicas locales. Estos datos fueron analizados para identificar patrones de intensidad y frecuencia de las ráfagas de viento.

Desde junio de 2000, se registran datos de velocidad del viento en la estación meteorológica situada en el Centro Regional de Tecnología Eólica (CERTE) gestionada por el Instituto Nacional de Electricidad y Energías Limpias (INEEL). El registro de la base de datos se realizó con una frecuencia de muestreo de 1 Hz a una altura de 17.5m, utilizando un anemómetro Wind Master 3D con el que se asume la alta precisión de las mediciones, dado que los sensores de medición cumplen con la norma IEC 61400-12. (ver Figura 2.).

Con los datos recaudados se procedió a realizar el estudio del recurso eólico del emplazamiento a una altura de 20 m con un periodo de un año de medición de datos, los resultados se presentan en la Figura 3.

De acuerdo al estudio realizado se determinó un parámetro de forma de $K = 1.791$ y un parámetro escala $C = 8.163 \text{ m/s}$, con lo que se obtiene una velocidad media anual de 7.26 m/s y velocidades máximas de hasta 36.11 m/s .

2.2.2. Detección de ráfagas extremas de viento

Las mediciones de los sensores se someten a un análisis estadístico detallado para identificar patrones y características clave del viento y sus variaciones (ráfagas de viento). Además, se emplean modelos matemáticos para representar la variabilidad en la intensidad, duración y frecuencia de las ráfagas.

Los resultados muestran que las ráfagas extremas de viento en el Istmo de Tehuantepec pueden alcanzar velocidades superiores a los 150 km/h (40 m/s), con una frecuencia significativa durante la temporada de invierno. Estas ráfagas pueden durar desde unos pocos minutos hasta varias horas y generalmente se dirigen de norte a sur a lo largo del istmo.

Se determinaron 58 casos en un año de tormentas en el área donde se registraron velocidades de viento entre 15 y 37 m/s en un periodo de un día, dichos casos se muestran en la Figura 4. Por cada caso de tormenta se tiene la posibilidad de contener al menos una ráfaga extrema de viento, lo que equivale a 58 posibles ráfagas en un año de medición de datos por lo que se obtiene una probabilidad de que ocurrencia de ráfagas en un año del 15.8 %.

Para encontrar las posibles ráfagas se emplea un método de detección de ráfagas de viento de incremento de velocidad sobre un umbral modificado, caracterizado por su simplicidad y bajo costo computacional, como se detalla en (Branlard, 2009). El método se implementó mediante el software Matlab® utilizando la base de datos de velocidades del viento recopilados en el municipio de La Ventosa, Oaxaca, México. Mediante el código de detección se buscó ráfagas de viento $> 10\text{ m/s}$ y tuvieran una amplitud de $> 10\text{ m/s}$. Se detectaron las siguientes ráfagas EOG el día 16 de octubre del 2017, los resultados se presentan en la Figura 5.

La ráfaga EOG identificada alcanzó una velocidad máxima de 24 m/s y una velocidad de referencia de

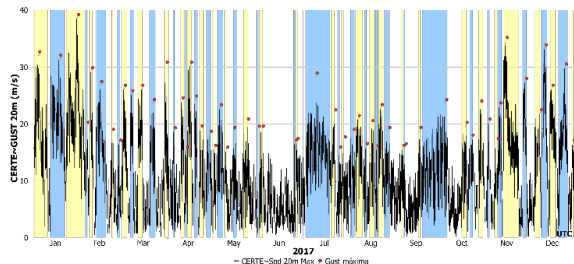


Fig. 4. Registro de posibles ráfagas del año 2017 del sitio la Ventosa, Oaxaca.

15.1 m/s, con una duración de 25 segundos. Al modelar la Ráfaga de acuerdo con la norma IEC 61400, se obtiene el modelo de la ráfaga representada en la Figura 6.

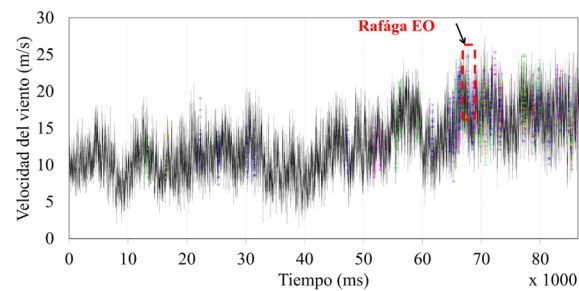


Fig. 5. Ráfagas Detectadas en un caso de tormentas.

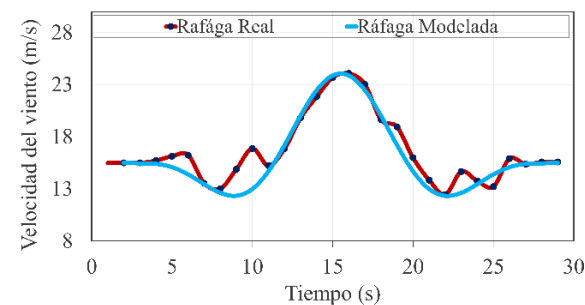


Fig. 6. Ráfaga extrema operativa detectada en un evento con condiciones de viento extremo.

3. Afectaciones de las ráfagas de viento

3.1 Impacto en la Infraestructura:

Las ráfagas de viento extremas en el Istmo de Tehuantepec tienen un impacto significativo en las infraestructuras de la región. Estos vientos pueden causar daños considerables en edificios, líneas eléctricas y otras estructuras debido a su intensidad y la fuerza con la que soplan. Además, las turbinas eólicas en la región pueden experimentar fluctuaciones en su rendimiento y enfrentar mayores cargas estructurales, lo que puede afectar su vida útil y eficiencia operativa. La seguridad de las infraestructuras de transporte, como carreteras y puentes, también puede verse comprometida durante estos eventos de viento extremo.

Los reportes de la zona sobre los impactos en la comunidad incluyen daños a la infraestructura, interrupciones en el suministro de energía eléctrica y peligros en el transporte carretero. Las ráfagas extremas de viento pueden causar daños a la infraestructura vial, incluidas la erosión del pavimento, la caída de ár-



Fig. 7 Impacto de las ráfagas extremas en el istmo de Tehuantepec Oaxaca.

boles y la destrucción de señales de tráfico. Además, los puentes pueden ser especialmente vulnerables a las ráfagas de viento debido a su exposición elevada y su diseño estructural. Las ráfagas de viento pueden derribar postes eléctricos, cables de energía y transformadores, causando interrupciones en el suministro eléctrico y representando un riesgo para la seguridad pública (vea la Figura 7).

3.2 Impacto en la energía eólica

En el contexto de la generación de energía eólica, las ráfagas de viento representan un desafío considerable para la estabilidad del sistema eléctrico y la precisión de los pronósticos (Gallego et al., 2015). Los resultados de los estudios realizados sugieren que cuando la masa de aire frío que penetra desde el norte en el lado del istmo del Golfo de México es lo suficientemente gruesa como para superar las montañas, se desarrollan eventos de viento extremo en el área durante los eventos de Tehuano más allá del chorro de viento de brecha. Entre ellos se encuentran flujos intensos y altamente turbulentos que pueden tener un impacto sustancial en la industria de parques eólicos existente en la región.

Por lo tanto, es muy importante saber cómo afectan estas variaciones de viento al rendimiento mecánico y eléctrico del aerogenerador para desarrollar una herramienta eficiente para evaluar y controlar todo el fenómeno. La influencia de las ráfagas de viento en varios sistemas de energía eólica es un tema de creciente interés para los ingenieros.

En un caso específico la ráfaga detectada, con una velocidad de referencia de 15 m/s y una velocidad

máxima de 25 m/s , excede significativamente el rango de operación nominal de los aerogeneradores típicos, que suelen funcionar de manera óptima entre 10 y 12 m/s . Esta situación plantea varios desafíos técnicos y operativos tales como:

1. **Estrés mecánico:** Las velocidades de viento que superan el rango de diseño pueden someter los componentes mecánicos del aerogenerador, como las palas, el eje principal y la caja de engranajes, a cargas dinámicas excesivas. Esto puede acelerar el desgaste de los materiales y potencialmente conducir a fallos estructurales si no se manejan adecuadamente.
2. **Sobrecarga eléctrica:** El generador y los sistemas eléctricos asociados pueden experimentar sobrecargas debido al exceso de energía producida durante estos eventos de alta velocidad. Esto podría resultar en sobrecalentamiento, desgaste prematuro de componentes eléctricos o incluso fallos en el sistema.
3. **Desafíos de control:** Los sistemas de control del aerogenerador pueden enfrentar dificultades para mantener una operación estable y segura bajo estas condiciones extremas. Esto podría resultar en fluctuaciones en la producción de energía o en la necesidad de paradas de emergencia frecuentes.
4. **Fatiga de materiales:** La exposición repetida a estas condiciones de viento extremas puede acelerar la fatiga de los materiales, reduciendo potencialmente la vida útil del aerogenerador.
5. **Riesgos de seguridad:** En casos extremos, si los sistemas de seguridad no responden adecuadamente, podría haber riesgos de daños estructu-

rales significativos o incluso fallo catastrófico del aerogenerador.

Las ráfagas extremas de viento pueden someter a los aerogeneradores a cargas dinámicas inesperadas. Esto puede acortar la vida útil del equipo y aumentar los costos de mantenimiento (Rafei et al., 2022). Durante las ráfagas extremas de viento, los operadores de parques eólicos a menudo optan por detener temporalmente la operación de los aerogeneradores para evitar daños (Zhou et al., 2022). Esto puede resultar en una producción intermitente de energía, lo que afecta la confiabilidad y la rentabilidad del proyecto.

3.3 Mitigación del impacto en la energía eólica

Las condiciones extremas del viento plantean desafíos de control en los sistemas de generación eólica, especialmente en sistemas de baja potencia. A diferencia de los sistemas a gran escala, que pueden manejar estas condiciones con su tamaño y dispositivos de regulación, los sistemas de baja potencia deben adaptarse a métodos de protección límite.

Para mitigar estos riesgos, se podrían considerar las siguientes estrategias:

1. Implementación de sistemas de control avanzados capaces de anticipar y responder a ráfagas extremas.
2. Diseño y uso de aerogeneradores específicamente adaptados para condiciones de viento extremo.
3. Desarrollo de protocolos de operación y mantenimiento que tengan en cuenta estas condiciones específicas del sitio.
4. Utilización de sistemas de predicción meteorológica de alta precisión para anticipar eventos de ráfagas extremas.
5. Investigación continua en materiales y diseños más resistentes para componentes críticos del aerogenerador.

Es crucial que los operadores y diseñadores de parques eólicos en regiones propensas a ráfagas extremas, como el Istmo de Tehuantepec, tomen en consideración estos factores para garantizar la seguridad, eficiencia y longevidad de las instalaciones eólicas (Pichault, 2022).

Conclusiones

El Istmo de Tehuantepec es una región de gran importancia para la generación de energía eólica debido a sus fuertes vientos, pero las ráfagas extremas representan un desafío significativo para la infraestructura eólica y las comunidades locales.

Las ráfagas de istmo son creadas por un fenómeno meteorológico llamado “Tehuantepecers” o “Tehuarnos”, causados por la interacción compleja entre sistemas de presión atmosférica y la topografía única del istmo, que actúa como un embudo natural acelerando los vientos, impulsando condiciones de vientos intensos que pueden causar daños considerables a las turbinas eólicas, edificios, líneas eléctricas y redes de transporte.

El estudio del recurso eólico en la región reveló velocidades medias anuales de 7.26 m/s , con velocidades máximas de hasta 36.11 m/s , indicando un alto potencial para la generación de energía eólica, pero también riesgos asociados a vientos extremos. Se identificó una probabilidad de ocurrencia de ráfagas extremas del 15.8 % en un año, lo que subraya la frecuencia y relevancia de estos eventos.

La ráfaga detectada excede significativamente el rango de operación nominal de los aerogeneradores típicos provocando diversas afectaciones entre las que se encuentran estrés mecánico, sobrecarga eléctrica, dificultades de control y fatiga acelerada de materiales, lo que puede reducir su vida útil y eficiencia.

Se proponen estrategias de mitigación que incluyen el desarrollo de sistemas de control avanzados, diseños de aerogeneradores adaptados a condiciones extremas, protocolos de operación específicos y el uso de sistemas de predicción meteorológica de alta precisión.

Este estudio contribuye significativamente a la comprensión de las ráfagas de viento extremas en la región y sienta las bases para el desarrollo de soluciones que permitan aprovechar el potencial eólico de manera sostenible y segura.

Referencias

Branlard, E. (2009). Wind energy: On the statistics of gusts and their propagation through a wind farm. ECN Wind Memo, 7, 5-9.

International Electrotechnical Commission. (2005). IEC 61400-1, Part 1: Design requirements.

- AMS, A. (2017). American Meteorological Society Glossary of Meteorology.
- McCreary, J. P., Jr, Lee, H. S., & Enfield, D. B. (1989). The response of the coastal ocean to strong offshore winds: With application to circulations in the Gulfs of Tehuantepec and Papagayo. *EliScholar – a Digital Platform for Scholarly Publishing at Yale*. https://elischolar.library.yale.edu/journal_of_marine_research/1923/
- Steenburgh, W. J., D. M. Schultz, and B. A. Colle. (1998). The structure and evolution of gap outflow over the Gulf of Tehuantepec, Mexico. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2673-2691.
- Jaramillo, O. A. y Borja, M. A. (2004). Análisis de la velocidad del viento en La Ventosa, México: Un caso de distribución de probabilidad bimodal, *Renewable Energy*, 29, 1613–1630, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.001>
- Brennan, M. J., Cobb, H. D., y Knabb, R. D (2010). Observaciones del Golfo de Eventos de viento en la Brecha de Tehuantepec de QuikSCAT: Un evento actualizado *Climatología y Evaluación del Modelo Operacional, Pronóstico del Tiempo.*, 25, 646–658, <https://doi.org/10.1175/2009WAF2222324.1>, A, B
- Velázquez-Muñoz, F., Martínez, J., Chavarme, C., Durazo, R., & Flament, P. (2011). Circulación costera forzada por el viento en el golfo de Tehuantepec, México. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-38802011000400006
- Gallego-Castillo, C., Garcia-Bustamante, E., Cuerva, A., & Navarro, J. (2015). Identifying wind power ramp causes from multivariate datasets: a methodological proposal and its application to reanalysis data. *IET Renewable Power Generation*, 9(8), 867–875. <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2014.0457>
- Drew, D. R., Barlow, J. F., & Coker, P. J. (2018). Identifying and characterising large ramps in power output of offshore wind farms. *Renewable Energy*, 127, 195–203. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.064>
- Canepa, F., Burlando, M., & Solari, G. (2020). Vertical profile characteristics of thunderstorm outflows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 206, 104332. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2020.104332>
- Prósper, M. A., Miguez-Macho, G., Dudhia, J., & Muñoz-Arriola, F. (2019). Downslope windstorm study in the Isthmus of Tehuantepec. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(7), 3857-3876. <https://doi.org/10.1029/2018JD029571>
- Prósper, M. A., Otero-Casal, C., Miguez-Macho, G., & Fernández-Cabán, P. L. (2019). Downslope windstorms in the Isthmus of Tehuantepec during the 2013 high-wind event. *Atmosphere*, 10(6), 319. <https://doi.org/10.3390/atmos10060319>
- Mathieu Pichault, Claire Vincent, Grant Skidmore, Jason Monty. (2022). LiDAR-based detection of wind gusts: An experimental study of gust propagation speed and impact on wind power ramps, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 220, 104864, ISSN 0167-6105, <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104864>.
- El Rafei, D., Santos, J. R., & Gan Chowdhury, A. (2022). Analysis of extreme wind gusts using a high-resolution reanalysis data set over Australia. *Atmosphere*, 13(4), 586. <https://doi.org/10.3390/atmos13040586>
- Zhou, X., Liu, J., Chen, J., Zuo, S., & Zhen, H. (2022). Analysis of extreme operating gust influence on aerodynamic performance of wind turbines. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.174>

Diseño y construcción del sistema electrónico de potencia para un aerogenerador

J. Benítez Ovando¹
J. A. Enríquez Santiago¹
E. Campos Mercado^{2*}

¹ División de Estudios de Posgrado
Universidad del Istmo

² CONAHCYT-Universidad del Istmo

Correspondencia:
*ecampos@conahcyt.mx

Palabras Clave:

Sistema Electrónico de Potencia,
Controlador PI no lineal, Energía Eólica

RESUMEN

El artículo aborda la conversión de la energía cinética del viento en electricidad mediante un aerogenerador. Se emplea un sistema electrónico de potencia que consta de un rectificador trifásico, convertidor buck y un inversor monofásico. El rectificador convierte la corriente alterna en corriente directa, El convertidor buck regula eficientemente el voltaje de entrada, mientras que el inversor monofásico produce una salida de corriente alterna sinusoidal. Se propone la implementación de un controlador PI no lineal en el convertidor buck para mejorar la regulación del voltaje. Los resultados experimentales evidencian el desempeño del sistema en la generación de electricidad a partir de recursos eólicos, destacando su aplicabilidad en sistemas independientes de red eléctrica.

ABSTRACT

The article presents the conversion of wind kinetic energy into electricity using a wind turbine. It employs an electronic power system consisting of a buck converter and a single-phase inverter. The buck converter efficiently regulates the input voltage, while the single-phase inverter produces a sinusoidal AC output. Implementing a nonlinear PI controller in the buck converter is proposed to enhance voltage regulation. Experimental results demonstrate the system's performance in electricity generation from wind resources, emphasizing its applicability in off-grid systems.

1. Introducción

El interés por aprovechar las energías renovables, como la energía eólica, en entornos residenciales ha ido en aumento debido a varios factores, como la conciencia ambiental creciente, los avances tecnológicos en aerogeneradores de baja potencia y la búsqueda de opciones energéticas descentralizadas y autónomas. Sin embargo, el diseño de los sistemas electrónicos de potencia para aerogeneradores de baja potencia representa un desafío tecnológico significativo, principalmente debido a la variabilidad en la velocidad del viento. En (Ramírez Gómez) se presenta un método para diseñar un convertidor buck y el desarrollo de un algoritmo de control, los cuales están asociados a un sistema de generación eólica que alimenta una carga aislada. En (Syahputra, 2022) se propone la investigación del rendimiento de un sistema de energía eólica autónomo equipado con un inversor de potencia de modulación de ancho de

pulso sinusoidal (SPWM) para el consumo doméstico en áreas rurales.

En la sección 2 se describe de manera general el sistema electrónico de potencia utilizado para el aprovechamiento de la energía eólica. El desarrollo del convertidor buck y el algoritmo de control implementado se presentan en la sección 3 y 4, respectivamente. En la sección 5 se describe el desarrollo de un inversor monofásico. Finalmente, en la sección 6 se muestran los resultados experimentales obtenidos.

2. Descripción del sistema

Existen diferentes tipos de aerogeneradores; sin embargo, desde un punto de vista práctico se puede decir que sus principales componentes son: un rotor eólico, un generador eléctrico y un sistema de electrónico de potencia. El sistema de orientación se encarga de aprovechar la energía cinética del viento y transferirla al generador eléctrico para generar electricidad. Es importante tener en cuenta que la energía eléctrica

producida puede variar en su intensidad y frecuencia debido a los cambios en la velocidad del viento, en consecuencias, es necesario implementar un sistema electrónico de potencia para genera la señal eléctrica con las especificaciones necesarias para su aplicación. En la Figura 1 se muestra el esquema general de un aerogenerador de eje horizontal de baja potencia.



Fig. 1 Aerogenerador de eje horizontal.

El sistema convertidor electrónico de potencia es un conjunto de dispositivos implementados para modificar y controlar diversas características de la energía eléctrica producida. Por ejemplo, la forma de la onda, la amplitud, la frecuencia, entre otras características según su aplicación. En este caso de estudio el sistema electrónico de potencia está formado por un convertidor CA-CC, un convertidor CC-CC y un convertidor CC-CA.

El convertidor de CA-CC, también conocido como rectificador, es un dispositivo que transforma la Corriente Alterna (CA), que cambia de dirección periódicamente, en Corriente Continua (CC), la cual fluye en una única dirección. Evidentemente, esta característica está directamente relacionada a la señal de voltaje, por lo cual el objetivo principal de utilizar un rectificador es convertir la señal de voltaje alterno en una señal de voltaje directo para su aplicación en el convertidor CC-CA. Sin embargo, es importante mencionar que es necesario implementar un convertidor CC-CC para resolver el problema de regulación de voltaje. En (Mohan, 2002) se menciona que existen varios tipos de convertidores CC-CC y se describe detalladamente su funcionamiento. Sin embargo, los más comunes son: el convertidor buck (reductor), el convertidor boost (elevador) y la combinación convertidora buck-boost (reductor elevador). Considerando las especificaciones técnicas de operación del convertidor CC-CA se ha desarrollado un convertidor

buck. Los detalles de diseño de dicho convertidor se describen en la siguiente sección.

Finalmente, para producir la señal sinusoidal con la amplitud y frecuencia definida por el sistema eléctrico, se utiliza un convertidor de CC a CA, comúnmente conocido como inversor. En (Rashid, 2013) se describe la importancia de este tipo de convertidores como parte esencial de los sistemas electrónicos de potencia, ya que permite alimentar dispositivos que requieren CA a partir de fuentes de energía que suministran CC. En la sección 5 se muestra el desarrollo del inversor monofásico implementado en este trabajo.

3. Convertidor Buck

Se ha empleado un convertidor buck con el objetivo de controlar el voltaje de salida $v_{out}(t)$ a un nivel inferior que el del voltaje de entrada $v_{in}(t)$. El circuito eléctrico de dicho convertidor se muestra en la Figura 2, donde D representa el ciclo de trabajo de la señal PWM con la que se controla la operación del interruptor de potencia (T_{MOSFET}). El resto de los componentes son: un diodo (d), una bobina (L), un capacitor (C) y la carga resistiva (R).

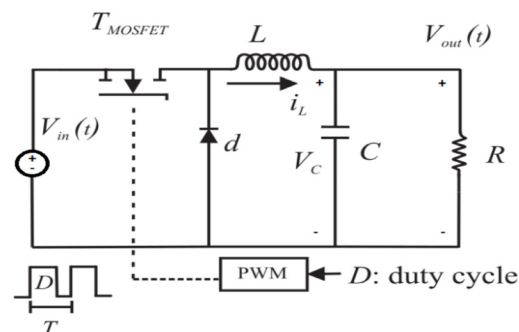


Fig. 2 Topología del convertidor buck.

Tabla 1. Parámetros de diseño.

| | |
|--|---------------|
| Voltaje de entrada (V_{in}) | 60V |
| Voltaje de referencia (V_{ref}) | 36V |
| Potencia máxima (P_{out}) | 100W |
| Frecuencia de conmutación (f_{sw}) | 30kHz |
| Corriente de rizo (ΔI_L) | $0.2I_L$ |
| Voltaje de rizo (ΔV_{out}) | $0.01V_{out}$ |

Considerando las ecuaciones generales descritas en (Kazimierczuk, 2015) para determinar los valores del ciclo de trabajo (D), el inductor (L) y el capacitor (C), se tiene que:

$$D = \frac{V_{ref}}{V_{in}} = \frac{36V}{60V} = 0.6 \quad (1)$$

mientras que el valor del inductor se determina mediante la siguiente ecuación:

$$L = \frac{V_{ref}(1-D)}{\Delta I_L f_{sw}} = \frac{V_{ref}(1-D)}{0.2 \left(\frac{P_{out}}{V_{ref}} \right) f_{sw}} = 2040 \times 10^{-6} H \quad (2)$$

Para calcular el valor del capacitor se tiene:

(3)

Bajo condiciones nominales, el voltaje de salida del convertidor buck tendría que alcanzar el valor de referencia de 36V, lo cual mostraría un funcionamiento adecuado de todos los componentes y el diseño general del convertidor.

En la Figura 3 se observa que el convertidor buck desarrollado para el sistema electrónico de potencia ilustrado en la Figura 1. Cabe mencionar que el diseño PCB del convertidor buck fue desarrollado en la plataforma ISIS PROTEUS, con el objetivo de incorporar todos sus componentes y el microcontrolador Arduino DUE en una sola tarjeta.



Fig. 3 Convertidor buck desarrollado para aplicaciones eólicas.

4. Algoritmo de control

La principal función del microcontrolador Arduino DUE es procesar el algoritmo de control, para generar la señal PWM que manipula la operación del interruptor de potencia, como se ilustra en la Figura 4.

Existen diversas estrategias de control que se han implementado en sistemas de convertidores reduc-

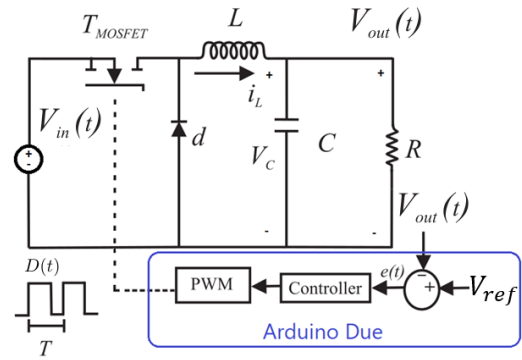


Fig. 4 Operación del convertidor buck con microcontrolador Arduino DUE.

tores. Sin embargo, los controladores proporcionales-integrales (PI) son los más adoptados en entornos industriales debido a su simplicidad para su implementación y bajo costo computacional.

La expresión matemática de un controlador PI clásico está definida por la siguiente ecuación:

$$U_{PI} = k_1 e(t) + k_2 \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (4)$$

donde k_1 y k_2 representan la ganancia proporcional e integral, respectivamente. Mientras que $e(t)$ representa el error, el cual está definido como:

$$e(t) = V_{ref} - V_{out} \quad (5)$$

Ahora, se propone implementar en cada término del controlador PI una función de saturación, definida por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{b_i}(k_i h_i) = \begin{cases} b_i & \text{if } k_i h_i > b_i \\ k_i h_i & \text{if } |k_i h_i| \leq b_i \\ -b_i & \text{if } k_i h_i < -b_i \end{cases} \quad (6)$$

donde k_i es la ganancia, b_i es el parámetro elegido para limitar los valores de cualquier función representada por h_i , para todo $i = 1, 2$. Obsérvese que h_1 y h_2 representan el error y su integral, respectivamente. Entonces, el controlador PI definido por la ecuación (4) puede ser modificado de la siguiente manera:

$$U_{NLPI} = \sigma_{b_1} \left[k_1 e(t) \right] + \sigma_{b_2} \left[k_2 \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (7)$$

Reescribiendo la ecuación anterior como:

$$U_{NLPI} = \sum_{i=1}^2 u_i \quad (8)$$

donde $u_i = \sigma_{bi}(k_i h_i)$ representa la saturación de la acción de control proporcional e integral, respectivamente. Con base a la ecuación (6), se tiene que u_i puede reescribirse de la siguiente manera:

$$u_i = \begin{cases} \text{sign}(h_i) \bar{b}_i & \text{if } |k_i h_i| > \bar{b}_i k_i h_i \\ \leq \bar{b}_i \end{cases} \quad (9)$$

Ahora, consideremos el punto h_i donde $|u_i| = \bar{b}_i$, se obtiene:

$$|u_i| = |k_i h_i| = \bar{b}_i \Rightarrow |h_i| = \frac{\bar{b}_i}{k_i} \quad (10)$$

para lo cual se define:

$$d_i := \frac{\bar{b}_i}{k_i} \quad (11)$$

Entonces, considerando las ecuaciones anteriores se tiene:

$$u_i = \text{sign}(h_i) \bar{b}_i \forall |h_i| > d_i \quad (12)$$

De acuerdo con las ecuaciones (11) y (12), podemos expresar la ecuación (9) de la siguiente manera:

$$u_i = \begin{cases} \text{sign}(h_i) \bar{b}_i & \text{if } |h_i| > d_i \\ \bar{b}_i d_i^{-1} & \text{if } |h_i| \leq d_i \end{cases} \quad (13)$$

donde los parámetros de sintonización del controlador son \bar{b}_i y d_i , $\forall i = 1, 2$. Para expresar la ecuación (13) en términos de h_i , cuando $h_i > d_i$, se obtiene:

$$\text{sign}(h_i) \bar{b}_i = h_i \text{sign}(h_i) \bar{b}_i h_i^{-1} \quad (14)$$

donde:

$$\text{sign}(h_i) \bar{b}_i = |h_i| \bar{b}_i h_i^{-1} \quad (15)$$

y considerando $|h_i| h_i^{-1} = |h_i|^{-1} h_i$, la ecuación (11) quedaría de la siguiente forma:

$$u_i = \begin{cases} \bar{b}_i h_i^{-1} h_i & \text{if } |h_i| > d_i \\ \bar{b}_i d_i^{-1} h_i & \text{if } |h_i| \leq d_i \end{cases} \quad (16)$$

Observe, que el valor máximo de la entrada de control está limitado por los parámetros \bar{b}_1 y \bar{b}_2 ; así que se propone que el parámetro de saturación \bar{b}_i , de la ecuación (16), varíe de la siguiente forma:

$$\bar{b}_i = \begin{cases} b_i |h_i|^{\mu_i} & \text{if } |h_i| > d_i \\ b_i d_i^{\mu_i} & \text{if } |h_i| \leq d_i \end{cases} \quad (17)$$

$$\forall i = 1, 2 \text{ y } u_i \in [0, 1]$$

Entonces, al introducir la ecuación (17) en la ecuación (16), se tiene:

$$u_i = \begin{cases} b_i |h_i|^{\mu_i} |h_i|^{-1} h_i & \text{if } |h_i| > d_i \\ b_i d_i^{\mu_i} d_i^{-1} h_i & \text{if } |h_i| \leq d_i \end{cases} \quad (18)$$

$$\forall i = 1, 2 \text{ y } u_i \in [0, 1]$$

Finalmente, a partir de la ecuación (18), se obtiene el controlador PI no lineal de la siguiente manera:

$$U_{NLPI} = u_1 + u_2 = k_1(\cdot) e(t) + k_2(\cdot) \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (19)$$

con:

$$k_1(\cdot) = \begin{cases} b_1 |e(t)|^{(\mu_1-1)} & \text{if } |e(t)| > d_1 \\ b_1 d_1^{(\mu_1-1)} & \text{if } |e(t)| \leq d_1 \end{cases} \quad (20)$$

$$k_2(\cdot) = \begin{cases} \bar{b}_2 \left| \int_0^t e(\tau) d\tau \right|^{(\mu_2-1)} & \text{if } \left| \int_0^t e(\tau) d\tau \right| > d_2 \\ \bar{b}_2 d_2^{(\mu_2-1)} & \text{if } \left| \int_0^t e(\tau) d\tau \right| \leq d_2 \end{cases} \quad (21)$$

$$\forall \mu_1, \mu_2 \in [0, 1]$$

5. Inversor monofásico

Una vez implementado al algoritmo de control en el convertidor buck para resolver el problema de regulación de voltaje, se incorpora al sistema electrónico de potencia un convertidor CC-CA, que en este caso es un inversor monofásico. Estos dispositivos pueden controlar la frecuencia y el voltaje de salida según las necesidades específicas de la carga. Los inversores monofásicos están diseñados para ser eficientes y confiables, proporcionando una salida de onda sinusoidal pura o modificada que es adecuada para una amplia variedad de equipos y aplicaciones hogareñas e industriales (Mohan, 2002).

En la Figura 5 se muestra el diagrama de un inversor monofásico de puente completo, donde se puede apreciar la etapa de filtrado y el bloque que representa la técnica de conmutación o control que se requiere para genera la señal PWM. Dicha señal manipula la operación de los interruptores S_1 , S_2 , S_3 y S_4 , los cuales permiten invertir la polaridad para genera una señal de corriente alterna.

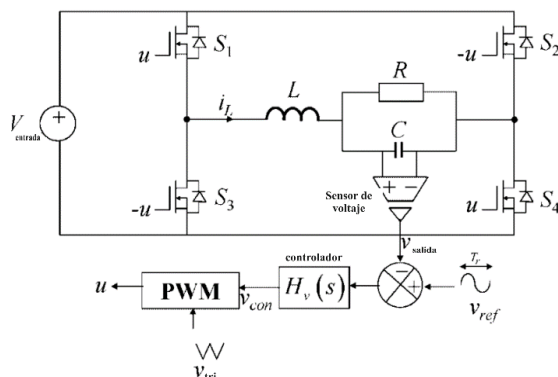


Fig. 5 Diagrama en lazo cerrado de un inversor monofásico de puente completo.

Actualmente en el mercado existen una amplia variedad de inversores monofásicos de baja potencia; sin embargo, la mayoría solo producen una señal sinusoidal modifica, la cual prácticamente es una señal cuadrada. El principal problema de este tipo de onda es que degrada la calidad de la energía producida. Por lo tanto, realizando una integración de sistemas se desarrolló un inversor monofásico que genera una señal alterna lo más cercano posible a una señal sinusoidal.

Uno de los principales componentes implementado para el desarrollo del inversor monofásico es el

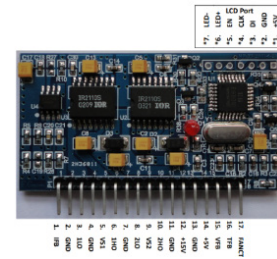


Fig. 6 Módulo EG8010 con técnica de modulación SPWM.



Fig. 7 Inversor monofásico diseñado en ISIS PROTEUS.

módulo EG8010, mostrado en la Figura 6, el cual ha sido fabricado con la técnica de modulación SPWM Unipolar, más detalles ver (Mohan, 2002). Una de las principales características de esta técnica de modulación es que los interruptores del inversor de puente completo operan en pares: cuando un par está cerrado, el otro está abierto. Por otro lado, el EGS002 es una placa específica diseñada para inversores de onda sinusoidal pura. Utiliza el chip de control ASIC EG8010 y el chip controlador IR2110S. Este circuito integrado contiene funciones de protección de voltaje, corriente y temperatura, cuenta con indicadores LED de advertencia y control de ventilador. El puente de salida configura la corriente alterna a 50/60 Hz, con modo de inicio suave y tiempo muerto para mejorar el desempeño de los interruptores de potencia. Finalmente, en la Figura 7 se muestra el inversor monofásico diseñado para completar el sistema electrónico de potencia ilustrado en la Figura 1.

6. Resultados experimentales

El desarrollo de las pruebas experimentales se realizó conectando en serie los tres convertidores electrónicos de potencia, como se muestra en la Figura 8. Note, que el rectificador trifásico SANREX 150A es un dispositivo que se adquirió, de las opciones que están disponibles en el mercado, considerando las características técnicas del generador eléctrico.



Fig. 8 Sistema electrónico de potencia desarrollado para la aplicación en un aerogenerador de baja potencia.

En la Figura 9 se muestra la señal de voltaje producida al conectar el rectificador trifásico SANREX 150A al generador eléctrico. Observe que la señal de voltaje es positiva, pero con magnitud variable. Posteriormente, este voltaje es procesado por un convertidor CC-CC, que en este caso es un convertidor buck, con la finalidad de regular el voltaje con el que se alimentará el convertidor CC-CA.

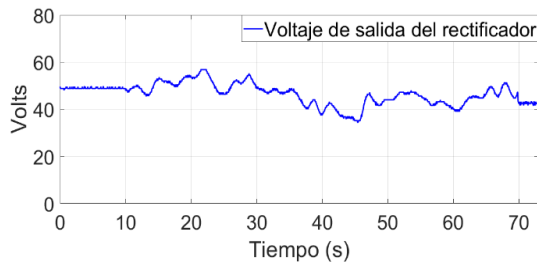


Fig. 9 Señal producida por el puente rectificador trifásico de diodos SANREX 150A.

El resultado obtenido al implementar el algoritmo de control PI no lineal en el convertidor buck se muestra en la Figura 10. Note, que el voltaje de salida alcanza el valor de referencia y permanece constante, cumpliendo con las condiciones necesarias para alimentar al inversor monofásico.

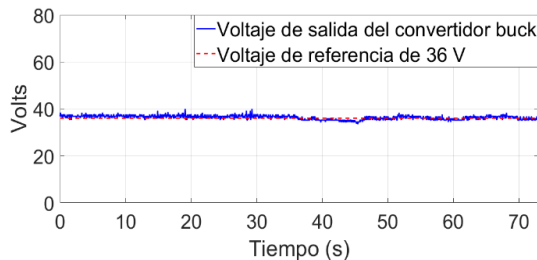


Fig. 10 Voltaje de salida del convertidor buck, implementando el controlador PI no lineal.

Finalmente, se utiliza un transformador en la salida del inversor monofásico para incrementar la amplitud del voltaje alterno. Como carga se empleó un ventila-

dor de 120W. La forma de onda sinusoidal generada por el sistema electrónico de potencia desarrollado para aplicaciones en aerogeneradores de baja potencia se muestra en la Figura 11. En dicha figura se puede observar que el periodo es de 0.016 segundos, lo que implica que la frecuencia de la señal generada es de 60 Hz, el estándar utilizado en el sistema eléctrico.

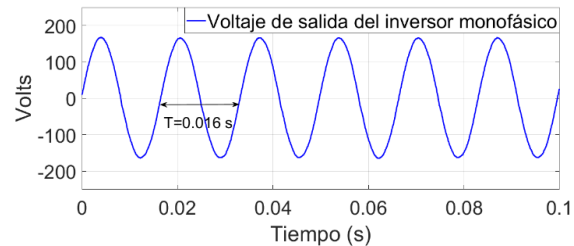


Fig. 11 Voltaje de salida del transformador eléctrico conectado al inversor monofásico.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos, se puede afirmar en términos generales que el sistema electrónico de potencia diseñado y desarrollado para aerogeneradores de baja potencia, cumple con las características eléctricas que especifica el sistema eléctrico. El algoritmo de control PI no lineal propuesto demuestra una notable robustez frente a las variaciones de voltaje en la entrada del convertidor buck, asegurando de manera efectiva el correcto funcionamiento del inversor monofásico.

El desarrollo de un sistema electrónico de potencia con arquitectura abierta facilita la validación de diversas técnicas de control y el análisis del impacto del tipo de generador eléctrico, el diseño del rotor eólico y las variaciones en la velocidad del viento. En resumen, proporciona una plataforma experimental continua para avanzar en el desarrollo de aerogeneradores de baja potencia.

Referencias

- Afarulrazi, A. B. (2010). FPGA implementation of Unipolar SPWM for single phase inverter. International Conference on Computer Applications and Industrial Electronics (págs. 671-676). IEEE.
- Batarseh, I. &. (2008). Pwer Electronics.
- Campos-Mercado, E. M.-S.-M.-H.-O.-E.-M. (2021). Nonlinear Controller for the Set-Point Regulation of a Buck Converter System. *Energies*, 19.

- corp., E. m. (2014). EGS002 Sinusoid Inverter Driver Board User Manual. Shangai: www.EGmicro.com.
- corp., E. m. (s.f.). EG8010 DATASHEETS.
- Hart, D. W. (2018). Power Electronics.
- Kazimierczuk, M. K. (2015). Pulse-width modulated DC-DC power converters. Wiley and Sons.
- Mohan, N. U. (2002). Power Electronics: Converters, Applications, and Design.
- Ramírez Gómez, C. (. (s.f.). Metodología para el diseño de un convertidor DC-DC aplicado a aerogeneradores de baja potencia. UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA.
- Rashid, M. H. (2013). Power Electronics: Circuits, Devices and Applications.
- Syahputra, R. P. (2022). Performance investigation of standalone wind power system equipped with sinusoidal PWM power inverter for household consumer in rural areas of Indonesia. ELSERVIER, 17.

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
- Doctorado en Ciencias e Ingeniería en Energía

- Licenciatura en Ciencias Empresariales
- Licenciatura en Derecho
- Licenciatura en Desarrollo de Software y Sistemas Inteligentes
- Ingeniería en Logística y Cadena de Suministros
- Licenciatura en Comercio Exterior y Gestión de Aduanas

- Licenciatura en Nutrición
- Licenciatura en Enfermería



Instituto de Estudios de la 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