



UJAT

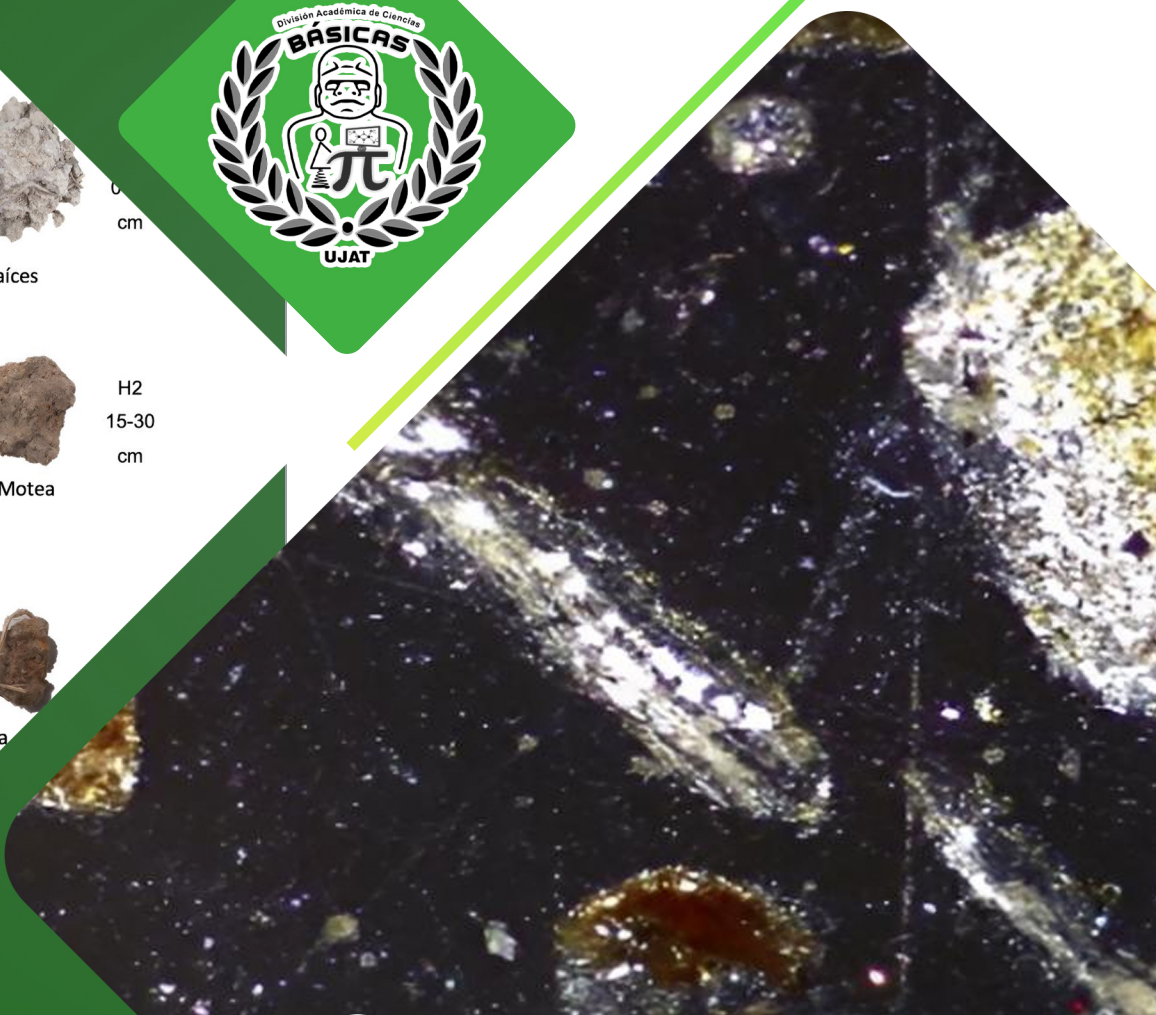
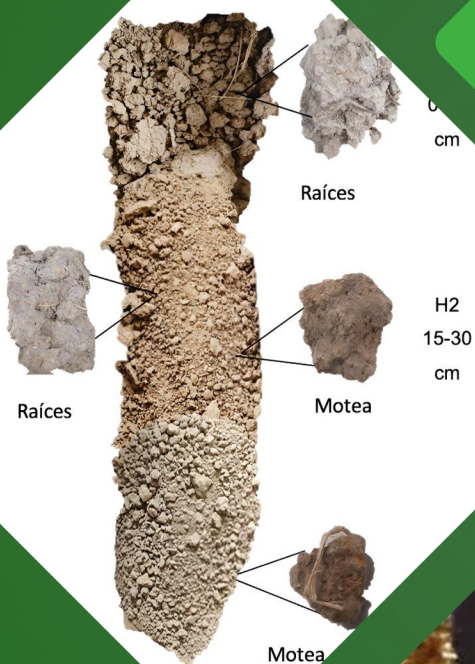
UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO

“ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE”

JOB π S

Journal of Basic Sciences

DACB • UJAT



Nos complace presentar el número 31 del Journal of Basic Sciences, con un conjunto de investigaciones sobre diversas problemáticas ambientales, geocientíficas y tecnológicas, presentes tanto en el estado de Tabasco como en otras regiones del país. A lo largo de las temáticas abordadas en este número, se reflejan los desafíos que generan las actividades humanas sobre el medio ambiente, así como la necesidad de generar soluciones sustentables a partir del conocimiento que se genera en las ciencias básicas y que es aplicado en el desarrollo de tecnologías. El enfoque multi e interdisciplinario característico de esta revista, se refleja al integrar elementos de la química, la física aplicada y las matemáticas, hacia áreas tan diversas como la geografía, la geología, las ciencias ambientales o la biotecnología; ofreciendo un panorama del estado actual de problemáticas específicas y proponiendo al mismo tiempo rutas de acción viables desde una perspectiva técnica, económica y ambiental.

En primer término, se presenta un estudio enfocado a las islas de calor urbano en Villahermosa, Tabasco, en donde a partir de un crecimiento urbano desordenado y la reducción de la cobertura vegetal se han intensificado significativamente las temperaturas locales. Esta situación pone de manifiesto la importancia de incorporar criterios de planificación ecológica en el desarrollo urbano. Por otro lado, se incluye también una evaluación geoquímica de sedimentos lacustres en regiones de San Luis Potosí y Zacatecas, con el objetivo de identificar la concentración y el comportamiento de elementos de tierras raras, con este estudio se aportan datos importantes que permiten entender la evolución geológica de los depósitos sedimentarios analizados, lo que lleva a valorar el potencial económico que representan.

De la misma forma, se presentan dos estudios vinculados a la problemática ambiental generada por la industria petrolera en el estado de Tabasco. Por un lado, se realizó una revisión sistemática de técnicas de remediación contaminados con hidrocarburos, con la finalidad de evaluar su aplicabilidad en función de factores tales como el tipo de suelo, el equipo requerido y la viabilidad. Por otro lado, se exponen los resultados de un estudio realizado en Nacajuca, Tabasco, cuya finalidad fue establecer las alteraciones en el suelo a causa de la contaminación por hidrocarburos, identificando efectos negativos en composición química, estructura y fertilidad.

Así mismo, se incluye una propuesta para aprovechar subproductos agroindustriales generados en Tabasco, implementándolos en procesos de biorremediación, con la finalidad de transformar residuos en insumos útiles para el desarrollo de prácticas sostenibles, con un enfoque de economía circular. Finalmente, se presenta una contribución encaminada a analizar un sistema de celda conectada a un convertidor, desde la perspectiva de la estabilidad energética. Mediante técnicas de control basadas en pasividad, se logra mejorar el rendimiento y comportamiento dinámico del sistema, encaminado a mejorar el desarrollo de tecnologías más limpias y eficientes.

En conjunto, las contribuciones incluidas en este número son una muestra de los distintos esfuerzos encaminados a enfrentar los retos ambientales y tecnológicos actuales, mediante el uso del conocimiento científico y la innovación aplicada, ampliando el entendimiento de fenómenos complejos e impulsando la búsqueda de soluciones prácticas y sostenibles

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

Lic. Guillermo Narváez Osorio.
Rector

Dr. Luis Manuel Hernández Govea.
Secretario de Servicios Académicos

Dr. Wilfrido Miguel Contreras Sánchez.
Secretario de Investigación, Posgrado y Vinculación

Dr. Pablo Marín Olán. Director de Difusión,
Divulgación Científica y Tecnológica

Directorio Divisional División Académica de Ciencias Básicas

Dra. Hermicenda Pérez Vidal.
Directora

Dr. Luis Manuel Martínez González.
Coordinador de Investigación

M.C. Abel Cortazar May.
Coordinador de Docencia

L.Q. Esmeralda León Ramos.
Coordinador de Difusión Cultural y Extensión

CONSEJO EDITORIAL

- **Dr. Carlos Ernesto Lobato García.** Editor en Jefe. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0003-3734-7780>
- **Dr. Adib Abiu Silahua Pavón.** Gestor Editorial. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0001-5344-1430>

COMITÉ EDITORIAL

- **Mtra. Claudia Gisela Vázquez Cruz.** Editora Asociada. Actuaría. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0009-0002-1791-5621>
- **Mtra. María Hortensia Almaguer Cantú.** Editora Asociada. Ciencias de la Computación. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0009-0007-7839-9014>
- **Dr. José Arnold González Garrido.** Editor Asociado. Ciencias Farmacéuticas. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://orcid.org/0000-0003-1135-4050>
- **Dr. José Luis Benítez Benítez.** Editor Asociado. Física. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. <https://orcid.org/0009-0000-0561-5029>
- **Mtro. Guillermo Chávez Hernández.** Editor Asociado. Geofísica. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0002-3555-9678>
- **Dra. Addy Margarita Bolívar Cimé.** Editora Asociada. Matemáticas. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0002-7342-0888>
- **Dra. Nancy Romero Ceronio.** Editora Asociada. Química. DACB, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, <https://orcid.org/0000-0001-8169-3811>

JOURNAL OF BASIC SCIENCES, Vol. 11, Núm. 31, agosto de 2025, es una publicación continua cuatrimestral, editada por la División Académica de Ciencias Básicas de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, C.P. 86040, Villahermosa Tabasco, México. Tel. (+52) (933) 358 1500 Ext. 5040. <https://revistas.ujat.mx/index.php/jobs>. Editor Responsable de la Revista: Carlos Ernesto Lobato García. Reserva de derechos al uso exclusivo 04-2015-052110084000-203, ISSN: 2448-4997, ambos otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Av. Universidad S/N, Zona de la Cultura, Col. Magisterial, Centro, Tabasco. C.P. 86040. Fecha de última actualización, 30 de enero de 2025.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación y de esta Casa Editora.

Las publicaciones respaldadas con el sello editorial de la UJAT no podrán utilizarse para entrenar modelos de IA generativa, a menos de que haya una declaración expresa, tanto de la Universidad como de los autores y/o herederos.

CONTENIDO

	Pág.
Islas de Calor Superficial Urbano en México: Caso de estudio, Villahermosa, Tabasco	1-8
Evaluación de Tierras Raras en sedimentos lacustres, Mesa Central Norte entre San Luis Potosí y Zacatecas, México	9-17
Factibilidad de los diversos tratamientos para derrames de hidrocarburos en suelos en el Estado de Tabasco	18-35
Análisis geoquímico de acumulación de hidrocarburos en suelos de Tucta, Nacajuca	36-51
Valor agregado a residuos agroindustriales como alternativa en la biorremediación de suelos	52-61
Efecto de un control basado en pasividad en un sistema celda-convertidor	62-75

Efecto de un control basado en pasividad en un sistema celda-convertidor

Vidal-Fuentes J.R.¹, Blé G.^{1,*}, Olmos-López J. A.²

¹División Académica de Ciencias Básicas, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, c.p. 86690, Km. 1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, Col. La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México.

²División Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, c.p. 86690, Km. 1 Carretera Cunduacán-Jalpa de Méndez, Col. La Esmeralda, Cunduacán, Tabasco, México.

*gble@ujat.mx

Resumen

En este trabajo se estudia el sistema de un convertidor elevador acoplado con una celda solar como fuente de energía. El estudio se aborda desde el análisis de estabilidad local de las tres ecuaciones diferenciales que modelan el sistema y posteriormente se aplica el control por moldeo de energía basado en pasividad para determinar la estabilidad global del sistema. Usando este control se estudia el modelo matemático y se comparan los resultados de la simulación con los obtenidos experimentalmente.

Palabras claves: control basado en pasividad; convertidor elevador; estabilidad global.

Abstract

In this work, the system of a boost converter coupled with a solar cell as a power source is studied. The study is approached from the local stability analysis of the three differential equations that model the system. Then the energy shaping control based on passivity is applied to determine the global stability of the system. Using this control, the mathematical model is studied and the simulation results are compared with those obtained experimentally.

Keywords: Passivity-based control; boost converter; global stability.

Recibido: 19 de diciembre de 2024. Aceptado: 10 de junio de 2025. Publicado: 22 de agosto de 2025.

1. Introducción

En la actualidad el uso de fuentes de energías no renovables, como aquellas que se basan en la quema de combustible, nos alientan a buscar mejores alternativas para reducir la contaminación y el impacto ambiental [9] y [13]; de esta forma contribuir con el desarrollo sustentable de nuestro planeta [12]. Por lo anterior, el uso de generadores fotovoltaicos por medio de paneles solares resulta un tema de estudio trascendental, ya que su uso ayuda a reducir el impacto ambiental [5]. Sin embargo, las variaciones de energía debido a lo que se conoce como condiciones no óptimas en las celdas solares, las cuales incluyen sombras parciales, baja incidencia solar y acumulación de polvo, motivan el estudio del efecto de control en un sistema celda-convertidor para obtener un mejor rendimiento del mismo [16]. Con la finalidad de aprovechar al máximo la irradiancia solar, se han desarrollado trabajos para seguir la trayectoria del sol [7, 11]. De igual forma se han desarrollado diferentes topologías de convertidores con el propósito de mantener un voltaje elevado estable [14, 2]. Actualmente los sistemas que aprovechan la energía fotovoltaica para alimentar diferentes equipos

utilizan controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), los cuales siguen la metodología de sintonización de Ziegler-Nichols o similares, que no requieren el modelo matemático del sistema. Sin embargo, deben ser ajustados en función de un rango de operación definido previamente, utilizando modelos matemáticos promediados [3].

Una herramienta importante para el estudio del rendimiento de los sistemas, son las ecuaciones diferenciales; ya que a través de éstas, se pueden plantear modelos matemáticos que brindan información acerca del comportamiento de los elementos del sistema fotovoltaico y con base en los resultados, se pueden tomar decisiones para diseñar el controlador a utilizar, que permita mejorar el rendimiento del sistema.

El objetivo de este trabajo es analizar la dinámica de un sistema de ecuaciones diferenciales asociado a un convertidor elevador acoplado con una celda solar como fuente de energía. Se presenta el diseño de un control basado en pasividad para el sistema, el cual garantiza la estabilidad asintótica. Así mismo éste se modifica para incrementar la velocidad de convergencia hacia el punto de equilibrio, mejorando los resultados obtenidos usando control deslizante en [1]. El modelo se adapta de tal manera que permite analizar el voltaje de salida ante variaciones en la fuente de entrada o incidencia solar. Así mismo se determina un control que permite mantener un voltaje de salida estable ante variaciones en la carga.

2. Análisis de estabilidad del modelo

2.1. Sistema en Lazo Abierto

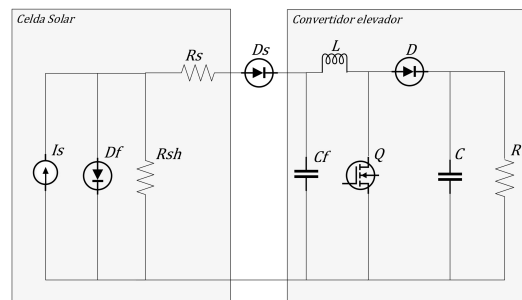


Figura 1: Diagrama esquemático de un convertidor elevador con una celda solar como fuente de energía.

El modelo matemático del diagrama anterior se obtiene aplicando la teoría electrónica de análisis de nodos y mallas al sistema estudiado. Dicho análisis para obtener las ecuaciones se puede consultar en [1] y [4].

El siguiente sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias modela el sistema de la figura 1:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{cf} &= \frac{I_{sc}}{C_f} - \frac{I_L}{C_f} - \frac{V_{cf}}{R_f C_f}, \\ \dot{I}_L &= \frac{V_{cf}}{L} - \frac{\bar{U} V_C}{L}, \\ \dot{V}_C &= \frac{\bar{U} I_L}{C} - \frac{V_C}{RC}. \end{aligned} \quad (1)$$

Donde V_{cf} es el voltaje del capacitor de acoplamiento, I_L es la corriente del inductor, V_C es el voltaje de salida del convertidor, I_{sc} es la corriente en corto circuito de la celda, C_f es el capacitor de acoplamiento, $\bar{U} = 1 - d$ es la señal de control que genera la secuencia de conmutación que enciende y apaga el interruptor Q , d es el ciclo de trabajo del modulador PWM (Pulse Wide Modulation), L es el inductor del convertidor, C es el capacitor de salida, R es la carga del sistema y $R_f = \frac{V_{oc}}{I_{sc}}$ donde V_{oc} es el voltaje en circuito abierto de la celda solar (todos los parámetros del sistema son no negativos).

Teniendo en cuenta que $\bar{U}$ conmuta con un ciclo de trabajo constante cuando el sistema (1) no es retroalimentado, entonces se tiene un campo vectorial lineal y su comportamiento lo determina la matriz exponencial. Para iniciar con el análisis de este sistema, se calculan los puntos de equilibrio igualando cada una de las ecuaciones a cero [10]. Por lo tanto, los puntos de equilibrio deben de satisfacer el siguiente sistema:

$$\begin{bmatrix} 1 & R_f & 0 \\ 1 & 0 & -\bar{U} \\ 0 & \bar{U}R & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cf} \\ I_L \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{sc}R_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Ya que el determinante de la matriz cuadrada de la izquierda es $\bar{U}^2 R + R_f$, tenemos una matriz no singular, y por ende un único punto de equilibrio solución del sistema (2). Resolviendo se obtiene

$$\begin{aligned} V_{cf} &= I_{sc}R_k, \\ I_L &= \frac{I_{sc}R_k}{R\bar{U}^2}, \\ V_c &= \frac{I_{sc}R_k}{\bar{U}}, \end{aligned}$$

donde

$$R_k = \left[\frac{1}{\frac{R}{R_f}\bar{U}^2 + 1} \right] \bar{U}^2 R,$$

e I_{sc} corresponde a la corriente en corto circuito de la celda solar.

Al hacer uso de R_k para simplificar las expresiones del punto de equilibrio, se puede notar que en estado estacionario el valor del voltaje de V_c es mayor al voltaje que corresponde a V_{cf} , puesto que $0 < \bar{U} < 1$. Esto se debe a la acción del convertidor elevador.

Para estudiar la estabilidad del sistema se realiza el siguiente cambio de coordenadas, el cual traslada el punto de equilibrio al origen,

$$\begin{aligned} V_{cf} &= \tilde{V}_{cf} + I_{sc}R_k, \\ I_L &= \tilde{I}_L + \frac{I_{sc}R_k}{R\bar{U}^2}, \\ V_c &= \tilde{V}_c + \frac{I_{sc}R_k}{\bar{U}}. \end{aligned}$$

Ahora las nuevas variables que aparecen con una tilde representan los cambios de corriente y voltaje alrededor del punto de equilibrio. El siguiente sistema de ecuaciones diferenciales, el cual se encuentra escrito de forma matricial se obtiene de las ecuaciones anteriores, donde las variables con tilde serán los nuevos estados del sistema

$$\begin{bmatrix} \dot{\tilde{V}}_{cf} \\ \dot{\tilde{I}}_L \\ \dot{\tilde{V}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_f C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \\ \frac{1}{L} & 0 & -\frac{\bar{U}}{L} \\ 0 & \frac{\bar{U}}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{V}_{cf} \\ \tilde{I}_L \\ \tilde{V}_c \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Análisis de Estabilidad

Una vez que se ha realizado el cambio de coordenadas, se puede observar que el sistema (3) es un sistema de ecuaciones diferenciales lineales con un punto de equilibrio en el origen, y su estabilidad se puede conocer a través del estudio de las raíces del polinomio característico asociado a la matriz jacobiana del sistema.

El polinomio característico es

$$\lambda^3 + a_2 \lambda^2 + a_1 \lambda + a_0, \quad (4)$$

donde

$$\begin{aligned} a_2 &= \frac{RC + R_f C_f}{RC R_f C_f}, \\ a_1 &= \frac{L + \bar{U}^2 R R_f C_f + RC R_f}{RLC R_f C_f}, \\ a_0 &= \frac{\bar{U}^2 R + R_f}{RLC R_f C_f}. \end{aligned}$$

Para que el sistema sea estable, las raíces del polinomio característico (4) deben tener parte real negativa. Por el criterio de Routh-Hurwitz [17], las raíces del polinomio característico son negativas si se cumple que: $a_0 > 0$, $a_1 > 0$, $a_2 > 0$ y

$$a_2 a_1 - a_0 = \frac{CLR + C_f L R_f + C^2 R^2 R_f + C_f^2 R R_f^2 \bar{U}^2}{C^2 C_f^2 L R^2 R_f^2} > 0.$$

Como los parámetros del sistema corresponden a las características de los elementos electrónicos, todos son positivos. Además, ya que en las condiciones de Routh-Hurwitz solo se tiene suma de términos positivos, concluimos que el punto de equilibrio es globalmente asintóticamente estable.

2.2. Diseños de Funciones de Control

2.2.1. Sistema de control

Se denotan las variables

$$\begin{aligned} x &= [x_1, x_2, x_3]^T = [V_{cf}, I_L, V_c]^T, \\ u(x) &= \bar{U}(V_{cf}, I_L, V_c), \\ v &= I_{sc}. \end{aligned}$$

Así el sistema (1) se escribe de la siguiente forma

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \frac{1}{C_f} \left[v - x_2 - \frac{x_1}{R_f} \right], \\ \dot{x}_2 &= \frac{1}{L} [x_1 - u(x)x_3], \\ \dot{x}_3 &= \frac{1}{C} [u(x)x_2 - \frac{x_3}{R}].\end{aligned}$$

Para analizar la dinámica local del sistema se encuentran sus puntos de equilibrio, los cuales son,

$$v = \frac{x_1}{R_f} + x_2, \quad (5)$$

$$x_1 = u(x)x_3, \quad (6)$$

$$\frac{x_3}{R} = u(x)x_2, \quad (7)$$

donde $0 < u(x) < 1$. Esta restricción se da debido a los valores que puede tomar el ciclo de trabajo. Además, $v > 0$ ya que se está considerando el modelo donde la celda solar siempre entrega energía.

2.2.2. Control por moldeo de energía basado en pasividad

La metodología del diseño del control, como se describe en [8], se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Representar el sistema real como $D\dot{x} + Cx + Rx = u$, donde D y R son matrices diagonales y C es antisimétrica.
2. Definir el sistema deseado $D\dot{x}_d + Cx_d + Rx_d = u_d$.
3. Obtener la ecuación de error $D\dot{e} + Ce + Re = u - u_d$ empleando la definición del error $e = x - x_d$.
4. Mostrar que la función $V(e) = \frac{1}{2}e^T De$ es una función de Lyapunov para el sistema.
5. Encontrar el control u basado en pasividad que garantice que $\dot{V}(e) = e^T D\dot{e} < 0$.

En esta sección, aplicaremos la misma metodología descrita en [8] para el diseño del control del sistema (1).

Empleando la formulación de Euler-Lagrange, el sistema puede expresarse como

$$D\dot{x} + Cx + Rx = u, \quad (8)$$

para el cual las matrices D , C y R están dadas por

$$D = \begin{bmatrix} C_f & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & \bar{U} \\ 0 & -\bar{U} & 0 \end{bmatrix};$$

$$R = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix}; \quad x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \quad u = \begin{bmatrix} I_{sc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix},$$

donde $x_1 = V_{cf}$; $x_2 = I_L$; $x_3 = V_C$ son los estados del sistema, y $\dot{\mathbf{x}}$ el vector de sus derivadas respectivamente. Se tiene que $D, C, R \in \mathbb{M}_{3 \times 3}$, como las matrices D y R son diagonales con entradas positivas, se tiene que son matrices simétricas definidas positivas. Además, la matriz D contiene a los elementos que almacenan energía mientras que R contiene a los elementos que disipan energía. Por otra parte, la matriz C contiene a los elementos que no aportan ni disipan energía (interruptores) y es antisimétrica, es decir, $C = -C^T$. Por último, u es un vector de fuerzas externas (en este caso corresponde a la corriente I_{sc}).

Observación 2.1. Sea $A \in \mathbb{M}_{n \times n}$ y $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$. Si A es antisimétrica entonces $\mathbf{x}^T A \mathbf{x} = 0$.

De acuerdo a la metodología descrita en [8], se desea modificar la dinámica del sistema (8), llevándolo a un estado deseado (con subíndice d), regido por el siguiente sistema

$$D\dot{x}_d + Cx_d + Rx_d = u_d. \quad (9)$$

Si los sistemas (8) y (9) no son iguales, entonces existe un error dado por la expresión

$$D\dot{e} + Ce + Re = u - u_d, \quad (10)$$

en donde: $\dot{e} = \dot{x} - \dot{x}_d$, $e = x - x_d$. La ley de control se diseña, de tal manera que el sistema sea estable, por lo que se propone la siguiente función de Lyapunov

$$V(e) = \frac{1}{2} e^T D e. \quad (11)$$

Para mostrar que la función (11) satisface el teorema de estabilidad de Lyapunov, se debe cumplir que: $V(0) = 0$; $V(e) > 0$; $\dot{V}(e) \leq 0$; lo cual asegura que (11) tiene un punto de equilibrio estable (si $\dot{V}(e) \leq 0$) o asintóticamente estable (si $\dot{V}(e) < 0$). Ya que D es diagonal con entradas positivas, se tiene que $V(0) = 0$ y $V(e) > 0$. Derivando (11) se tiene

$$\dot{V}(e) = e^T D \dot{e}. \quad (12)$$

Despejando $D\dot{e}$ de (10) y sustituyendo en (12) se llega a

$$\dot{V}(e) = -e^T C e - e^T R e + e^T [u - u_d].$$

Como C es antisimétrica, $e^T C e = 0$. Dado que R es definida positiva, $-e^T R e < 0$. Por lo que

$$\dot{V}(e) = -e^T R e + e^T [u - u_d], \quad (13)$$

es semidefinida negativa si $e^T [u - u_d] = 0$. Es decir, basta que $u = u_d$ para que el punto de equilibrio sea asintóticamente estable; por lo que la ley de control resulta

$$u = D\dot{x}_d + Cx_d + Rx_d - R_{am}e, \quad (14)$$

donde, para aumentar o apresurar la convergencia del sistema al punto de equilibrio, se ha añadido la matriz de inyección de amortiguamiento R_{am} ; tal que $R_{am} \in \mathbb{M}_{3 \times 3}$ y además es definida positiva [8]. Los vectores y las matrices de (14) están definidos por

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} I_{sc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_f & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_{1d} \\ \dot{x}_{2d} \\ \dot{x}_{3d} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & \bar{U} \\ 0 & -\bar{U} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1d} \\ x_{2d} \\ x_{3d} \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1d} \\ x_{2d} \\ x_{3d} \end{bmatrix} \\ &- \begin{bmatrix} \frac{1}{R_{1am}} & 0 & 0 \\ 0 & R_{2am} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{R_{3am}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 - x_{1d} \\ x_2 - x_{2d} \\ x_3 - x_{3d} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (15)$$

Los elementos que resultan del producto R_{am} con los errores $x_k - x_{kd}$, $k \in \{1, 2, 3\}$ deben tener congruencia con las unidades de la ecuación que participan, por tal motivo la matriz R_{am} se define como aparece en (15), teniendo en cuenta que los productos $\frac{1}{R_{1am}}(x_1 - x_{1d})$ y $\frac{1}{R_{3am}}(x_3 - x_{3d})$ son corrientes, mientras que el producto $R_{2am}(x_2 - x_{2d})$ corresponde a voltaje. Nótese que la introducción de R_{am} permite escribir la expresión (13) como $\dot{V}(e) = -e^T R_{eq} e + e^T [u - u_d]$, donde $R_{eq} = R + R_{am}$, lo cual implica que $\dot{V}(e) < 0$ si $e^T (u - u_d) = 0$, es decir, se tiene un punto de equilibrio asintóticamente estable.

Con las expresiones obtenidas de los valores deseados del sistema, se puede obtener la ley de control de manera explícita de la segunda ecuación del sistema (15), la cual queda expresada como

$$u(x) = [x_{1d} - L\dot{x}_{2d} + R_{2am}(x_2 - x_{2d})] \frac{1}{x_{3d}},$$

Explicaciones más extensas sobre la aplicación de este control pueden consultarse en [8] y [6].

3. Simulación

3.1. Sistema en lazo abierto

En esta sección, se muestra la simulación del sistema en lazo abierto (sin retroalimentación) después de haber obtenido los parámetros del mismo. Las soluciones de las ecuaciones diferenciales

se han obtenido a través del uso de Función S, las cuales son subrutinas vinculadas dinámicamente, que el motor de ejecución de MATLAB puede cargar y ejecutar automáticamente, además de trabajar en conjunto con bloques en el entorno de Simulink, y se ha trabajado con un orden de paso de 1×10^{-8} ya que permite obtener simulaciones estables y más apegadas a la realidad.

En las figuras 2, 3 y 4, se pueden observar los valores que toman las tres variables estudiadas en este sistema desde su estado inicial hasta llegar al equilibrio, que en este caso corresponden a 30.5V, 1.22A y 61V respectivamente para V_{C_f} , I_L y V_C en el sistema promediado. Sin embargo, ya que el convertidor elevador requiere una conmutación para elevar el voltaje de salida, se puede observar un rizo tanto en las variables I_L como V_C , que son las variables del sistema que corresponden al convertidor. En la figura 5 se puede ver la señal de control $u(x)$ generando una conmutación con un ciclo de trabajo constante, y además, se puede analizar que aún al tener esta señal como constante el sistema alcanza el equilibrio en poco tiempo, por lo que se espera obtener mejoras en la disminución de las oscilaciones y estabilidad global del sistema al implementar las leyes de control estudiadas.

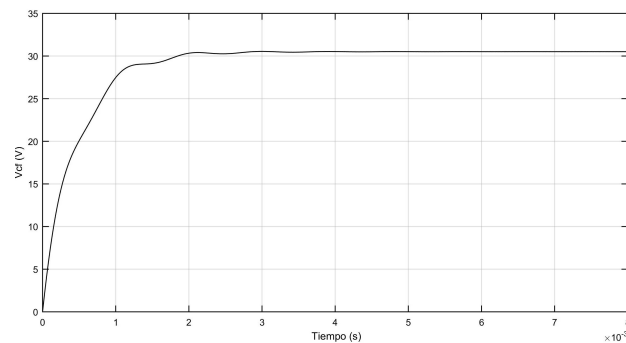


Figura 2: V_{C_f} en lazo abierto.

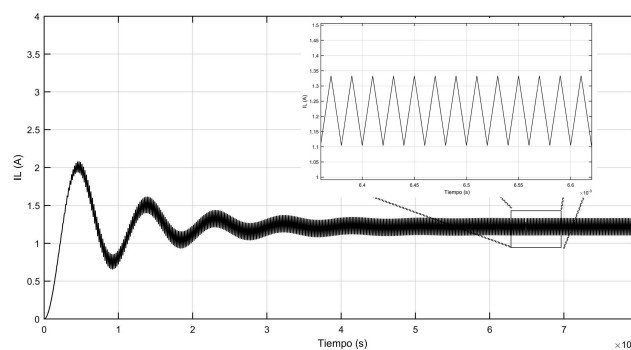
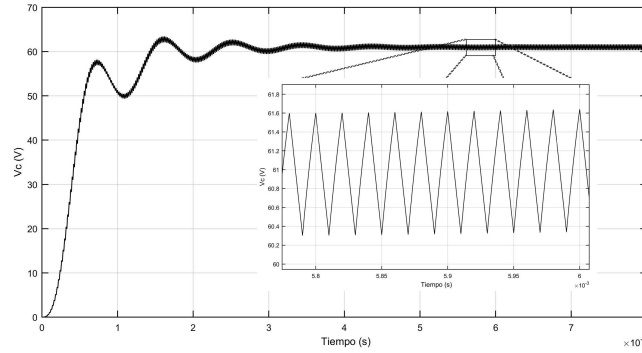
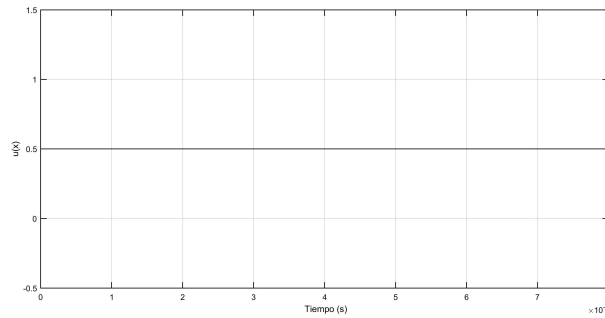


Figura 3: I_L en lazo abierto.

Figura 4: V_C en lazo abierto.Figura 5: Señal de control $u(x)$ constante en lazo abierto.

3.2. Control por moldeo de energía basado en pasividad

La metodología para el diseño de control basado en pasividad se encuentra descrita y desarrollada en la subsección 2.2.1, donde se obtiene la ley de control

$$u(x) = [x_1 - L\dot{x}_{2d} + R_{am}(x_2 - x_{2d})] \frac{1}{x_{3d}}.$$

Para esta ley de control se requiere un menor esfuerzo que al aplicar control por modo deslizante, esto a causa de que el esfuerzo en la ley de control, corresponde directamente al error en el seguimiento de un valor de referencia para tender asintóticamente a la estabilidad. Para la simulación de esta ley de control, se han utilizado los mismos parámetros que en los casos anteriores, y se ha empleado implícitamente la definición de error para garantizar la estabilidad como se desarrolla en la subsección 2.2.2. Los resultados obtenidos para el voltaje de referencia V_{C_f} , la corriente I_L , el voltaje V_C y la señal de control $u(x)$, se muestran en las figuras 6, 7, 8 y 9, respectivamente.

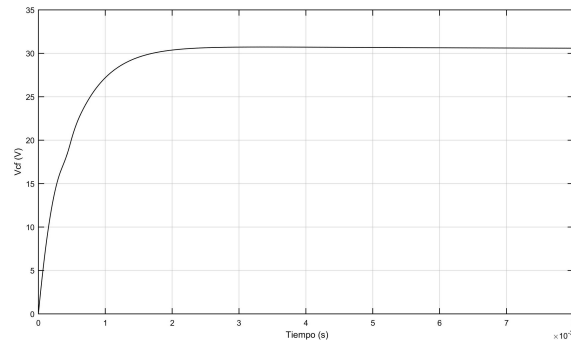


Figura 6: V_{Cf} con control basado en pasividad.

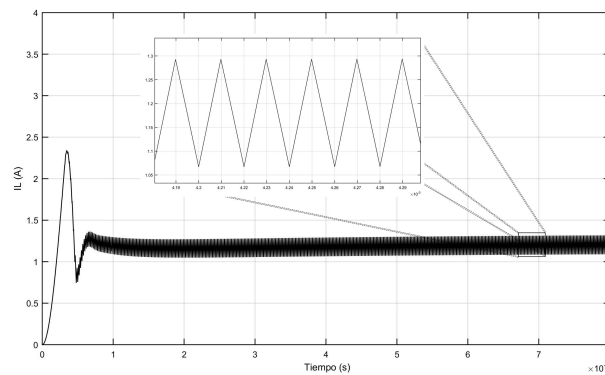


Figura 7: I_L con control basado en pasividad.

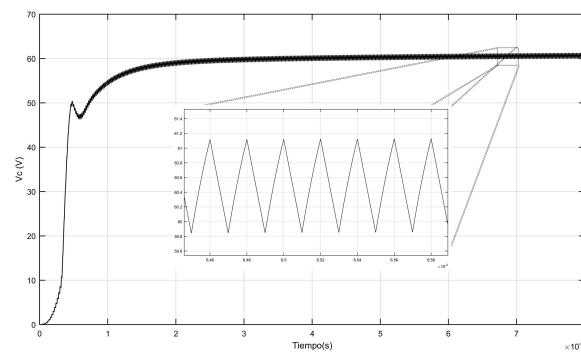


Figura 8: V_C con control basado en pasividad.

3.3. Respuestas ante variaciones en la carga del sistema

La figura 10, muestra el comportamiento de la variable V_C al perturbar dos veces el sistema haciendo un cambio en el valor de la carga, la primera perturbación corresponde al 80 % de la carga inicial, mientras que la segunda perturbación corresponde al 120 % de la carga inicial; lo que se observa en la figura 10 es que se genera un pequeño pico o valle al momento de la perturbación, pero después de un momento regresa al voltaje deseado ($V_d = 61V$), por lo que este control tiene un buen comportamiento para estabilizar el voltaje de salida ante perturbaciones en la carga.

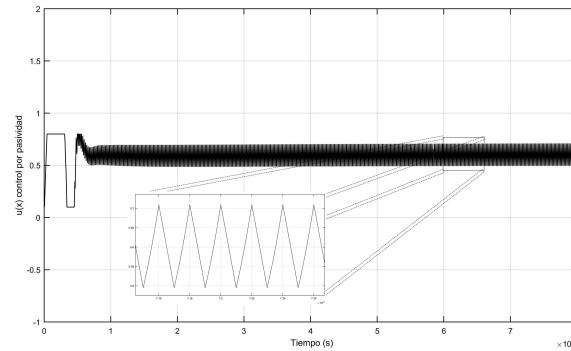


Figura 9: Señal de control $u(x)$ con control basado en pasividad.

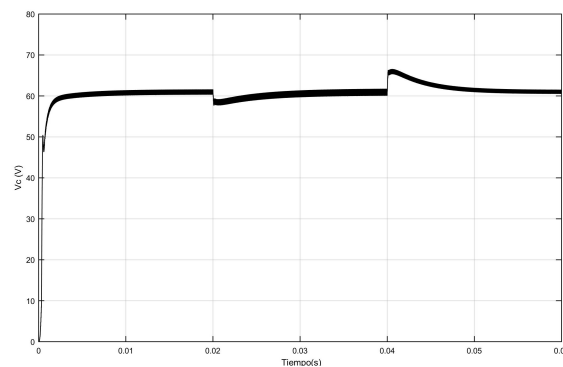


Figura 10: V_C con control basado en pasividad con variación en la carga.

4. Resultados

Para comparar los resultados numéricos con los experimentales se elaboró un prototipo (véase [15] para más detalles del prototipo) y se le aplicó un control basado en pasividad; los resultados obtenidos se muestran en la figura 11 y puede observarse que para la variable V_{C_f} se tiene una perturbación mayor en sus valores, incluso quedan por debajo de los 30V tanto por las variaciones en la carga como en la fuente, mientras que la variable V_C se mantiene en el valor deseado (61V) aún cuando se tienen perturbaciones en la carga. Una diferencia notable con los casos anteriores es que al inicio se observa una pequeña cresta que se mueve con suavidad al valor deseado debido al control. Esta misma situación se observa al crear alteraciones en la carga, se generan pequeños picos que con suavidad se mueven al valor deseado, es decir, el voltaje de salida se mantiene ante perturbaciones en la carga. Cabe destacar que este control depende en gran medida de las mediciones en el sensor de corriente del inductor, por lo que su correcto funcionamiento es indispensable para llegar a estos resultados. Por último, al igual que en los casos anteriores, tanto el comportamiento como la forma de la corriente es el esperado para la primera carga, como se observa en la última gráfica de la figura 11.

5. Conclusión

Los resultados matemáticos, numéricos y reales obtenidos permiten hacer una comparación entre la similitud que tienen estos resultados entre sí y las adaptaciones que se deben tomar en con-

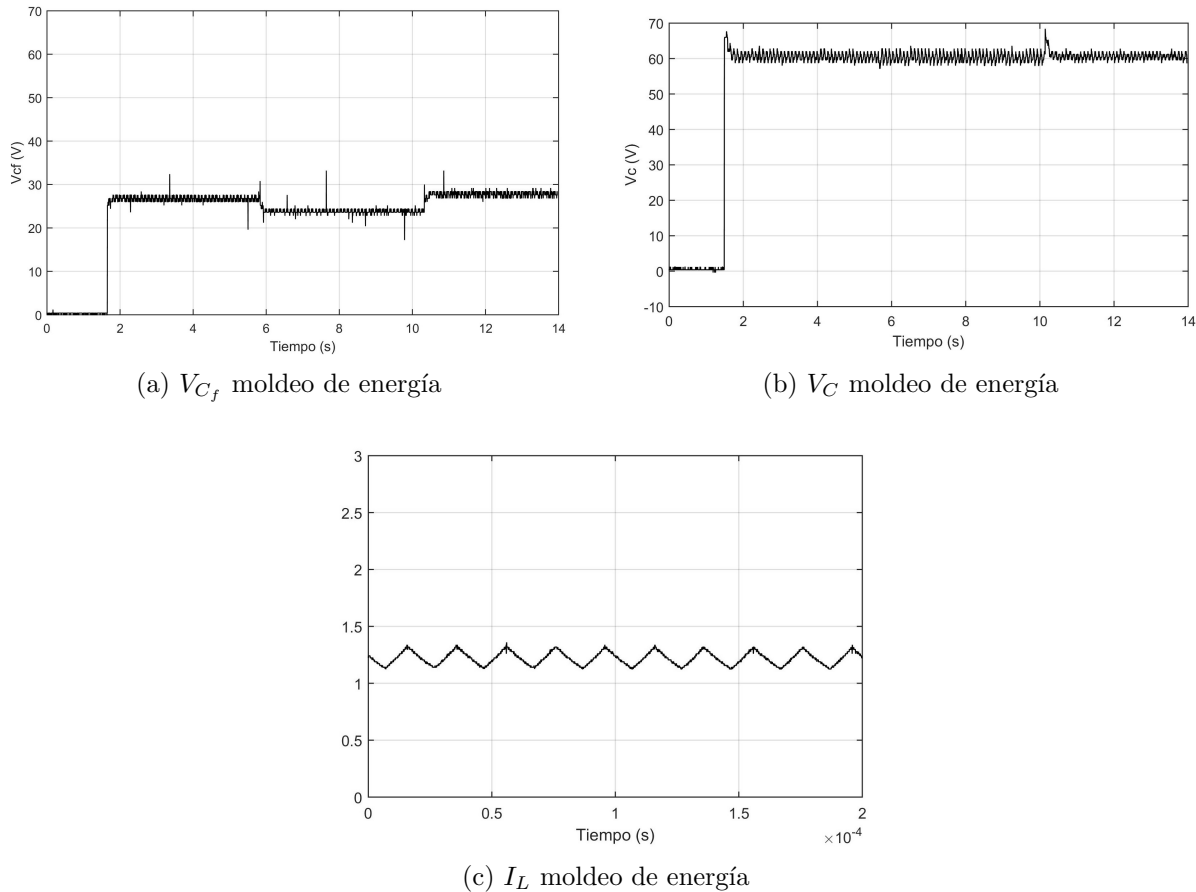


Figura 11: Resultados en moldeo de energía con variaciones en la carga.

sideración para estudiar un sistema real a través de su modelo matemático. La caracterización de la celda solar usando la aproximación lineal de la exponencial permitió obtener resultados numéricos bastante aceptables comparado con los reales. Al comparar el control basado en pasividad con el control por modos deslizantes [1], cuando se tienen variaciones tanto en la fuente como en la carga, se observó que el control basado en pasividad presenta mejores resultados; ya que, a pesar de que el control por modos deslizantes funciona para llegar al estado estable, el punto de equilibrio se mueve al tener las variaciones antes mencionadas, esto debido a que los parámetros I_{sc} y R afectan directamente al equilibrio. Mientras el control basado en pasividad, nos permite mantener el voltaje de salida en un valor estable con base a una referencia ante las perturbaciones en la carga y la fuente.

6. Agradecimientos

El primer autor agradece al CONAHCYT por el apoyo otorgado a través de la Beca para Estudios de Maestría CVU 1079821.

Los autores agradecemos a los revisores las observaciones y comentarios hechas a este trabajo que ayudaron a mejorarlo.

7. Conflicto de interés

Los autores declaran no tener conflictos de intereses

8. Declaratoria de uso de Inteligencia Artificial

Los autores declaran que no han utilizado ninguna aplicación, software, páginas web de inteligencia artificial generativa en la redacción del manuscrito, en el diseño de tablas y figuras, ni en el análisis e interpretación de los datos.

Referencias

- [1] Argote, H. (2019). Análisis de estabilidad y control de un sistema celda convertidor. Tesis de Maestría, UJAT.
- [2] Babaa, S. E., El Murr, G., Mohamed, F., y Pamuri, S. (2018). Overview of boost converters for photovoltaic systems. *Journal of Power and Energy Engineering*, 6(4), 16-31.
- [3] Elshaer, M., Mohamed, A., y Mohammed, O. (2010, November). Smart optimal control of DC-DC boost converter in PV systems. In 2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T & D-LA) (pp. 403-410). IEEE.
- [4] Erickson, R. W., y Maksimovic, D. (2007). Fundamentals of power electronics. Springer Science & Business Media.
- [5] Fraas, L. y L. Partain (2010). Solar Cells and Their Applications. Wiley, New Jersey.
- [6] H. Sira-Ramirez y R. Ortega (1995). Passivity-based controllers for the stabilization of DC-to-DC power converters, Proceedings of 1995 34th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, 1995, pp. 3471-3476 vol.4.
- [7] Kumari, R., Pyakurel, P., Bhattacharya, D., Rai, B., Pandit, M., y Sherpa, K. S. (2023). Design of smart autonomous solar panel with cascaded SEPIC-boost converter for high voltage renewable applications. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(1), 1066-1078.
- [8] Olmos, J.A. (2012). Análisis de Técnicas de Control por Moldeo de Energía Basado en Pasividad Aplicadas en Convertidores Tipo Elevador Entrelazados para su Uso en Sistemas de Alimentación Distribuida. Tesis Doctoral, CENIDET.
- [9] PROMÉXICO (2017). La Industria Solar Fotovoltaica y Fototérmica en México.
- [10] Perko, L. (2013). Differential equations and dynamical systems (Vol. 7). Springer Science & Business Media.
- [11] Rajavel, A., y Rathina Prabha, N. (2021). Fuzzy logic controller-based boost and buck-boost converter for maximum power point tracking in solar system. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 43(4), 945-957.
- [12] Sahu, B. , P. K. Jena y B. Rathore (2016). Design and Implementation of Inverter for PV array feeding AC Grid. *International Journal of Engineering Development and Research*, 4(3), 862-869.

- [13] Secretaría de Energía (2018). Prospectiva de Energías renovables 2018-2032 (1).
- [14] Sutikno, T., Samosir, A. S., Aprilianto, R. A., Purnama, H. S., Arsadiando, W., y Padmanaban, S. (2023). Advanced DC-DC converter topologies for solar energy harvesting applications: a review. *Clean Energy*, 7(3), 555-570.
- [15] Vidal, J.R. (2025) Comparación del efecto de control en un sistema celda convertidor. Tesis de Maestría, UJAT.
- [16] Xiao, W., N. Ozog y W. G. Dunford (2007). Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54(3), 1696-1704.
- [17] Yang, X. (2002). Generalized form of Hurwitz–Routh criterion and Hopf bifurcation of higher order. *Applied Mathematics Letters*, 15(5), 615-621.